

***INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS:
MODELOS MATEMÁTICOS Y COMPUTACIONALES***

MEMORIAS DEL XII CONGRESO INTERNACIONAL DE
MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
CIMENICS'2014
ISLA DE MARGARITA, VENEZUELA, 24 al 26 de marzo de 2014

INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS: MODELOS MATEMÁTICOS Y COMPUTACIONALES

Editores

E. DÁVILA, J. DEL RÍO, M. CERROLAZA

Instituto Nacional de Bioingeniería

Universidad Central de Venezuela

R. CHACÓN

Universidad de Los Andes



**SOCIEDAD VENEZOLANA DE
MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA**

Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela

INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS: MODELOS MATEMÁTICOS Y COMPUTACIONALES

Primera edición: marzo de 2014

© 2014 SVMNI

© 2014 **Los Editores**

Diseño de la portada: Vannessa Duarte/Liseth Valencia
Instituto Nacional de Bioingeniería
Universidad Central de Venezuela

Solicitud de ejemplares a: Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería
Universidad Central de Venezuela
Caracas, Venezuela
☎ +58 (0)212 285.2827 / 285.9608 / 286.8094 / 286.4534

Impresión: Miguel Ángel García & Hijos, Caracas, Venezuela

La figura en la portada del libro es cortesía de M. Valera, J. Guevara y J. León, y corresponde a una batimetría del Lago de Valencia considerando la velocidad y dirección del viento alrededor del lago.

Nada de este libro puede ser reproducido, almacenado en un sistema de información mecánico o electrónico, fotocopiado, grabado o transmitido sin la autorización escrita de la **SVMNI** o de los editores.

ISBN: 978-980-7161-04-6

*Ingeniería y ciencias aplicadas: modelos
matemáticos y computacionales*

PREFACIO

Es un placer anunciar a la comunidad científica nacional e internacional que la serie CIMENICS llega a su doceava edición, después de más de 22 años de incansable labor. Como siempre hemos apuntado, mantener un evento de estas características durante más de dos décadas con un escrupuloso respeto a su periodicidad, acompañados de momentos históricos en los cuales las condiciones y el entorno científico del país no son los más favorables ni los deseados, no es sino el resultado de un esfuerzo sostenido, de una mística más allá de lo esperado y de un grupo de gente que cree en nuestro desarrollo científico y tecnológico.

Tenemos en nuestro palmarés la celebración de un evento científico que ha recorrido prácticamente todo el país. Se han celebrado congresos en buena parte de las ciudades venezolanas, porque estamos firmemente convencidos de que la ciencia hay que llevarla a la gente. Un repaso histórico nos recuerda que el primer Seminario de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas se organizó en la Universidad Central de Venezuela en marzo de 1993. No quisimos llamarlo “I Congreso” previendo que, si la audiencia resultaba escasa, no se pudiera repetir. Sin embargo, y afortunadamente para nosotros, no fue así. La audiencia fue mayoritaria y generosa y entonces, aprovechando la presencia de destacados investigadores venezolanos y colegas internacionales, se acordó celebrar el II Congreso en Maracaibo en 1994. A partir de esa fecha, el evento crece sostenidamente y adquiere periodicidad bienal, realizándose subsiguientes congresos en Mérida (1996), Puerto Ordaz (1998), Puerto La Cruz (2000), Caracas (2002), San Cristóbal (2004), Porlamar (2006), Porlamar (2008), Mérida (2010) y Porlamar (2012). Este XII Congreso que hoy reseñamos, se celebró durante el mes de marzo de 2014, también en la ciudad en Porlamar. Se dieron cita más de 180 investigadores nacionales y de otras latitudes, quienes presentaron y discutieron sus avances en métodos numéricos y simulación computacional en fluidos, sólidos, materiales, geomecánica, optimización, señales, bioingeniería, electrónica e imágenes.

Abrigamos la fuerte sospecha de que CIMENICS se mantendrá en el tiempo, superando todas sus metas. Su poder de convocatoria se ha afianzado en el escenario nacional y trasciende nuestras fronteras desde hace ya varios años, debido a su nivel de excelencia, a su consolidación, al alto impacto y crecimiento de los métodos numéricos y a la imperiosa necesidad de promover espacios de difusión que acompañen un desarrollo científico-tecnológico sostenible en las próximas décadas. CIMENICS es reconocido como uno de los tres congresos importantes de métodos numéricos en ingeniería que aún sobreviven en nuestra región latinoamericana, junto al CILAMCE brasilero y el MECOM-ENIEF argentino.

Hacemos llegar nuestro agradecimiento a todos los autores y participantes en el evento, quienes asistieron de manera entusiasta a exponer sus trabajos y a discutir con sus pares los resultados de sus investigaciones, haciendo crecer este foro ya consolidado a nivel internacional. También, vaya nuestro agradecimiento a los revisores y al Comité Científico, quienes contribuyeron a mantener el nivel de excelencia del congreso. Estamos en deuda con todos ellos.

No queremos finalizar este prefacio sin antes agradecer a todos aquellos que con su esfuerzo y dedicación contribuyeron al éxito del congreso, pasando por la organización, la celebración del evento y la edición de las memorias. También, es momento de mencionar que los editores declinan asumir cualquier responsabilidad sobre las opiniones y conceptos emitidos por los autores en sus trabajos.

Los Editores
Isla de Margarita, marzo de 2014

ORGANIZADORES

E. Dávila, M. Cerrolaza

Instituto Nacional de Bioingeniería

Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

☎ +58 (0)212 285.2827 / 285.9608 / 286.8094 / 286.4534

Email: [{everling.davila|miguel.cerrolaza} @inabio.edu.ve](mailto:{everling.davila|miguel.cerrolaza}@inabio.edu.ve)

R. Chacón

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

☎ +58 (0)274 240.2644 / 2645

Email: rdchacon@ula.ve

COMITÉ ORGANIZADOR LOCAL

G. Uzcátegui (Presidenta)

V. Duarte, J. Del Río, J. Vivas, L. Valencia, E. Salinas

Universidad Central de Venezuela

N. González

Universidad de Los Andes

COMITÉ CIENTÍFICO

M. Aliabadi, *Queen Mary College, UK*

G. Larrazábal, *Texas University, USA*

P. Delage, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Francia*

J. Rincón, *Universidad del Zulia, Venezuela*

E. Alarcón, *Universidad Politécnica de Madrid, España*

R. Callarotti, *Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela*

L. Nallim, *Universidad Nacional de Salta, Argentina*

E. Fancello, *Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil*

M.C. Rivara, *Universidad de Chile, Chile*

A. Maure, *Universidad Nacional del Cuyo, Argentina*

S. Buitrago, *Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela*

E. Rank, *Technical University of Munich, Alemania*

V. Griffiths, *Colorado School of Mines, USA*

M.E. Elberg, *Universidad de Los Andes, Venezuela*

M. Doblaré, *Universidad de Zaragoza, España*

J. Sulem, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Francia*

G. Buscaglia, *Universidad de Sao Paulo, Brasil*

A. Larreteguy, *Universidad Argentina de la Empresa, Argentina*

M. Martínez, *Universidad Central de Venezuela, Venezuela*

A. Salvadori, *Universidad de Brescia, Italia*

PATROCINADORES

Universidad Central de Venezuela, UCV

Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, CDCH-UCV

FONACIT

ÍNDICE	pág.
CONFERENCIAS INVITADAS (CI)	
Advanced computer methods in electromagnetic problems with applications to grounding analysis <i>M. Casteleiro, F. Navarrina, I. Colominas, J. París, X. Nogueira</i>	1
Effective permeability of carbonate reservoirs using the random finite element method <i>D.V. Griffiths, J. Paiboon, J. Huang, G. Fenton</i>	15
Development of subject-specific models with material properties and boundary conditions derived from medical imaging <i>M.C. Ho Ba Tho, T.T. Dao, S. Bensamoun</i>	33
Analysis of potentials in crystal networks by means of nonlinear optimization techniques <i>R. Meziat</i>	41
MECÁNICA DE SÓLIDOS Y MATERIALES (MSM)	
Diagnóstico de fallas en la estructura del rotor de un generador eléctrico <i>P. Roa, J. García</i>	1
Fatigue life and dynamic behavior of submarine pipelines subjected to slug flow and vortex-induced vibrations <i>B. Bossio, A. Blanco, E. Casanova</i>	7
Absorción de energía en el colapso axial de tubos concéntricos de metal expandido <i>H. Borges, C. Graciano, G. Martínez</i>	13
Modeling and simulation in a component of an “air drill” planter <i>G. Bourges, M. Medina</i>	19
Ellipsoidal impulse responses in fractured media <i>P. Contreras, L. Rincón, J. Burgos</i>	25
Análisis de grietas radiales en elementos cilíndricos usando el método de elementos de contorno 2D <i>P. Teixeira, M. González</i>	31
Modelamiento bidimensional elástico de materiales bifásicos a escala mesoscópica <i>H. D’Armas, G. Martínez, L. Llanes</i>	37
Evaluación de la condición “columna fuerte viga débil” en pórticos de concreto reforzado mediante análisis estáticos no lineales <i>A. Marinilli</i>	45
Diseño y análisis de un tren de aterrizaje triciclo para avión no tripulado utilizando elementos finitos <i>O. González, G. Martínez, C. Graciano</i>	51
Force fabric and macroscopic friction in three-dimensional granular materials <i>V. Urdaneta, J. Petit, X. García, E. Medina</i>	57
Finite difference modeling of rupture propagation under velocity dependent and thermal weakening processes <i>A. Nieves, O. Rojas, S. Day</i>	63
MECÁNICA DE FLUIDOS (MF)	
Testing of openfoam capabilities for laminar, turbulent and two-phase flow models <i>C. Montilla, A. Blanco, L. Rojas</i>	1

Descripción computacional del transporte de sedimentos en la Bahía El Tablazo <i>C. Araujo, J. Rincón, J. Flores</i>	7
Modelo termodinámico de combustión empleando EGR <i>C. Villamar, R. Santos, J. Bermúdez</i>	13
A 2D BEM approach to the modelling of noise propagation <i>P. Teixeira, B. Bossio</i>	19
Understanding circulation in Lake Valencia, Venezuela, by a shallow water model <i>M. Valera, J. Guevara, J. León, R. García, I. Saavedra</i>	25
Obtención del diagrama del coeficiente de flujo a través del análisis experimental y numérico para una válvula de globo de una pulgada <i>W. Rosales, F. González, M. Torres, F. Caminos</i>	31
Validación de predicciones numéricas de flujo laminar en micro canales con deslizamiento en las paredes <i>N. Loaiza, J. García, A. Blanco</i>	37
Selfconsistent algorithm for the kinetic of the $A + B \xrightarrow{k_0} C$ reaction <i>M. Rodríguez, J. Bastardo</i>	43
Determinación de la vida útil de una válvula de globo mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional <i>J. Ramírez, J. Colmenares, F. González, A. Sarcos</i>	49
Modelo dinámico para la detección y localización de obstrucciones parciales en tuberías <i>M. Guillén, J. Dulhoste, R. Santos, I. Rubio, G. Besançon, D. Georges</i>	55
Preliminary design of a double expansion through flow wave rotor: wave rotor dimensioning <i>G. Materano, M. Savill</i>	61
Comparison of particle dispersion obtained with simple stochastic models and LES in pipe flows <i>J. García, A. Crespo, M. Torres</i>	69
Langevin approach for modelling Ostwald ripening in emulsions <i>G. Rodríguez, J. Toro</i>	75
Sensitivity analysis of end pressures and flows with respect to a blockage inside a pipeline <i>I. Rubio, G. Besançon, D. Georges, M. Guillén, J. Dulhoste, R. Santos</i>	81
Análisis numérico para la determinación de eficiencias hidráulicas en turbinas de flujo libre <i>G. Marturet</i>	87
Average values of thin liquid films formed between two droplets of emulsion <i>J. Fernández, J. Toro</i>	93

GEOMECÁNICA E INGENIERÍA GEOLÓGICA (GG)

Espectros de diseño del área metropolitana de Mérida a partir de perfiles sísmicos modelado a través de elementos finitos con comportamiento no lineal y demandados dinámicamente <i>F. Pinto, M. Cerrada, P. Rivero</i>	1
Modelo numérico 2D del subsuelo del área metropolitana de Mérida a partir del código abierto SPECFEM2D 6.1.5 <i>J. Colina, M. Salas, V. Volcanes, M. Cerrada, S. Klarica, G. Sosa</i>	9

Aplicación del método de elementos finitos en el análisis de los taludes localizados entre San Juan de Lagunillas y Lagunillas, Municipio Sucre, Estado Mérida <i>G. Sosa, M. Barrueta, M. González, M. Elberg</i>	15
Determinación del tipo de rotura y aplicación del método de equilibrio límite en los taludes ubicados en la vía hacia Jají, Estado Mérida <i>F. Bongiorno, B. O'Neill, F. Castillo, N. Belandria, R. Chacón</i>	21
Implementación de técnicas out-of-core para la visualización de volúmenes sísmicos de gran tamaño <i>J. Castellanos, L. Arvelo, D. Manzo, P. Linares, J. Rodríguez</i>	27
Resolución de las ecuaciones no lineales presentes en el estudio de la estabilidad de taludes considerando rotura plana <i>N. Belandria, R. Ucar, F. Bongiorno, F. León, M. Díaz, J. Arteaga</i>	33
Análisis de estabilidad de la trinchera 41+000 a 41+240 de la autopista San Cristóbal-La Fría empleando el método de elementos finitos <i>J. Torres, R. Torres</i>	39
Metodología para el análisis de riesgo sísmico por medio del método de elementos finitos <i>R. Torres, J. Torres</i>	45
Elementos finitos aplicados al análisis del comportamiento geomecánico de intercalaciones de lutita y arenisca. <i>M. Elberg, C. Hernández, L. Ojeda</i>	51
Redes neuronales artificiales aplicadas al análisis del efecto de la energía de deformación de la zona sísmica sudamericana <i>M. Elberg, F. Rivas</i>	57
Análisis de estabilidad a posteriori del deslizamiento Las González, Municipio Sucre, Estado Mérida-Venezuela, aplicando el método de elementos finitos <i>J. Gutiérrez, M. Monsalve</i>	63
 <i>TÉCNICAS COMPUTACIONALES Y APLICACIONES (TCA)</i>	
Simulation study of granular Leidenfrost effect <i>V. Idler</i>	1
Estudio experimental de la fuerza de fricción cinética grano-pared en un silo <i>J. Darias, G. Gutiérrez</i>	7
Modelado de flujo en tuberías para detección y localización de fugas <i>J. Dulhoste, M. Guillén, R. Santos, G. Besançon</i>	13
Simulación en Matlab de problemas de contorno elípticos en una dimensión empleando el método de elementos finitos <i>J. Zambrano, D. Godoy</i>	19
Motion of intruders within a vibrated granular BED <i>I. Sánchez, K. Asencio, D. Maza, I. Zuriguel</i>	25
Análisis numérico y experimental para determinar la vida útil en una reducción sometida a erosión <i>A. Sarcos, W. Rosales, J. Colmenares, J. Ramírez</i>	31
Algoritmos de memoria externa: una aproximación conceptual y taxonómica desde la visualización de volúmenes sísmicos <i>J. Canache, J. Castellanos</i>	37

Resolución numérica de la ecuación de convección difusión usando volúmenes finitos y mallas no ortogonales de cuadriláteros en yacimientos de estructura compleja	43
<i>G. Sosa, O. Jiménez, S. Buitrago</i>	
Phase transitions in a vertically vibrated granular monolayer	49
<i>R. Urbina, A. Goncalves, I. Sánchez</i>	
Estudio paramétrico de los coeficientes del modelo TAIT modificado al simular el moldeo por inyección de muestras de polipropileno	55
<i>C. Almonacid, M. Candal, O. Pelliccioni</i>	
Efecto del tipo de mallado en la simulación del moldeo por inyección asistida por gas de una pieza plástica	61
<i>R. Morales, O. Mata</i>	
Detecção de danos via técnica de otimização global considerando ruídos nas medições	67
<i>J. Suveges, S. Cunha, P. Alexandrino, A. Jorge, Y. Mendez</i>	
Diseño de un helióstato empleando técnicas computacionales	73
<i>R. Chacón, S. Provenzano, L. Dávila, S. Barboza, F. Bongiorno</i>	
Estrategia metodológica para la multiplicación matriz dispersa–matriz dispersa mediante el lenguaje de programación paralela ZPL	79
<i>E. Vargas, E. Flores, E. Vargas, D. Rey</i>	
Simulador didáctico del funcionamiento de memorias caché	85
<i>A. Parra, D. Nimo, E. Vásquez, J. Amaya</i>	
Model building using genetic algoritm for data fitting	91
<i>M. Borregales, J. Cappelletto, M. Asuaje, A. Shmueli, M. Stanko</i>	

MODELOS MATEMÁTICOS (MM)

Geometry of tumor growth in brain	1
<i>M. Martín, F. Torres</i>	
Accelerating the convergence of the FEMSES method using multi-grid techniques	7
<i>D. Fernández, J. Zambrano, M. Mehri, Y. El-Kurdi, D. Giannacopoulos</i>	
A simple approach to account for cell latency and necrosis in a brain tumor growth model	13
<i>J. Rojas, R. Plata, M. Martín</i>	
Numerical solution of a linear mixed-type functional differential equation using the segmented tau method	19
<i>C. Da Silva, R. Escalante</i>	
A coupled FEM-ODE multi-scale method applied to the modeling of EPM processes	25
<i>Y. Du Terrail, A. Gagnoud, L. Davoust</i>	
Estudio del uso de distintas familias de wavelets en la resolución de sistemas de ecuaciones lineales resultantes de discretizaciones miméticas	31
<i>E. Flores, E. Vargas, D. Rey</i>	
Determinación de propiedades termodinámicas de gases y sus mezclas considerando el principio de estados correspondientes utilizando una herramienta computacional	37
<i>R. Rodríguez, Z. Niño, M. Luis, D. Rey</i>	
A comparative study of two compact finite differences methods: standard vs mimetic	43
<i>L. Córdova, O. Rojas, B. Otero, J. Castillo</i>	
Algoritmo para resolver el problema dinámico directo en un manipulador móvil sometido a restricciones holonómicas	49
<i>P. Araujo, S. Provenzano</i>	

Análisis de los factores que influyen en la duración del entrenamiento de un modelo oculto de Markov a través de la regresión de COX <i>G. Jabbour, J. Maldonado</i>	55
Heurística cooperativa para la solución del problema de la tardanza ponderada total en una máquina <i>J. Amaya, M. Tarazona</i>	61
Método de proyecciones generalizadas alternantes con hiperplanos de separación para dos conjuntos <i>M. Andrade, R. Escalante</i>	67
Método de proyecciones alternas generalizadas para más de dos conjuntos donde no todos son convexos <i>R. Espitia, R. Escalante</i>	73
Simulador basado en agentes del comportamiento de conductores en estacionamientos para vehículos automotores <i>J. Figueroa, G. Colmenares, Á. Gil</i>	79
Reducing computational effort in boundary element engineering analysis <i>L. Valencia, M. Cerrolaza, F. Nieto</i>	85
Numerical modeling of a compliant based precise positioning stage <i>G. Augustinavicius, A. Cereska</i>	91
A mixed mimetic formulation for elliptic problems <i>C. Chacón, B. Otero, J. Guevara</i>	97
 <i>ELECTRÓNICA, CONTROL Y SEÑALES (EC)</i>	
On the design of a nonlinear state observer for the location of a blockage in a pipeline <i>I. Rubio, G. Besançon, D. Georges, M. Guillén, J. Dulhoste, R. Santos</i>	1
Implementación de mecanismos de cooperación en una arquitectura adaptativa para sistemas multi-robots <i>Á. Gil, J. Aguilar, E. Dapena, R. Rivas</i>	7
Modelo y control robusto del reactor nuclear RA4 –UNR <i>I. Rubio, J. Orso, H. Rubio</i>	13
Estimación del intervalo QT multicanal en pacientes chagásicos utilizando técnicas estadísticas <i>J. Cuadros, R. Medina, A. Bravo, F. Durán, T. Núñez</i>	19
Estudio electromagnético del generador 1 del proyecto hidroeléctrico “Manuel Piar”, conectando su devanado amortiguador entre polos durante un régimen transitorio <i>A. Glod, P. Carvajal, E. Martínez, J. Toledo</i>	25
Cálculo de la potencia reactiva utilizando transformada Wavelet y transformada de Hilbert <i>F. Yusti, C. Jiménez</i>	31
Predicción mejorada de neuropatologías basada en análisis de la dinámica no lineal del EEG usando resonancia estocástica <i>C. Seijas, A. Caralli, S. Villazana</i>	37
Desarrollo de un algoritmo para la identificación de instrumentos musicales mediante el uso de una red neuronal artificial <i>G. Caropresse, D. Montoya</i>	43
Simulación del comportamiento electro-térmico en cadenas de aisladores de vidrio y polímero ante contaminación salina <i>A. Beria, F. Rojas, J. Toledo, T. Mendoza, C. Gutiérrez, W. Torres</i>	49

Clasificación de señales electroencefalográficas utilizando entrenamiento cruzado de máquinas de vectores de soporte	55
<i>S. Villazana, G. Montilla, C. Seijas, A. Caralli, A. Eblen</i>	
Aplicación de la transformada de wavelet y máquinas de vectores de soporte para identificar el estado de funcionamiento de los motores	61
<i>E. Hernández, C. Jiménez</i>	
Evaluación de la factibilidad de fabricación de un brazo robótico de dos grados de libertad como asistente a la enseñanza de cirugía laparoscópica	67
<i>M. Velasco, V. Duarte, Y. González</i>	
Análisis de la entropía aproximada de la variabilidad de la frecuencia cardíaca y la variabilidad de la despolarización y repolarización ventricular en sujetos diabéticos	73
<i>M. Rodríguez, M. Altuve, B. Guerra, A. Adrianza, S. Wong</i>	
Parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardíaca durante la prueba oral de tolerancia a la glucosa: un análisis de correspondencias simples	79
<i>É. Severeyn, S. Wong, M. Altuve, G. Ávila, J. Cevallos</i>	
An adaptive recursive weighted filter based on the myriad operator	85
<i>A. Alarcón, J. Paredes</i>	
Analysis of diagnosability for gas lift wells	91
<i>R. Leal, E. Camargo, J. Aguilar, A. Ríos, L. Travé</i>	
Nuevas ecuaciones del telegrafista, para jabalinas, usadas en sistemas de puesta a tierra	97
<i>W. Malpica</i>	

BIOINGENIERÍA Y SISTEMAS BIOLÓGICOS (BSB)

Rectificación estructural en el diseño de prótesis policéntrica de rodilla utilizando elementos finitos	1
<i>B. Amador, C. Müller-Karger, R. Torrealba</i>	
Gasificación de la biomasa residual: Avances en Bioingeniería	7
<i>M. Durán</i>	
Análisis de la respuesta mecánica de un sistema de implante dental sometido a un estado dinámico de carga	13
<i>Y. González, G. Uzcátegui, J. Vivas</i>	
Diseño y evaluación de celdas unitarias para un andamio biomimético de regeneración de tejido óseo usando el método de elementos finitos	19
<i>S. Rodríguez, J. Vivas, E. Dávila</i>	
Measuring occlusal bite forces with a force sensing resistor	25
<i>B. Pérez, A. Vito, I. Sánchez, G. Uzcátegui, Y. González</i>	
Comportamiento elástico lineal de una caja intersomática TLIF ante la aplicación de instrumentación posterior	31
<i>A. Vargas, Y. González</i>	
Evaluación numérica por elementos finitos de la redistribución de presiones plantares en plantillas para calzado de pacientes con pie diabético	37
<i>M. Berroterán, O. Pelliccioni, M. Candal</i>	
Estudio de la influencia de la rigidez del tímpano sobre la ganancia de presión en el oído medio humano	43
<i>L. Caminos, A. García, A. González</i>	

Evaluación numérica por elementos finitos de materiales propuestos para la fabricación de una prótesis de pie usando moldeo por inyección de plástico <i>O. Pelliccioni, C. Müller-Karger, M. Candal</i>	49
Diseño y construcción de un dispositivo para mediciones de fuerza muscular en un distractor alveolar <i>J. Cedeño, W. Carrero, M. Cerrolaza</i>	55
Modelo numérico de una unidad funcional vertebral con propiedades anisotrópicas del disco intervertebral <i>A. Lammardo, L. Zambrano, C. Müller-Karger</i>	61
Communities detection in different protein-protein interaction networks using the Louvain method <i>C. Sanz, A. Álvarez, J. Cabrera</i>	67
Estimación de datos faltantes en registros continuos de glucosa: un enfoque basado en representación poco densa mediante diccionarios redundantes <i>J. Ramírez, J. Paredes, R. Rojas</i>	73
Simulación numérica por elementos finitos de la fabricación de una prótesis de pie usando moldeo por inyección de plástico. Revisión de los materiales <i>M. Candal, O. Pelliccioni, C. Müller-Karger</i>	79
Estudio de la coherencia y la correlación entre la frecuencia cardíaca y la despolarización y repolarización ventricular en sujetos diabéticos <i>M. Rodríguez, M. Altuve, B. Guerra, A. Adrianza, S. Wong</i>	85
Análisis por el método de elementos finitos del comportamiento mecánico de placas ateroscleróticas humanas modificadas con nanotubos de carbono <i>O. Pelliccioni, J. Bustamante, L. Hoyos</i>	91
Estudio detallado del llenado ventricular <i>B. Sánchez, R. Rojas</i>	97
Numerical study (FEA & CFD) of abdominal aortic aneurysms to predict risk of rupture - The role of porosity of the thrombosis <i>O. Altuwaijri</i>	103
Comparación del análisis de esfuerzos de tres modelos de implantes cigomáticos a través de elementos finitos <i>J. Valera, M. Berroterán, A. Lammardo, C. Müller-Karger</i>	109

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES (PI)

Estimación de descriptores de la función ventricular derecha en imágenes de tomografía cardíaca <i>M. Vera, R. Medina, A. Bravo, A. del Mar, O. Valbuena</i>	1
Gesture-gross recognition of upper limbs to physical rehabilitation <i>J. Ojeda, E. Ramírez, F. Moreno, O. Rodríguez</i>	7
Detección de zonas de activación en datos fMRI mediante umbralización del mapa estadístico basada en el Modelo Gaussiano Generalizado <i>B. Guillén, J. Paredes, R. Medina</i>	13
Design and development of a low-cost rehabilitation data glove <i>J. Ojeda, E. Ramírez, C. Mena, O. Rodríguez</i>	19

Evolution rules of deterministic cellular automata for multichannel segmentation of brain tumors in MRI	25
<i>A. Rueda, R. Carmona, M. Martín, W. Torres</i>	
Unsupervised segmentation of multispectral images with cellular automata	31
<i>W. Torres, A. Rueda</i>	
Estimación del movimiento cardíaco mediante flujo óptico usando la norma L1 en un modelo poco denso	37
<i>E. Ibarra, R. Medina</i>	
MRI spatial distortion evaluation and assessment for stereotactic radiosurgery	43
<i>J. Mielgo, M. Martín, W. Torres</i>	
Software para el reconocimiento de patrones de trayectorias atípicas en videos de vigilancia. Caso de estudio: Universidad Nacional Experimental del Táchira	49
<i>G. Colmenares, D. Ramos, M. Molina</i>	
Segmentación de imágenes dermatoscópicas en el espacio CIELAB utilizando filtros morfológicos SML	55
<i>W. Torres, M. Martín, M. Torreyes, M. López</i>	
Tissue classification in oncological PET/CT images	61
<i>J. Aponte, D. Grande, W. Torres, M. Martín</i>	
Determinación por medio del procesamiento de imágenes y redes neuronales artificiales de la calidad del hierro reducido para fabricar briquetas	67
<i>J. Maldonado, E. Lobo, L. Cueto</i>	
Estadístico de separabilidad en segmentación de imágenes IVUS	73
<i>A. Cho</i>	

OPTIMIZACIÓN (OP)

Prediction of attenuation by rain in satellite links operating in the band KA for the climatic conditions of Venezuela	1
<i>M. Vásquez, N. Pérez</i>	
Resolución del problema de planificación de proyectos de software mediante búsqueda tabú y optimización por colonia de hormigas	7
<i>N. Ramírez, D. Nimo, J. Amaya, M. Bernal</i>	
Modelo espacio temporal lineal dinámico para estimar datos faltantes usando el algoritmo EM con el filtro de Kalman de ensamble suavizado en series de precipitación diaria	13
<i>L. Sánchez, S. Infante</i>	
Diseño de un controlador difuso óptimo mediante el método de patrón de búsqueda	19
<i>P. Tremante, E. Brea</i>	
Spatio-temporal dynamics of weighted coupled rotation maps reveals clusters and hierarchies in graphs	25
<i>A. Álvarez, J. Cabrera</i>	
Control por modo deslizante que se habitúa para la regulación de glucosa sanguínea en la UCI	31
<i>R. Rojas</i>	
Optimization of the response time in a multicast audio conference by using a genetic algorithm and concurrent programming	37
<i>C. Moreno, M. Álvarez</i>	

Uma metodologia computacional para o projeto de absorvedores dinâmicos de vibrações multimodais	43
<i>Y. Diaz, S. Cunha, R. Faria, E. García</i>	
Pruebas de verificación automática del hablante texto dependiente mediante <i>linear prediction coding</i> y redes neuronales artificiales	49
<i>J. Maldonado, L. Moret</i>	
Criterios de clasificación de datos usando programación matemática	55
<i>A. Cho, F. Cedeño, P. Chirivella, S. Flores</i>	

VARIOS (VA)

Modelo de predicción para la formación de atletas de las ligas menores de béisbol del Estado Táchira	1
<i>M. Molina, D. Medina, G. Delgado, G. Colmenares</i>	
Generación de actividades de mantenimiento en un central azucarero mediante la simulación computacional	7
<i>J. Colmenares, F. González, M. Torres, J. Ramírez</i>	
Modelos de conocimiento para predecir el comportamiento del colectivo de los planes de salud UNET, basados en los registros de siniestralidad	13
<i>M. Bernal, J. Bolívar, E. Darghan, D. Nimo</i>	
La hipertensión arterial en Venezuela y sus factores determinantes. Recomendaciones de políticas públicas y de gestión tecnológica	19
<i>R. Mijares, H. Herrera, E. Rincón, L. Azpúrua, Y. Rodríguez</i>	
Lecciones gerenciales y desarrollo de una metodología en la evaluación de la efectividad de la atención en un servicio de cardiología: estudio de caso en Caracas-Venezuela	25
<i>R. Mijares, E. Rincón, L. Azpúrua, R. Reyes</i>	
Método y resultados en la certificación de equipos médicos y paramédicos	31
<i>L. Lara, R. Silva, R. Mijares, L. Hernández, R. Lugo, Z. Sierra</i>	
Análisis de los requerimientos de interoperabilidad para la historia clínica electrónica de acuerdo al marco de interoperabilidad venezolano	37
<i>L. Hernández, R. Mijares</i>	
Modelado en espacio de estado de unidades de producción holónicas	45
<i>J. Cardillo, E. Chacón</i>	

LISTA DE AUTORES

ADVANCED COMPUTER METHODS IN ELECTROMAGNETIC PROBLEMS WITH APPLICATIONS TO GROUNDING ANALYSIS

M. Casteleiro

F. Navarrina

I. Colominas

J. París

X. Nogueira

casteleiro@udc.es

fermin.navarrina@udc.es

icolominas@udc.es

jparis@udc.es

xnogueira@udc.es

Group of Numerical Methods in Engineering (GMNI) - Dept. of Applied Mathematics School of Civil Engineering, University of A Coruña, Spain

Abstract. *In this paper we present TOTBEM: a freeware application for the in-house computer aided design and analysis of grounding grids. The system is based on a BEM formulation that has been presented by the authors in a number of publications. This CAE tool is suitable for computing the equivalent resistance and the step and touch voltage in most large electrical over-ground substations with a grounding grid embedded in a multiple-layer stratified soil model. The actual version of the software is available for testing purposes (and also for its technical use) at no cost and can be run on any basic personal computer (as of 2012) with no special requirements. The distribution kit consists of a single ISO bootable image file that can be freely downloaded from the Internet and copied into a DVD or a USB flash memory drive. The application runs on the Ubuntu 10.04 (Lucid Lynx) LTS release of Linux and can be easily started by just booting the system from the live DVD/USB that contains the downloaded file. This operation does not modify the native operative system nor installs any software in the computer, but the application is fully operational while the live DVD/USB is taking control. The core of the system is the BEM-based analysis code, which includes highly efficient integration and acceleration techniques proposed by the authors for reducing the computational cost and improving the rate of convergence of the series expansions involved in multiple-layer soil*

computations. The pre- and post-processing engines of the application have been built on top of the open source SALOME platform toolkit. The scope and power of the proposed approach are shown by solving some important application problems in Electrical Engineering, including the analysis of transferred potentials and compact underground substations.

Keywords: BEM numerical methods, Electrical installations, Grounding analysis, CAD.

1. INTRODUCTION

The main objective of an earthing system is to safeguard that persons staying in the surroundings of the installation will not be exposed to dangerous electrical shocks. As a second aim in importance, the system must guarantee the integrity of equipment and the continuity of power supply when a fault condition occurs. In order to achieve these goals, the equivalent resistance of the earthing system is required to be low enough to assure that any eventual fault current dissipation into the ground would take place mainly through the buried electrodes. At the same time, the maximum difference of potential between close points on the earth surface is required not to overpass certain thresholds in accordance to safety regulations [1-3].

The basic equations that govern the process can be written as

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}) &= 0, & \boldsymbol{\sigma} &= -\boldsymbol{\gamma} \operatorname{grad}(V) \text{ in } E, \\ \boldsymbol{\sigma}^t \boldsymbol{n} &= 0 \text{ in } S, & V &= \text{GPR} \text{ in } \Gamma, & V &\rightarrow 0 \text{ when } |\boldsymbol{x}| \rightarrow \infty, \end{aligned} \quad (1)$$

where E is the earth, $\boldsymbol{\gamma}$ is the soil conductivity tensor, S is the earth surface, \boldsymbol{n} is the normal exterior unit field to S , and Γ denotes the boundary (exterior surface in contact with the soil) of the buried electrodes [4-6]. The complete solution to problem (1) gives the values of current density $\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{x})$ and potential $V(\boldsymbol{x})$ at an arbitrary point \boldsymbol{x} within E when the earthing system is energized to the so-called Ground Potential Rise (GPR) with respect to remote earth. In these terms, the leakage current density $\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\xi})$ at an arbitrary point $\boldsymbol{\xi}$ on Γ , the ground current I (total surge current being leaked into the earth) and the equivalent resistance of the earthing system R , can be written as

$$\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\xi}) = \boldsymbol{\sigma}^t(\boldsymbol{\xi}) \boldsymbol{n}, \quad I = \iint_{\boldsymbol{\xi} \in \Gamma} \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\xi}) \cdot \boldsymbol{n} \, d\Gamma, \quad R = \frac{\text{GPR}}{I}, \quad (2)$$

where \boldsymbol{n} is the normal exterior unit field to Γ .

Obviously, there is not a general analytical solution to statement (1). For this reason, only very crude approximations were available until the 70's. On the other hand, the numerical solution to many practical problems of this kind can be obtained by means of the Finite Difference Method (FDM) or the Finite Element Method (FEM). Unfortunately, this is not true in our case. In most substation earthing systems, the buried active electrode (i.e. the grounding grid) is formed by interconnected bare cylindrical conductors whose diameter/length ratio is very small (≈ 0.001). Furthermore, E is a half-infinite domain and the electrode is excluded. Thus, the need to discretize the geometry of the problem leads to prohibitive computing requirements in most practical cases, what precludes the use of the above mentioned methods (as a general rule) in earthing analysis. In the absence of mathematically well-founded methods type FDM or FEM, several so-called computer methods [1-3,7] have been proposed through time in an attempt to get and approximate solution to problem (1). Although these techniques are widely used, some

important problems have been reported, namely: large computational requirements, unrealistic results when segmentation of conductors is increased, and uncertainty in the margin of error [1,5]. At this point, it should be mentioned that the complete solution to problem (1) is not actually needed in the context of earthing analysis, since all safety parameters that characterize the earthing system depend on the values of potential (\mathbf{x}) for \mathbf{x} on boundary S and on the values of leakage current $\sigma(\xi)$ for ξ on boundary Γ as in (2). For this reason, we turn our attention to the Boundary Element Method (BEM). A review on the history of this powerful numerical method can be found in [8-10]. In the last years, the authors have proposed a BEM-based numerical formulation for grounding analysis [4-6]. This is the core of the herein presented TOTBEM freeware application.

Finally, the selection of the appropriate soil model is an essential issue in grounding analysis. The simplest is the so-called “uniform soil model”, in which earth conductivity tensor $\boldsymbol{\gamma}$ is replaced by a constant scalar conductivity γ . On the other hand, if the soil is significantly stratified (either horizontally or vertically), a “layered soil model” could be the right choice [1,11,12]. In the following sections we will demonstrate the reliability, flexibility and scope of the proposed approach by solving some important problems of earthing analysis.

2. GROUNDING ANALYSIS FOR UNIFORM SOIL MODELS

The first example corresponds to the grounding analysis of the Barberá Substation (Barcelona, Spain) by means of a uniform soil model. Figure 1 shows the plan of the grounding grid. Table 1 summarizes the main characteristics of the earthing system, as well as the numerical model (408 linear boundary elements) being used and the numerical results that were obtained.

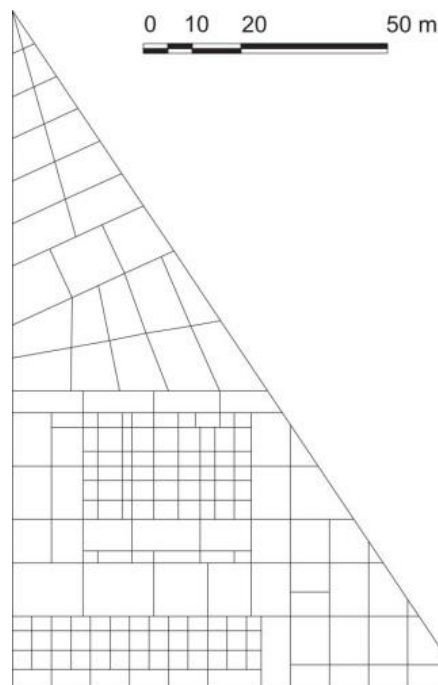


Figure 1: Barberá earthing system. Grid plan.

Table 1: Barberá. Input data and output results.

Data	
Number of electrodes:	408
Diameter of electrodes:	12.85 mm
Max./Min Electrode Length:	19m/3 m
Depth of the grid:	0.80 m
Max. dimensions of grid:	145 x 90 m ²
Total Protected surface:	6500 m ²
GPR:	10 kV
BEM Numerical Model	
Type of approach:	Galerkin
Type of 1D element:	Linear
Number of elements:	408
Degrees of freedom:	238
One layer soil model	
Earth resistivity:	50 Ωm
Fault Current:	38.12 kA
Equivalent resistance:	0.2623 Ω

Figure 2 shows the potential distribution on the earth surface when a fault condition occurs. Figure 3 displays the potential profile along a certain line (what is useful to obtain some characteristic parameters such as the step and the touch voltage). Figure 4 shows a 3D view of the potential distribution on the earth surface. For a detailed discussion see [4,5].

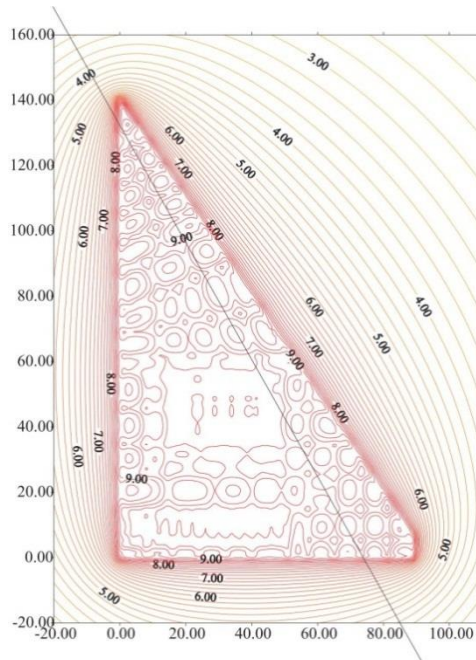


Figure 2: Barberá. Potential contours (kV) on the ground. Uniform soil model.

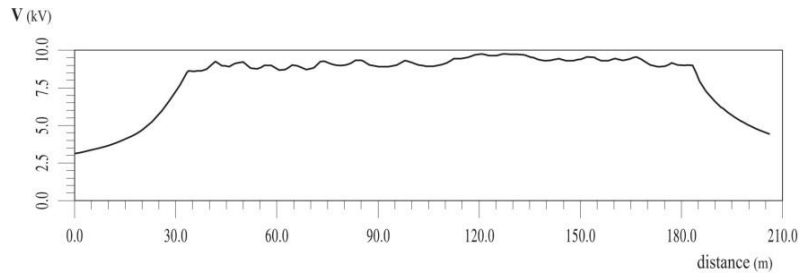


Figure 3: Barberá. Potential profile along line in figure 2. Uniform soil model.

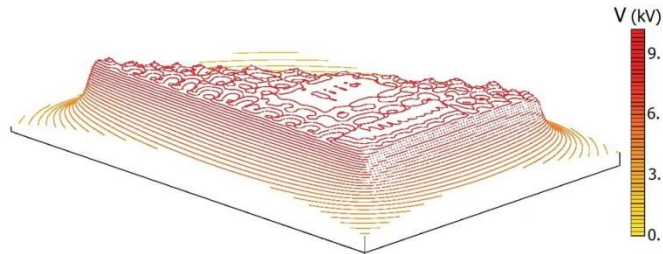


Figure 4: Barberá. 3D View of potential contours on the ground. Uniform soil model.

3. GROUNDING ANALYSIS FOR MULTIPLE-LAYERED SOIL MODELS

This second example corresponds to the grounding analysis of the Santiago II Substation (Santiago de Comp., Spain). In this example we compare the results obtained by means of a uniform soil model and a two layer soil model. Figure 5 shows the plan of the grounding grid. Table 2 summarizes the main characteristics of the earthing system, as well as the numerical model (582 linear boundary elements) being used and the numerical results that were obtained.

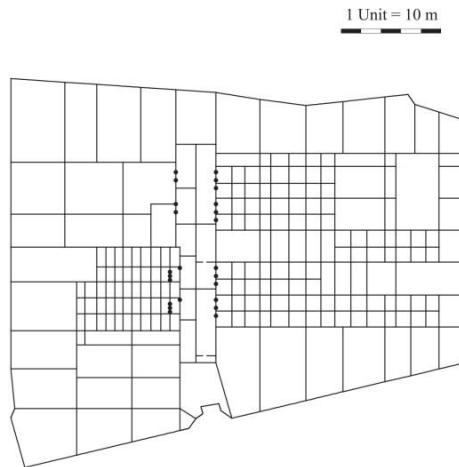


Figure 5: Santiago II earthing system. Grid plan.

Table 2: Santiago II. Input data and output results.

Data	
Number of electrodes:	534
Number of ground rods:	24
Diameter of electrodes:	11.28 mm
Diameter of ground rods:	15.00
Depth of the grid:	0.75 m
Length of ground rods:	4 m
Max. dimensions of grid:	230 x 195
	m ²
GPR:	10 kV
BEM Numerical Model	
Type of approach:	Galerkin
Type of 1D element:	Linear
Number of elements:	582
Degrees of freedom:	386
One layer soil model	
Earth resistivity:	60 Ωm
Total Current:	6.73 kA
Equivalent resistance:	0.149 Ω
Two layer soil model	
Upper layer resistivity:	200 Ωm
Lower layer resistivity:	60 Ωm
Thickness upper layer	1.2 m
Total current:	5.61 kA
Equivalent resistance:	0.178 Ω

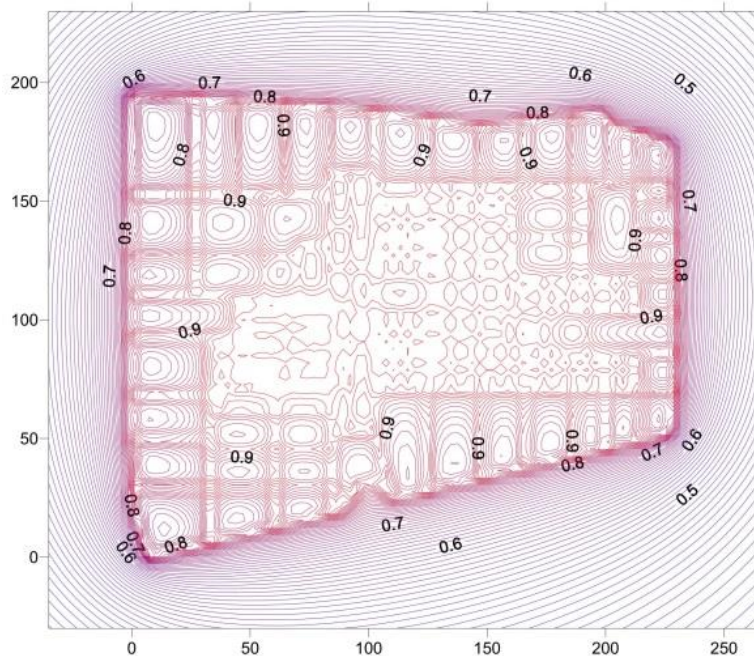


Figure 6: Santiago II. Potential contours ($\cdot 10$ kV) on the ground. Uniform soil model.

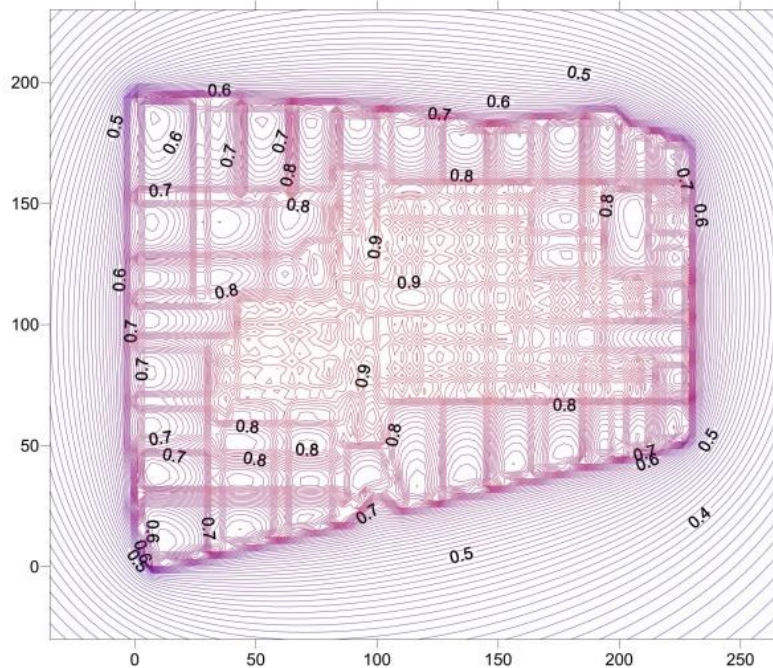


Figure 7: Santiago II. Potential contours ($\cdot 10$ kV) on the ground. Two-layer soil model.

Figure 6 shows the potential distribution on the earth surface for the uniform soil model. Figure 7 shows the potential distribution on the earth surface for the two-layer soil model. Figure 8 compares both potential distributions by means of a 3D visualization. It seems quite obvious that the results obtained by using a multiple-layer soil model are significantly different from those obtained by using a uniform soil model. Since security is our main concern, we conclude - as a general rule- that the use of multi-layer soil formulations is essential to obtain good results, in spite of their higher computational effort.

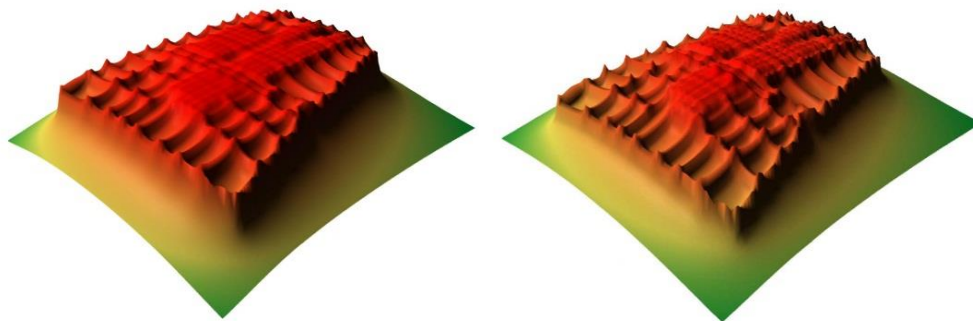


Figure 8: Santiago II grounding system. 3D views of the potential distribution on the ground for the uniform (left), and for the two-layer (right) soil models.

We also note that the analysis corresponding to the two-layer soil model in this example is particularly difficult, since part of the grid is buried in the upper layer while the other part is buried in the lower layer (notice that the ground rods are larger than the thickness of the upper layer). A comprehensive discussion of this case can be found in [12].

4. ANALYSIS OF TRANSFERRED EARTH POTENTIALS

The transferred earth potentials phenomenon occurs when a grounding grid is energized due to a fault condition, while a significant fraction of the GPR voltage is transported to a remote site by buried or half-buried passive conductors (communication or signal circuits, neutral wires, metal pipes, rails, metallic fences, etc.) that are not connected to the active earthing electrodes [13]. When this happens, a non-protected area could experience a sharp and unexpected ground potential rise in spite of being located quite far from the substation [2]. The danger that this possibility represents for the security of humans and for the integrity of equipment is evident. However, only very crude approximations were available for the computation of these effects until the authors proposed an extension of their BEM formulation to solve this kind of problems for both, uniform soil models [14] and multiple-layer models [15].

To demonstrate the importance of this issue, a new analysis of the Barberá Substation is presented. In this occasion, we will introduce a fictitious nearby railroad track. Figure 9 shows the plan of the grounding grid and the situation of the railroad track. The presence of this kind of passive conductors is not rare in real cases, since they may be necessary to move high-power transformers and other heavy devices. Table 3 summarizes the main characteristics of the earthing system, as well as the numerical model (408 linear boundary elements) being used and the numerical results that were obtained. Figure 10 shows the potential distribution on the earth surface when a fault condition occurs. Figure 11 shows a 3D view of the potential distribution on the earth surface. The effect of the transferred earth potentials phenomenon in the potential distribution on the earth surface is evident if we compare these results with those presented in section 2. For a detailed discussion on these issues see [14,15].

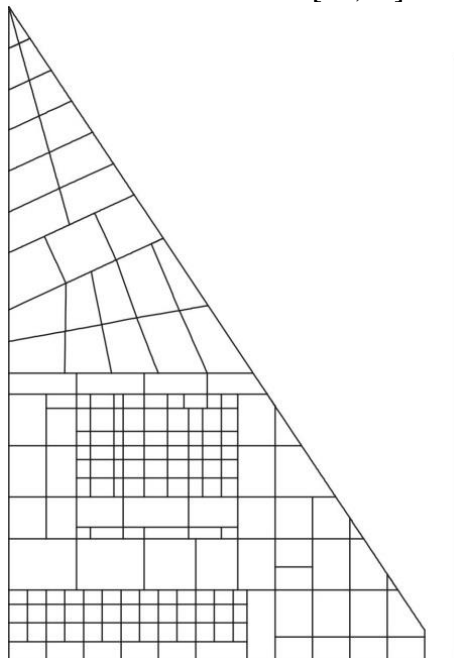


Figure 9: Barberá grounding system with a railroad track. Grid plan and track situation.

Table 3: Barberá with a railroad track. Input data and output results.

Data	
Number of electrodes:	408
Diameter of electrodes:	12.85 mm
Depth of the grid:	0.80 m
Max. dimensions of grid:	140 x 90 m ²
Total Protected surface:	6500 m ²
GPR:	10 kV
Railway Tracks: Characteristics	
Number of tracks:	2
Length of the tracks:	130 m
Distance between the tracks:	1668 mm
Diameter of the tracks:	94 mm
Depth:	0.10 m
BEM Numerical Model	
Type of approach:	Galerkin
Type of 1D element:	Linear
Number of elements:	408
Degrees of freedom:	260
One layer soil model	
Earth resistivity:	50 Ωm
Fault Current:	38.28 kA
Equivalent resistance:	0.149 Ω
Ratio of Transferred Potentials	
λ :	42.33%



Figure 10: Barberá with a railroad track. Potential contours ($\cdot 10$ kV) on the ground.

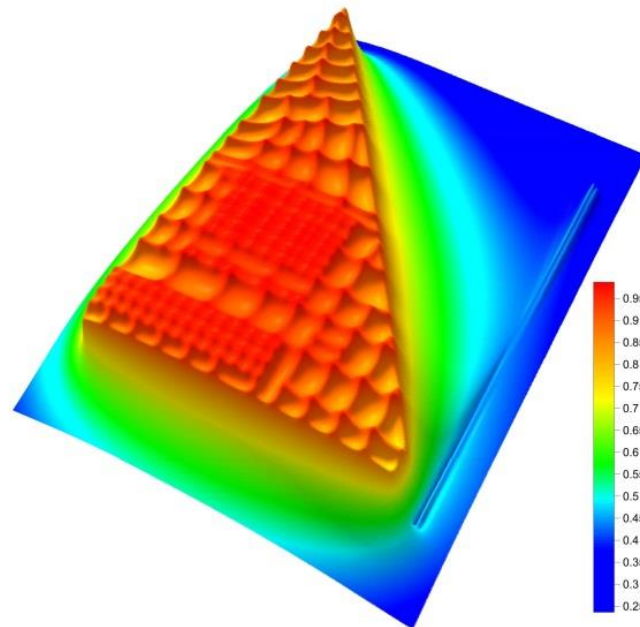


Figure 11: Barberá with a railroad track. 3D view of potential distribution on the ground.

5. TOTBEM: AN OPEN-SOURCE CAD-CAE SYSTEM FOR GROUNDING ANALYSIS

The proposed BEM-based numerical formulation for uniform and multiple-layer soil models has been implemented in a freeware application for the in-house computer aided design and analysis of grounding grids [16]. The actual version of the software (TOTBEM) is available for testing purposes (and for its technical use) at no cost and can be run on any basic personal computer (as of 2012) with no special requirements. The package provides fully operational pre-processing, analysis and post processing tools. The distribution kit consists of a single ISO bootable image file that can be freely downloaded from the Internet and copied into a DVD or a USB flash memory drive.

The application runs on the Ubuntu 10.04 (Lucid Lynx) LTS release of Linux and can be easily started by just booting the system from the live DVD/USB that contains the downloaded file. This operation does not modify the native operative system nor installs any software in the computer, but the application is still fully operational while the live DVD/USB is taking control.

The kernel of the system is the BEM-based analysis code, which includes highly efficient acceleration techniques proposed by the authors [17] for improving the rate of convergence of the series expansions that are involved in multiple-layer soil computations. The pre- and post-processing engines of the application have been built on top of the open source SALOME platform toolkit [16].

Figure 12 shows the input data toolbox of the TOTBEM pre-processor in action. Figure 13 shows the TOTBEM post-processor displaying a 3D visualization of the potential distribution on the ground for the earthing analysis being executed.

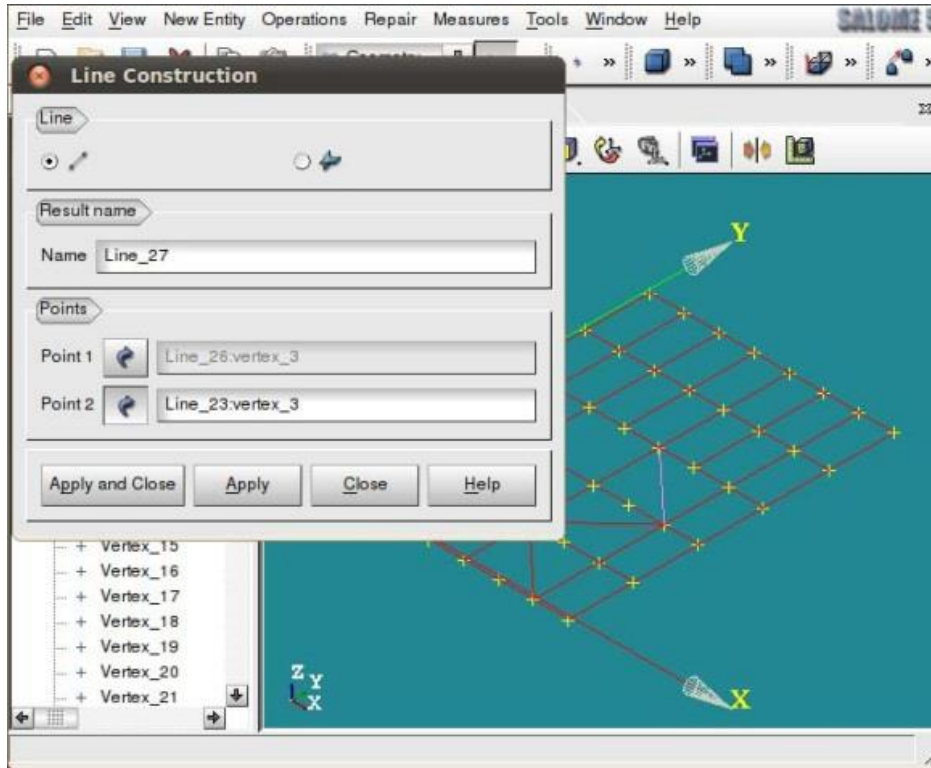


Figure 12: TOTBEM pre-processor. Input data toolbox.

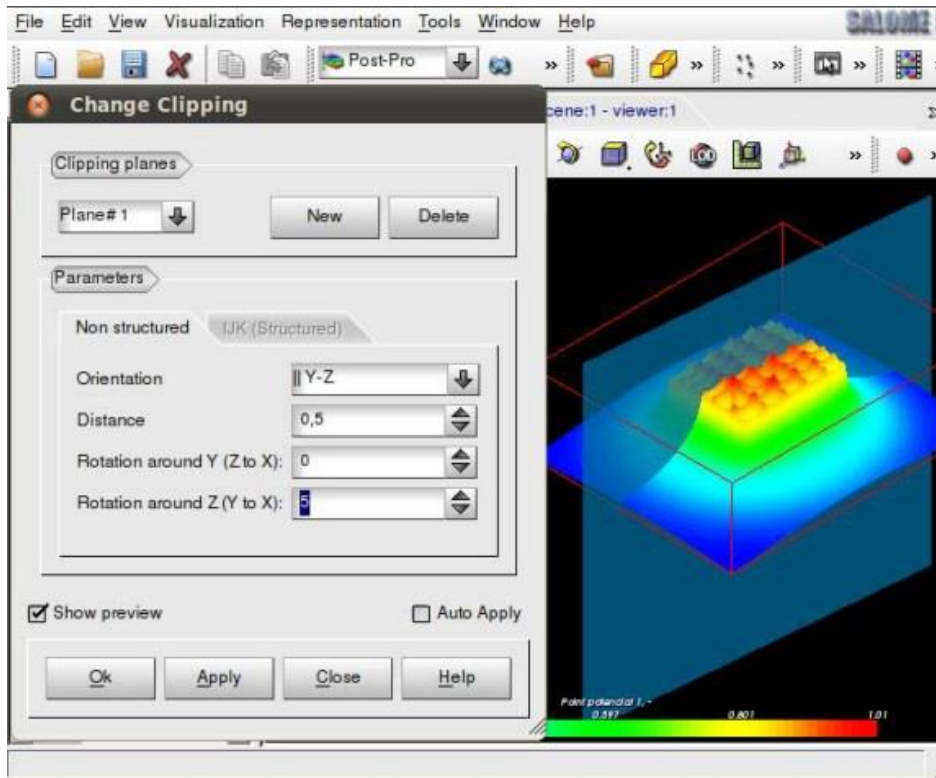


Figure 13: TOTBEM post-processor. 3D view of potential distribution on the ground.

6. ANALYSIS OF COMPACT UNDERGROUND SUBSTATIONS

The research presented in the previous sections is restricted to the case in which the soil can be considered either uniform or stratified in multiple layers, being its resistivity an order of magnitude higher than the resistivity of the grounding electrode itself. Assuming that the soil is normally regularized before installing the earthing grid, and that the ground surface is leveled right after (prior to assembling the equipment and bringing it into service), the proposed approach is suitable for computing the equivalent resistance and the step and touch voltage in most large electrical over-ground facilities. This important category includes all step-up and step-down transmission substations, as well as a number of distribution substations indeed. Nevertheless, the current trend in Electric Power Engineering moves in another direction, due to the growing preference for smaller underground substations. This pushes the need for developing new earthing analysis techniques that could be applied to facilities of this kind.

Compact underground substations are very common at present in urban environments where the space is limited. In this case, the substation is located inside a monoblock concrete structure (containing the transformers, the switches and the rest of the equipment). The whole set is buried under the pavement. Figure 14 shows the scheme of one of these substations (with dimensions $l \times w \times h = 6.30 \times 3.00 \times 2.80 \text{ m}^3$). The main grounding electrode is a quadrilateral ring located at 0.8 m of the concrete block itself, buried to 0.5 m depth and supplemented by a 4 m long vertical rod at each vertex. The diameter of the electrodes in the ring is 11.28 mm and the diameter of each vertical rod is 15.00 mm. The resistivity of the soil is $50 \Omega \text{ m}$ and the GPR is 10 kV in the case being considered. On the other hand, the steel framework within the reinforced concrete structure will act as an active electrode of the earthing system, if it is grounded. Otherwise, it will act as a passive electrode (see Section 4).

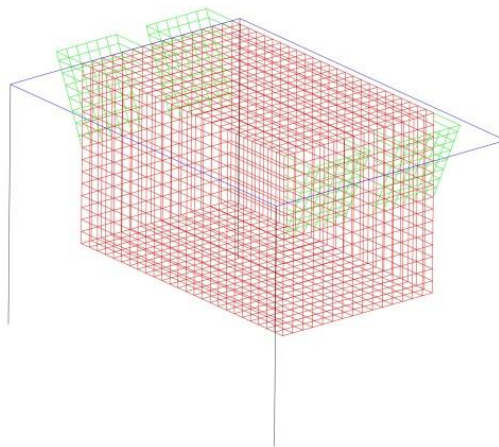


Figure 14: Compact underground substation. Monoblock structure and grounding electrode.

It seems obvious that neither the uniform nor the multiple-layer soil concepts fit well to this case, since there are finite regions with different resistivities embedded into the soil (i.e., the concrete structure and the working space inside). Similar considerations can be made when a chemical treatment has been applied to part of the soil, when there are concrete foundations in the site or swimming pools, soil depressions, lakes, hydroelectric dams, etc. in the vicinity. In spite of the interest for using this kind of soil models, the corresponding BEM formulation is much more

complicated [18,19] and the technology is not yet ready to be used for solving practical problems. The authors are working at present in an approximate formulation that takes into account the specifics of this type of compact underground substations. Figure 15 shows the potential distribution on the earth surface obtained by means of this new approach. More details will be given in forthcoming papers.

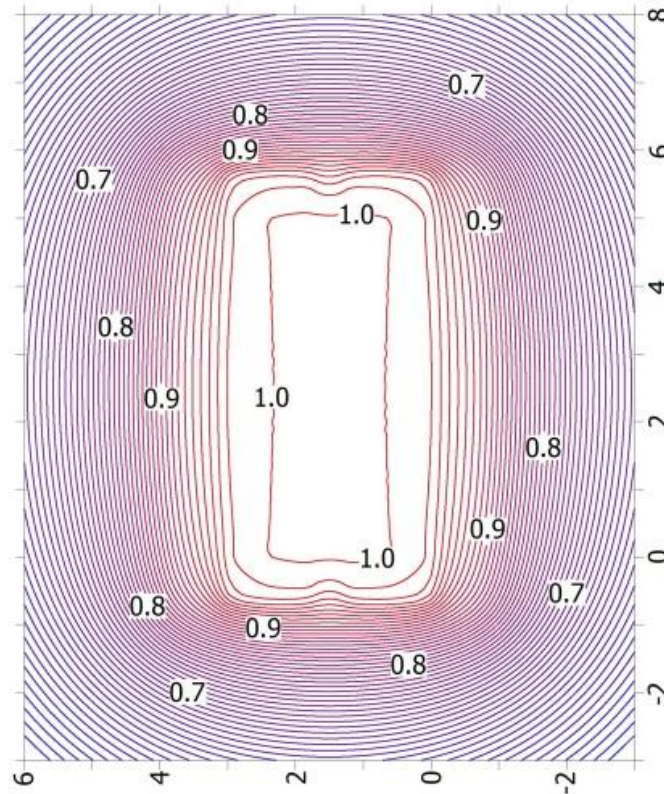


Figure 15: Compact underground substation. Potential contours ($\cdot 10$ kV) on

7. CONCLUSIONS

In this paper we have presented TOTBEM: a freeware, user-friendly, CAE simulation tool for the earthing analysis of large electrical over-ground facilities. The kernel of the application is a powerful and efficient grounding analysis module. This module implements a complete and well founded BEM numerical approach that has been previously proposed by the authors. The pre- and post-processing engines of the application have been built on top of the open source SALOME platform toolkit. The scope, flexibility and power of the proposed approach have been demonstrated by solving some important application problems in Electrical Engineering.

Acknowledgements

This work has been partially supported by the *Ministerio de Educación y Ciencia* of the Spanish Government (grants #DPI2009-14546-C02-01 and #DPI2010-16496), and by R&D projects of the *Xunta de Galicia* (grants #CN2011/002, #PGDIT09MDS00718PR and #PGDIT09 REM005118PR). This research has also been co-financed with European FEDER funds.

REFERENCES

- [1]. IEEE Std. 80, *IEEE Guide for safety in AC substation grounding*, New York, 2000.
- [2]. IEEE Std. 142, *IEEE Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems*, New York, 2007.
- [3]. Sverak, J. G., Progress in step and touch voltage equations of ANSI/IEEE Std 80. Historical perspective, *IEEE Trans. Power Del.*, **13**, (3), pp. 762-767, July 1998.
- [4]. Colominas, I., Navarrina, F. and Casteleiro, M., A boundary element formulation for the substation grounding design, *Advances in Engineering Software*, **30**, pp. 693-700, 1999.
- [5]. Colominas, I., Navarrina, F. and Casteleiro, M., A boundary element numerical approach for grounding grid computation, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, **174**, pp. 73-90, 1999.
- [6]. Navarrina, F., Colominas, I., and Casteleiro, M., Why do computer methods for grounding analysis produce anomalous results?, *IEEE Trans. Power Del.*, **18**, (4), 1192-1202, Oct. 2003.
- [7]. Garrett, D. L. and Pruitt, J. G., Problems encountered with the average potential method of analyzing substation grounding systems, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, **104**, (12), pp. 3586-3596, Dec. 1985.
- [8]. Cheng, A.H.-D. and Cheng, D.T., Heritage and early history of the Boundary Element Method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **29**, pp. 268-302, 2005.
- [9]. Alarcón, E., Brebbia, C. and Domínguez, J., The Boundary Element Method in Elasticity, *Int. J. Mech. Sci.*, March 1978.
- [10]. Alarcón, E., París, F. and Martin, A., Boundary Elements in Potential and Elasticity Theory, *Computer & Structures*, **10**, pp. 351-362, 1979.
- [11]. Colominas, I., Gómez-Calviño, J., Navarrina, F. and Casteleiro, M., Computer analysis of earthing systems in horizontally and vertically layered soils, *Elect. Power Syst. Res.*, **59**, pp. 149-156, 2001.
- [12]. Colominas, I., Navarrina, F. and Casteleiro, M., A numerical formulation for grounding analysis in stratified soils, *IEEE Trans. Power Del.*, **17**, (2), pp. 587-595, Apr. 2002.
- [13]. Nichols N., Shipp D.D., Designing to avoid hazardous transferred earth potentials, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **1A-18**, pp. 340-347, July 1982.
- [14]. Colominas, I., Navarrina, F. and Casteleiro, M., Analysis of transferred earth potentials in grounding systems: A BEM numerical approach, *IEEE Trans. Power Del.*, **20**, (1), pp. 339-345, Jan. 2005.
- [15]. Colominas, I., Navarrina, F. and Casteleiro, M., Numerical Simulation of Transferred Potentials in Earthing Grids Considering Layered Soil Models, *IEEE Trans. Power Del.*, **22**, (3), pp. 1514-1522, July 2007
- [16]. París, J., Colominas, I., Nogueira, X., Navarrina, F. and Casteleiro, M., Numerical simulation of multilayer grounding grids in a user-friendly open-source CAD interface, *Proceedings of the ICETCE-2012*, IEEE Pub., New York, 2012.
- [17]. Colominas, I., París, J., Navarrina, F., and Casteleiro, M., Improvement of the computer methods for grounding analysis in layered soils by using high-efficient convergence acceleration techniques, *Adv. Engrg. Soft.*, **44**, pp. 80-91, 2012.
- [18]. J. Ma and F.P. Dawalibi, Analysis of grounding systems in soils with finite volumes of different resistivities, *IEEE Trans. Power Del.*, **17**, pp. 596-602, Apr. 2002.
- [19]. Colominas, I., París, J., Nogueira, X., Navarrina, F. and Casteleiro, M., Grounding Analysis in Heterogeneous Soil Models: Application to Underground Substations, *Proceedings of the ICETCE-2012*, IEEE Pub., New York, 2012.

EFFECTIVE PERMEABILITY OF CARBONATE RESERVOIRS USING THE RANDOM FINITE ELEMENT METHOD

D.V. Griffiths

d.v.griffiths@mines.edu

Colorado School of Mines, Golden, CO, USA
University of Newcastle, NSW, Australia

Jumpol Paiboon

jpaiboon@mines.edu

Colorado School of Mines, Golden, CO, USA

Jinsong Huang

Jinsong.Huang@newcastle.edu.au

University of Newcastle, NSW, Australia

Gordon A. Fenton

Gordon.Fenton@Dal.Ca

Dalhousie University, Halifax, NS, Canada

Abstract. *The purpose of the study is to investigate the influence of porosity and void size on the effective permeability of carbonate reservoirs. A random finite element method (RFEM) has been developed involving an ideal block of material leading to direct evaluation of the effective permeability. The approach involves a combination of finite element analysis and random field theory. Following Monte-Carlo simulations, the mean and standard deviation of the effective permeability can be estimated leading to probabilistic conclusions about flow characteristics. The influence of block size and representative volume elements (RVE) are also discussed and a comparison is made between the effective permeability of isotropic and anisotropic reservoirs.*

Keywords: Random finite element method (RFEM), Representative volume element (RVE), Effective permeability, Homogenization

1. INTRODUCTION

Over millions of years, various kinds of microscopic creatures have died, piled up at the bottom of the sea and become part of the sediment that eventually turns into shale. The heat from deep inside the earth then turns their bodies into hydrocarbons, i.e. oil and natural gas. With the intense pressure of the earth, the oil and gas are squeezed out of the shale and gather together and

may literally drift. Finally, they may become trapped in rock such as sandstone or limestone. Limestone is a kind of sedimentary rock, derived from the composition of plants and animals that secrete calcium to form their skeletons; thus limestone is a type of rock made up mainly of calcium carbonate. Limestone is a rock that has a large economic value; for example, it is used as gravel for construction. More importantly, it is a reservoir of petroleum. One-third to half of the amount of oil comes from these limestone and dolomite. Despite the hard and solid macroscopic appearance of sandstone or limestone, it is in fact porous, hence, trapping fluids such as oil or natural gas.

Porosity and permeability are properties of any rock or loose sediment. Porosity is a normalized measure of the volume of void spaces where the oil or gas may be held; thus the rock's ability to hold a fluid. Permeability is a characteristic that determines the ease with which oil and gas can flow through the rock. The permeability of a rock refers to the rock's resistance to fluid flow. A rock is said to have "low permeability" when it is harder for fluid to pass through it. If fluid passes through the rock easily, it is said that the rock has "high permeability". The movement of petroleum is similar to the movement of groundwater. In the form of crude oil and/or natural gas, petroleum moves through the spaces within the rock and gathers in region with higher porosity. Since natural gas and oil are lighter than water, they separate themselves from water, then rise and accumulate above the water. The movement of the gas and oil stops when the gas and oil reach a non-permeable layer. Thus, porosity and permeability are absolutely necessary for good-quality production of oil or gas.

Even if the expected porosity of the site can be conservatively estimated, void locations may be unknown. In addition, two sites with the same porosity may have quite different void sizes, where one has numerous small voids and the other fewer large voids. To facilitate the modeling of boundary value problems, the goal of this work is to determine the effective properties of such materials. In this paper the property of interest is the permeability and the effective properties are defined as those properties that would have led to the same response if the material had been homogeneous. The behavior of a heterogeneous material with a micro-structure, consisting of varying properties, has been studied by a number of investigators using experimental, analytical and numerical methods. The macro-scale of a homogeneous material, which has a heterogeneous micro-structure on the micro-scale level, is investigated in order to address the issue of how the microstructure affects the material on the macro-scale. The goal of homogenization is to obtain the overall (effective or equivalent) properties to represent the macro-scale properties. An important objective of micro-mechanics is to link mechanical relations going from finer to coarser length scales. A useful concept in this homogenization process is the representative volume element or RVE. An RVE is an element of the heterogeneous material that is large enough to capture the effective properties in a reproducible way. From an efficient modeling point of view, the smallest RVE that can achieve this is of particular interest (e.g. Liu 2005).

Homogenization approaches based on theoretical and numerical methods have been developed for assessing RVE size. Several reviews have been proposed for describing different homogenization approaches (e.g., Klusemann and Svendsen, 2009; Mercier et al., 2012). Bourgeat (1984) considered the behavior of two-phase flow in a periodically fractured porous medium. Saez et al. (1989) proposed macroscopic equations to the processes of one and two phase flow through heterogeneous porous media. The Self-Consistent approach (Pozdniakov and Tsang, 2004) involved estimating the effective hydraulic conductivity of a heterogeneous medium and was applied to a fractured porous material. Moreover, there have been several theoretical approaches developed to assess effective permeability (e.g., Hashin and Shtrikman, 1963; Ostojic-Starzewski et al., 2007; Pouya and Vu, 2012).

Numerical methods of homogenization have been used to validate some of the theoretical approaches. Holden and Lia (1992), for example, proposed an estimator for an effective permeability tensor based on a one-phase incompressible flow. The estimator worked for all kinds of heterogeneous reservoirs. Waki et al. (2005) considered the magnetic interaction between inclusions to estimate the effective permeability of magnetic composite materials. Held et al. (2005) presented numerical results of the effective flow and transport parameters in heterogeneous formations. Szymkiewicz (2005) presented an approach to calculate the effective conductivity of a heterogeneous soil for periodic media with inclusions of various shapes. Muc and Barski (2008) presented an introduction on the prediction of the effective permeability. Popov et al. (2008) applied the Stokes-Brinkman equation as a fine-scale model for flow in vuggy, fractured karst reservoirs. Barski and Muc (2011) considered the possibility of theoretical predictions of effective properties in 2D and 3D. Some of these numerical methods of homogenization were compared with the theoretical results.

Several different approaches have been used in the past for studying the porosity-permeability relationships in various reservoir rocks. The porosity and pore size distribution are both important factors in determining fluid flow characteristics through porous media (Kate and Gokhale, 2006) and there are various approaches for estimating pore size distribution. For example, Jiru et al. (2010) considered the pore size distribution of rocks and soils with a scanning electron microscope and Abedini et al. (2011) proposed a statistical approach to the pore size distribution with reservoir rock. The Lattice Boltzmann method (LBM) is a versatile method for simulating flow in porous media. Direct LB simulation on micro scale 3D image data offers a potential for understanding fluid flow processes in a material with complex microstructure (e.g. White et al. 2006). Ramtad et al. (2011) recently proposed a study of relative permeability functions derived from two-phase Lattice Boltzmann simulations on X-ray microtomography pore space images of sandstone. Many theoretical and numerical studies of the LBM are becoming an accepted approach in the fluid flow of porous material. (e.g., Bosl et al., 1998; Guo and Zhao, 2002; Zhang, 2011 and Grucelski and Pozorsky, 2012). Nuclear Magnetic Resonance (NMR) imaging is an advanced approach to imaging pore space in a saturated rock with a nuclear magnetic moment. A limitation of the NMR is that if the porosity is not very large, the amount of water present in a saturated porous rock is small, which results in weak signal intensity. (Edie et al., 2000-11). Hidajat et al. (2001) considered the permeability of spatially correlated porous media computed by the LBM and the formation factors of generated porous media is solved by Laplace's equation. There are studies relating to the characterization of fluid flow in porous media by NMR approaches. (e.g., Liaw et al., 1996; Kimmich, 2001; Sørland et al. 2007; Jin et al. 2009). The X-ray computed tomography (Micro-CT) creates a representation of rock microstructure. The approach involves three main processes; 3D imaging at the required resolution, segmentation of the 3D imaging and computer simulations of fluid flow for permeability (Sharp et al., 2009). The Micro-CT has become an important technique for characterizing porous materials. (See also Zhang et al. 2009; Kalem, 2012).

Although there have been many theoretical and numerical approaches, the results are rather unsatisfactory because of the uncertainties in the characterization of the geometry changing from place to place, horizontally and vertically. The RFEM is an alternative approach for modeling the influence of inclusions and voids in geomaterials. The method can be used to estimate the effective properties of materials with randomly distributed voids. The RFEM, first developed by Griffiths and Fenton (1993) and Fenton and Griffiths (1993), has been applied in numerous studies of geotechnical engineering (e.g. Griffiths and Fenton 2007, Fenton and Griffiths 2008). In this research, conventional finite element analysis (e.g. Smith et al. 2014) was combined with

random field generation (e.g. Fenton and Vanmarcke 1990, Fenton and Griffiths 2008) and Monte-Carlo simulations to develop output statistics of quantities such as effective permeability. Through control of the spatial correlation length, both the volume and size of voids could be considered by the RFEM. Paiboon et al. (2013) recently proposed the RFEM in the homogenization of geomaterials containing random voids. The first part of the work investigates the statistics of the effective permeability in 3D as a function of porosity and void size, and compares the results with other investigators. Effective permeability with an anisotropic void structure is also considered. The second part of the work investigates the size of the RVE for different input void properties. Of particular interest here is the number of Monte-Carlo simulations needed for stable results as a function of the size of the RVE under consideration.

2. FINITE ELEMENT MODEL

The random finite element method (RFEM) combines finite element methods and random field theory. In this work, finite element analysis of a 3D cube of elastic material using 8 node hexahedron elements is combined with random field generation and Monte-Carlo simulations to model a porous material containing voids. The goal is to develop output statistics of the effective permeability for different void sizes and porosity. Examples of the model are shown in Figure 1.

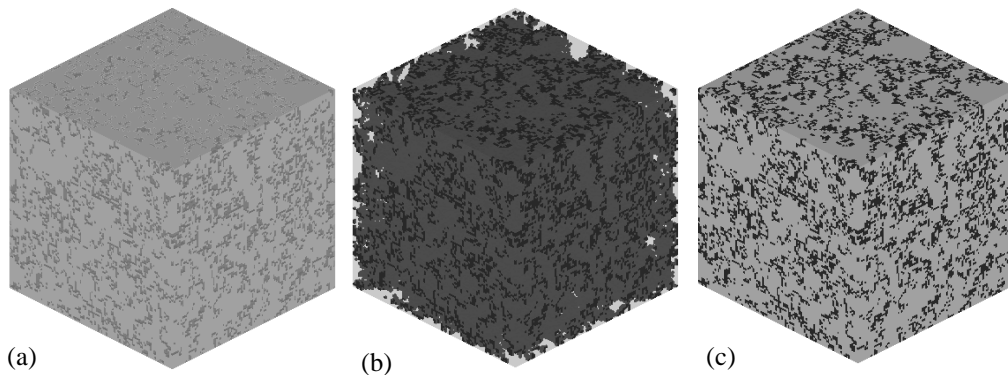


Figure 1 The 3D finite element model of ideal cubic blocks with mesh $100 \times 100 \times 100$: (a) the material, (b) the voids, and (c) the combined model which show dark and light regions indicating voids and material respectively

The finite element mesh for this study consists of a cubic block of material of side length $L=1$ modeled by $100 \times 100 \times 100$ 8-node cubic elements of side length $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.01$. Any consistent system of units could be combined with the dimensions and properties described in this work. Each node has one degree of freedom (the fluid potential at that position). A constant fixed potential of one and zero are fixed on the back right and front left faces respectively. All other faces are considered impermeable. No internal sources or sinks are considered. Figure 2 shows a cubic element test of the permeability block model with random voids. The finite element method can then solve the equation to obtain the fluid potentials across the ideal permeability block. Because a mesh such as this involves rather large global matrices, the equation solution in the runs described in this work will be performed using a preconditioned conjugate gradient (PCG) technique with element-by-element products as described by Smith et

al. (2014) which avoids entirely the need to assemble the global permeability matrix. Once the flow rates Q has been calculated, the effective permeability K , is given by

$$K = \left(\frac{Y_L}{X_L Z_L} \right) \left(\frac{Q}{H} \right) \quad (1)$$

where H is the head difference between the upstream and downstream faces ($=1$), and X_L , Y_L and Z_L are the side lengths of the permeability block (all $=1$).

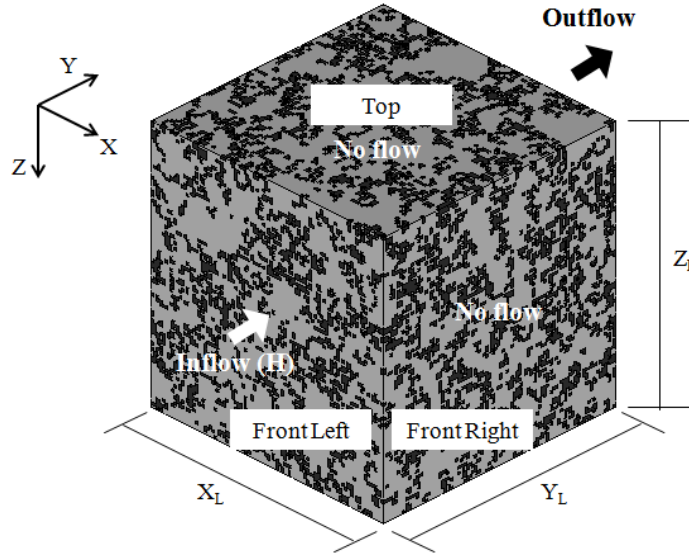


Figure 2 A “cubic element test” of the permeability block model with random voids portrayed by the dark and grey elements represent, respectively, voids and intact permeability material. A constant head difference ($H = 1$) is applied to the back right and front left boundary. The top, bottom, front right and back left boundaries are impermeable.

3 CONTROLLING THE VOID SIZE

The random field generator in the RFEM model known as the Local Average Subdivision method (LAS) (Fenton and Vanmarcke 1990) is used to model spatially varying void properties. The targeted mean of porosity n is based on the standard normal distribution shown in Figure 3, and the spatial correlation length θ is used to control the void size. A single value of the random variable Z is initially assigned to each element of the finite element mesh. Once the standard normal random field values have been assigned to the mesh, cumulative distribution tables (suitably digitized in the software) are then used to estimate the value of the standard normal variable $z_{n/2}$, for which

$$\Phi(z_{n/2}) - \Phi(z_{-n/2}) = n \quad (2)$$

where Φ is the cumulative normal distribution function, and n is the target porosity.

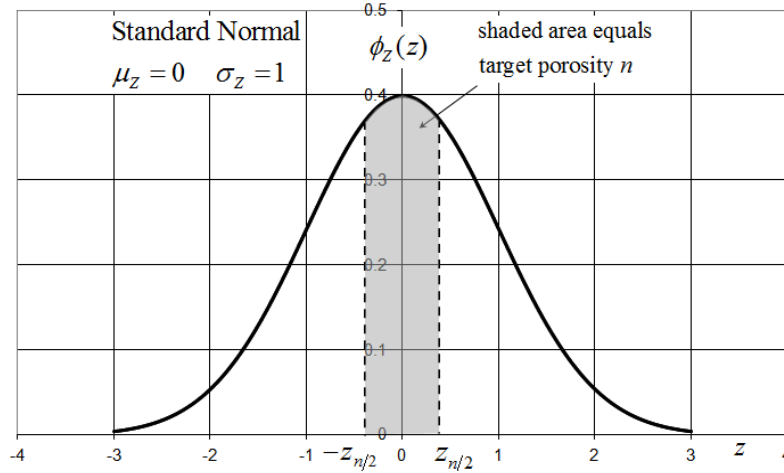


Figure 3 Target porosity area in 3D standard normal distribution of random field

Thereafter, any element assigned a random field value in the range $|Z| > z_{n/2}$ is treated as intact material with a permeability given by K_0 , whereas any element where $|Z| \leq z_{n/2}$ (shaded area in Figure 3) is treated as a void element with an assigned permeability of $K'_0 = 100$ (100 times larger than the surrounding intact material). The void size in this study is controlled by the random field spatial correlation length θ which incorporates a “Markov” spatial correlation structure as follows

$$\rho(\tau) = \exp(-2|\tau|/\theta) \quad (3)$$

where ρ = the correlation coefficient; $|\tau|$ = absolute distance between points in the field; and θ = scale of fluctuation or spatial correlation length. Larger values of θ will lead to larger voids and vice versa.

The Markov equation delivers a spatial correlation that reduces exponentially with distance. For example, according to Equation 3, $\tau < \theta$, the correlation coefficient $\rho > 0.13$. In the current study, ρ varies from 0 to 1. Points close together are strongly correlated and therefore likely to belong to the same void. In the limiting case of $\theta \rightarrow 0$, the random field value changes rapidly from point to point, delivering numerous small voids. At the other extreme as $\theta \rightarrow \infty$, the random field value on each simulation becomes increasingly uniform, with some simulations representing entirely intact material and other consisting entirely of voids. For example as shown in Figure 5, the models show typical simulations of different void clustering for two materials with the same mean porosity. In this study, the spatial correlation length is expressed in dimensionless form.

$$\Theta = \frac{\theta}{L} \quad (4)$$

where L is the side length of the permeability block ($L = 1$)

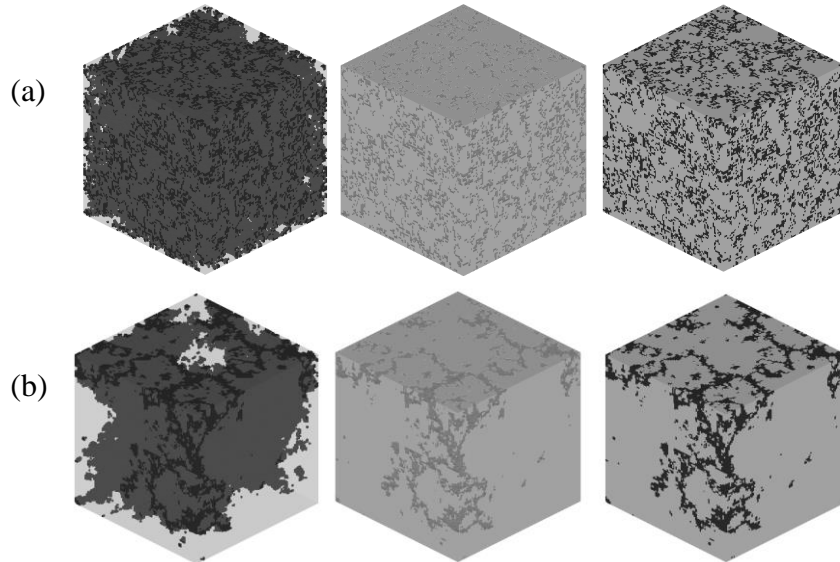


Figure 5 Typical simulations showing generation of voids at low (a) and high (b) spatial correlation lengths θ (mesh $100 \times 100 \times 100$ and $n = 0.2$ in both cases)

4 MONTE-CARLO SIMULATIONS

A “Monte-Carlo” process is combined with the RFEM and repeated until stable output statistics are achieved. The primary outputs from each analysis is the total flow rate Q . Although each simulation uses the same Θ and n , the spatial location of the voids will be different in each simulation. Thus, in some cases, the voids may include few large volume voids, while the others could include many frequent smaller volume voids. Following each simulation, the computed flow rate Q is converted into “effective” values of permeability as shown in Equation 1. Each effective permeability value is then normalized as K / K_0 by dividing by the permeability of material K_0 . In the current study, following some numerical experiments, as shown in Figure 6, it was decided that 1000 simulations for each parametric combination would deliver reasonably repeatable results.

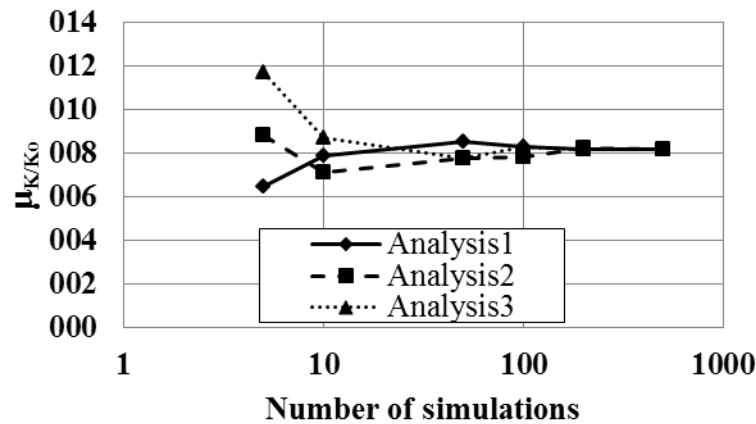


Figure 6 Sensitivity of the mean effective permeability as a function of the number of simulations for $n = 0.2$ and $\Theta = 1.0$

5 RESULTS OF RFEM

Following each set of 1000 Monte-Carlo simulations, the mean and standard deviation of the normalized effective permeability were computed for a range of parametric variations of n and Θ , with results shown in Figures 7 and 8, respectively.

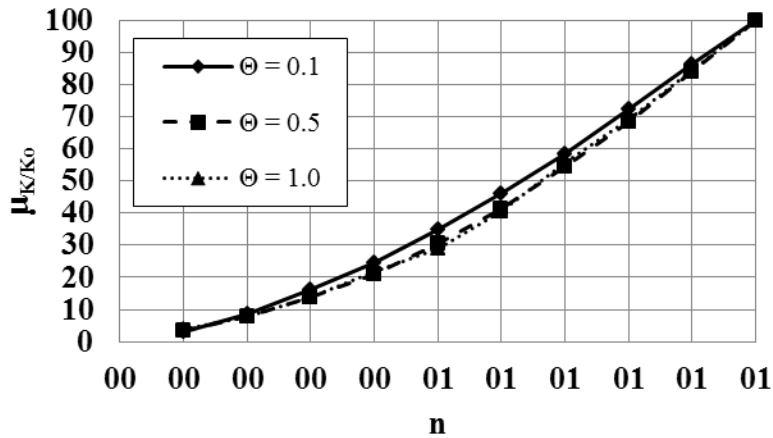


Figure 7 μ_{K/K_0} vs. n for $\Theta = 0.1, 0.5$ and 1.0

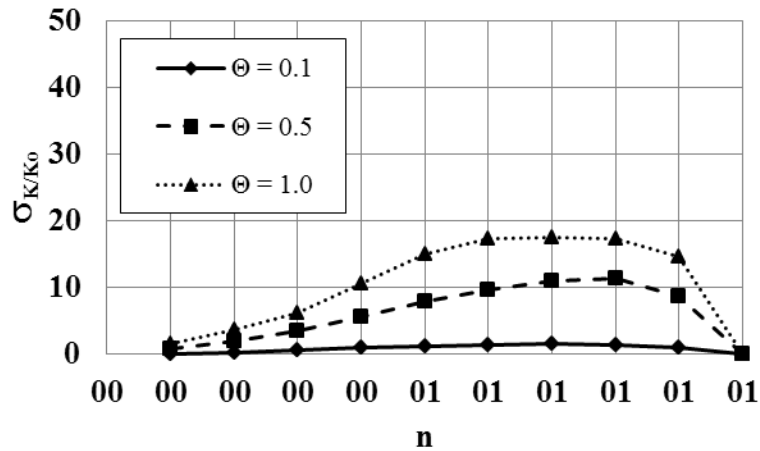


Figure 8 σ_{K/K_0} vs. n for $\Theta = 0.1, 0.5$ and 1.0

It can be noted from Figure 7 that the mean normalized effective permeability increases towards one hundred with increasing porosity n and that Θ does not have much influence. Figure 8 shows that Θ has more influence on the standard deviation of the effective permeability σ_{K/K_0} . The standard deviation values as $n \rightarrow 0$ (intact permeability material) and $n \rightarrow 1$ (void material) show very low variance since almost all simulations are the same and model essentially uniform material. The standard deviation was observed to reach a maximum value at around $n \approx 0.7$.

6 REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENT (RVE)

An RVE is an element of the heterogeneous material is large enough to represent the microstructure but small enough to achieve efficient computational modeling. The RVE study considered four cases as shown in the results of Figure 10. Figure 9 shows a sequence of five blocks contained within and including the largest block of dimensions $1.0 \times 1.0 \times 1.0$. The different block sizes will indicate the optimal RVE for the given input conditions. When the RVE is “big enough”, it was expected that the standard deviation of the effective permeability would be reduced and its mean essentially constant, as shown in Figures 10(a) and 10(b). The statistical results of each set of Monte-Carlo simulations are shown in Figure 9

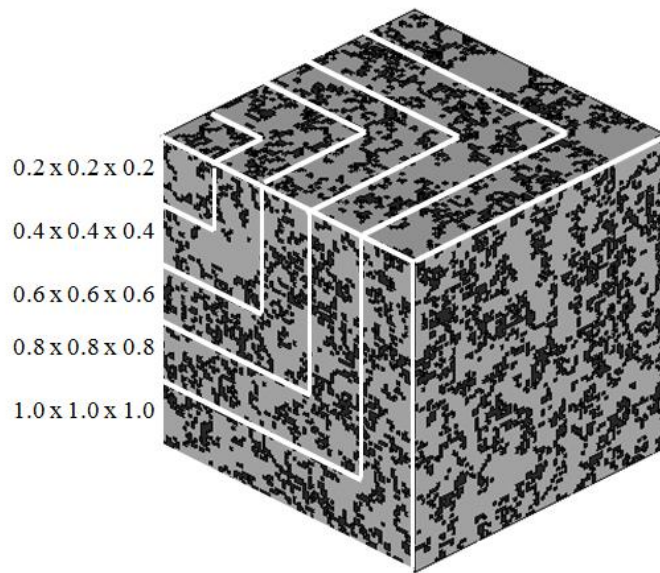
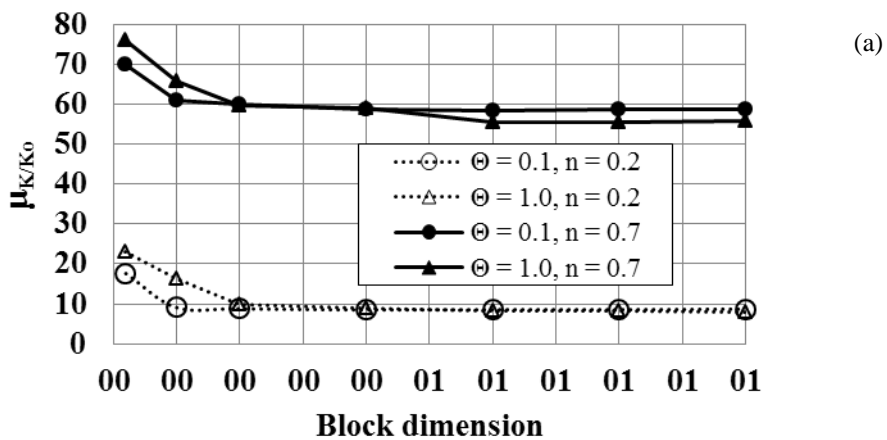


Figure 9 Different block sizes for computing the effective permeability of a material with random voids



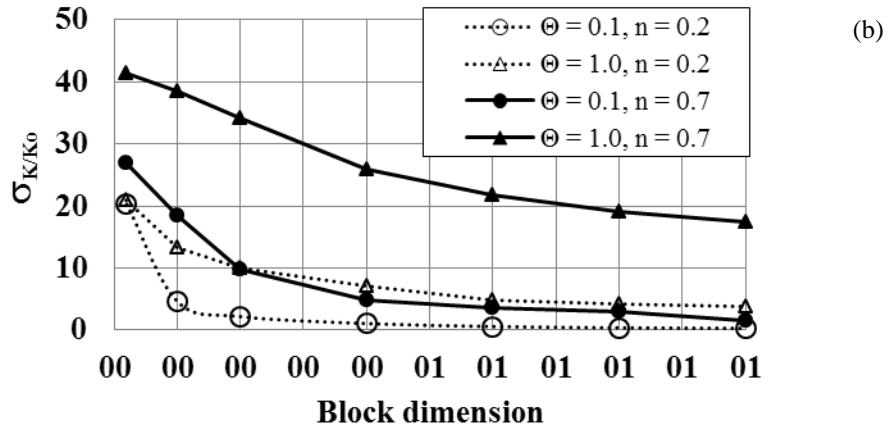


Figure 10 Effective permeability (a) mean and (b) standard deviation following 1000 simulations for different block sizes

The mean values plotted in Figure 10(a) are fairly constant for different block sizes, however the higher values of Θ seem to require a larger RVE before they become constant. The standard deviation shown in Figure 10(b) displays more variability with block size and tends to zero as the blocks get bigger, but at a slower rate for higher values of Θ . In both Figures 10, it is noted that the influence of Θ on block statistics is greater than that of n . The RVE depends more on spatial correlation length (void size) than porosity.

7 COMPUTER RESOURCES AND TIMINGS

A desktop with an Inter Core i7-2600 CPU @ 3.4 Ghz Ram: 8 GB was used to obtain all of the results presented in this research. Figure 11 shows the CPU time used for different block sizes. The results show that the CPU time depends on porosity and spatial correlation length. At a $100 \times 100 \times 100$ mesh, the CPU time for the low porosity and high spatial correlation length case was about 480 hours, while for a high porosity and low spatial correlation length it was more like 150 hours. The reason for this discrepancy is thought to be the slower convergence observed in the iterative solvers when there is more variability present in the permeability matrices with low void content.

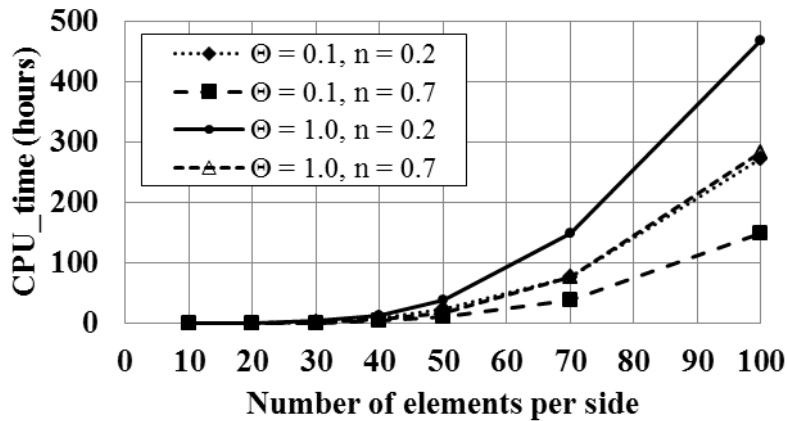


Figure 11 CPU timing for different block sizes with 1000 simulations

8 COMPARISON OF 3D ISOTROPIC AND ANISOTROPIC MODELS

In this section, 3D anisotropic models are considered for comparison with isotropic models. In the 3D isotropic case, the spatial correlation length of voids is set as $\Theta_x = \Theta_y = \Theta_z = 0.1$. Figure 12 shows how voids are elongated in the anisotropic direction. From Figure 13, it is seen that the effective permeability is greatest when voids are elongated in the direction of flow. Thus the effective permeability is greatest when $\Theta_y \gg \Theta_x = \Theta_z$

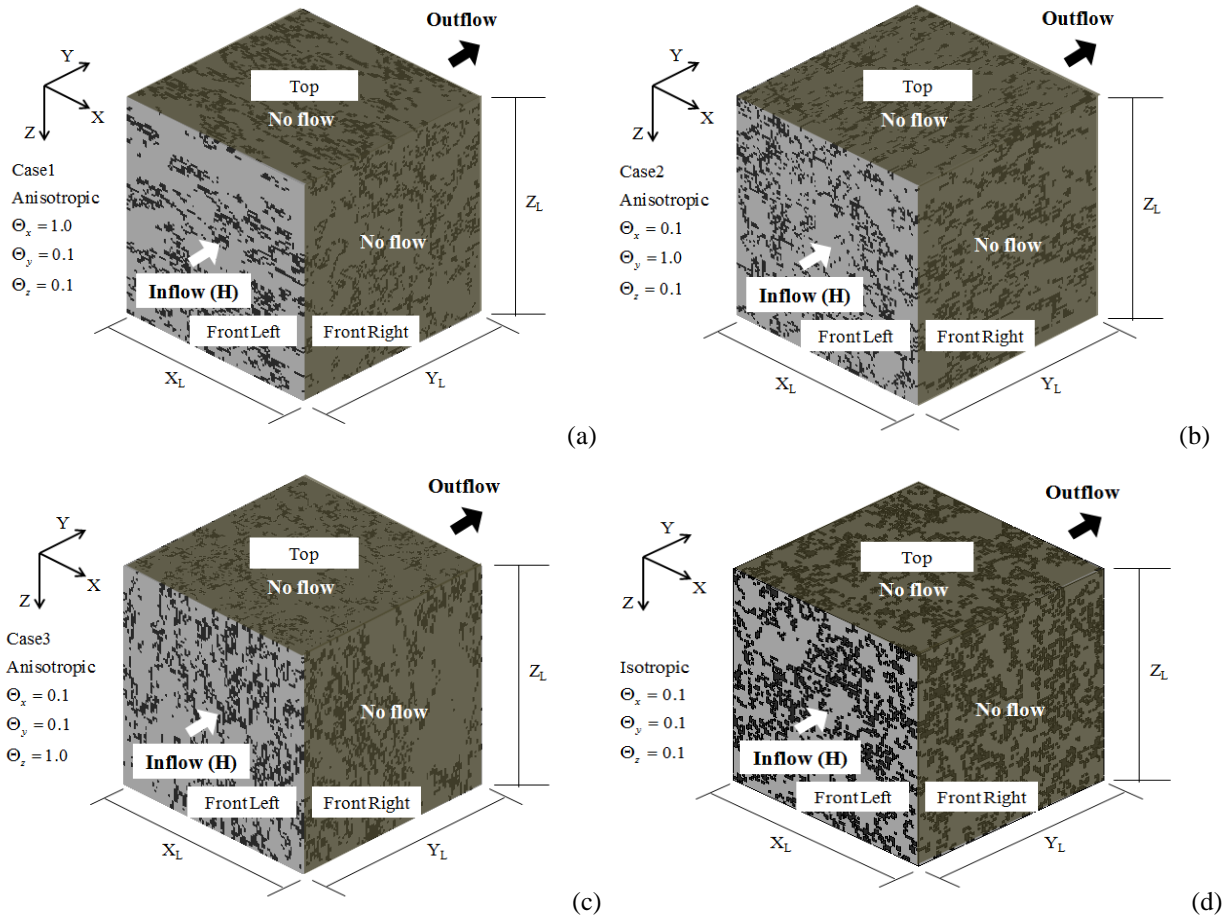


Figure 12 Typical simulations showing the generation of voids: (a) anisotropic model with $\Theta_x = 1$, (c) anisotropic model with $\Theta_y = 1$ (c) anisotropic model with $\Theta_z = 1$ and (d) isotropic model

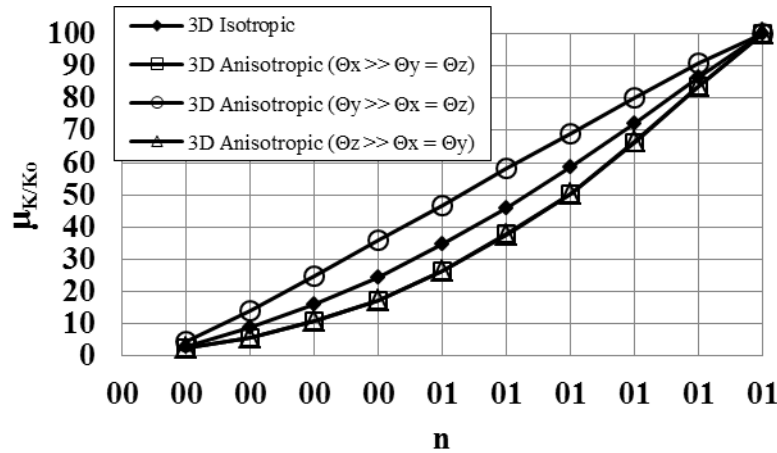


Figure 13 Comparison of the effective permeability obtained from 3D RFEM models (flow in the y -direction)

At the same porosity, the mean effective permeability of 3D anisotropic with high Θ_y is higher than results obtained from 3D isotropic and 3D anisotropic with high Θ_x and Θ_z . The results of 3D anisotropic with high Θ_x and Θ_z are the same but lower than 3D isotropic since the void shapes of 3D anisotropic with high Θ_x and Θ_z tend to be arranged perpendicularly to the flow direction.

9 COMPARING WITH 3D RFEM AND OTHER RESULTS

The theoretical results based on the effective medium theory and the experimental measurements of Doyen (1988) are compared in Figure 14, with the results from the current study using $\Theta = 0.1$. The theory is consistent with Kozeny-Carman formulas to calculate the permeability of Fontainebleau sandstone. The experiment test of sandstone was prepared from cores with porosity ranging from 5 to 22%. The definition of the effective permeability used in this study is defined in the classical geotechnical sense as the effective hydraulic conductivity with units of length/time. Therefore, in order to examine the influences of voids on an effective permeability analysis, the current results will be converted from the effective hydraulic conductivity to effective permeability, using a conversion formula based on the Carlile (Hively 1986) as follows

$$k = \left(K \frac{\mu}{\rho g} \right) \bar{K} \quad (5)$$

where k is permeability (md), K is hydraulic conductivity (cm/s), μ is the dynamic viscosity of the fluid (0.0032 g/cm/s), ρ is the density of the fluid (1 g/cm³), g is the acceleration due to gravity (980 cm/s²) and the conversion unit from permeability (cm²) to the millidarcy (md) $\approx 0.1013 \times 10^{12}$. The hydraulic conductivity (\bar{K}) value of sandstone found in nature is given by 10^{-6} cm/s (Bear 1972).

In general, the permeability of sandstone ranges from 1 to 10000 md; therefore, any element assigned a random field value in the range $|Z| > z_{n/2}$ is treated as intact material a permeability with $K_0 = 1$, while any element where $|Z| \leq z_{n/2}$ is treated as a void element with an assigned permeability of $K'_0 = 10,000$ (10000 times larger than the surrounding intact material) instead of $K'_0 = 100$. Following 1000 simulations, the normalized 3D RFEM results with the void element assigned $K'_0 = 10,000$ were computed for a range of variations of $n = 0$ to 0.3 and $\Theta = 0.1$. Thereafter, the results are converted to effective permeability (md) using Equation 5 for comparison with theoretical and experimental measurements as shown in Figure 14. From Figure 14, it can be observed that the current method gives similar values of the effective permeability to those given by the theoretical and experimental methods for all values of n .

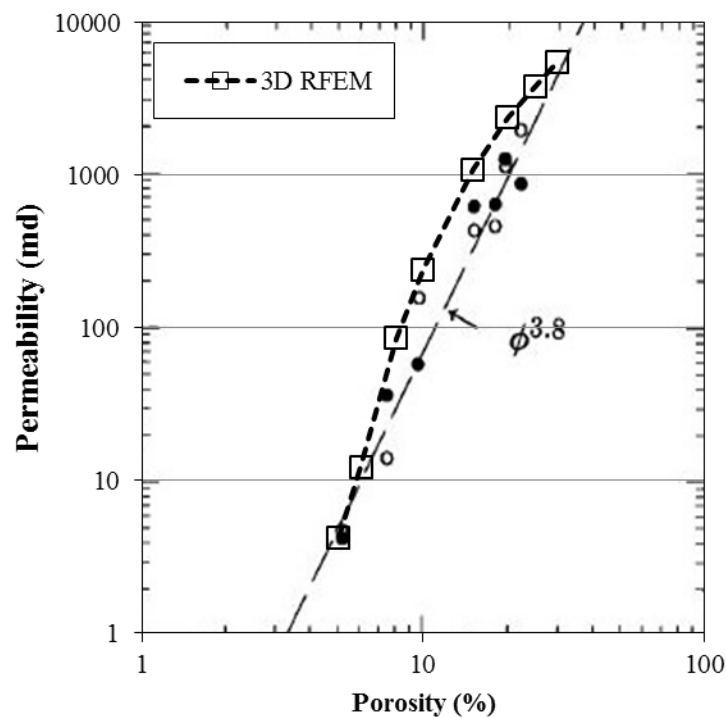


Figure 14 Comparison of the effective permeability obtained from 3D RFEM and the permeability of Fontainebleau Sandstone as a function of porosity. The solid circles represent the experimental measurements. The open circles represent the predicted values, based on the effective medium approximation (Doyen 1988). The open squares are from RFEM

The current results from Figure 14 are also compared with the site data of limestone and dolostone reservoirs from the Madison Formation (Ehrenberg et al., 2006). Follow Equation 5 based on the hydraulic conductivity (\bar{K}) value of limestone and dolostone found in nature = 10^{-8} cm/s (Bear 1972), it can be observed that the current method gives similar values of the effective permeability to those given by the site data for all values of n , as shown in Figure 15.

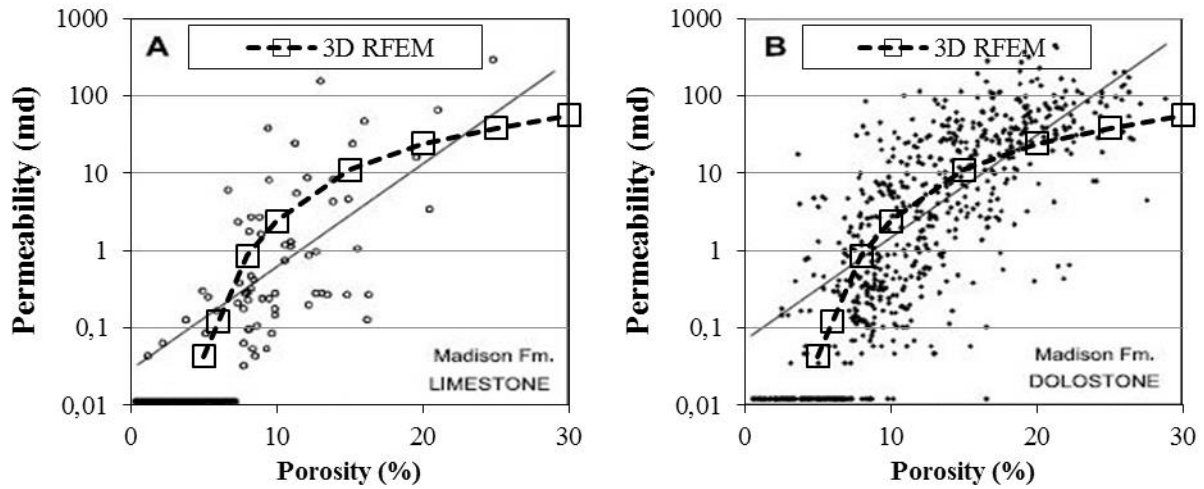


Figure 15 Comparison of the effective permeability obtained from 3D RFEM and the permeability from the Madison Formation as a function of porosity: (A) Limestones and (B) Dolostones. (Ehrenberg et al., 2006). The open squares are from RFEM

10 INFLUENCE OF VOID ELEMENT ON EFFECTIVE PERMEABILITY

There are only two different materials modeled in the finite element analysis. Each void is modeled explicitly as a material with significant higher permeability than the intact material $K_0 = 1$. As can be seen in Figure 16, for the case when $n = 0.2$, the results show a small influence due to the selected permeability of void elements. In the current work, a void permeability which is one hundred times larger than the intact material gives reasonable (and stable) results. It can be noted that a limiting value of permeability of void elements for numerical stability is equal to about 1×10^{19} for the software presented in this research.

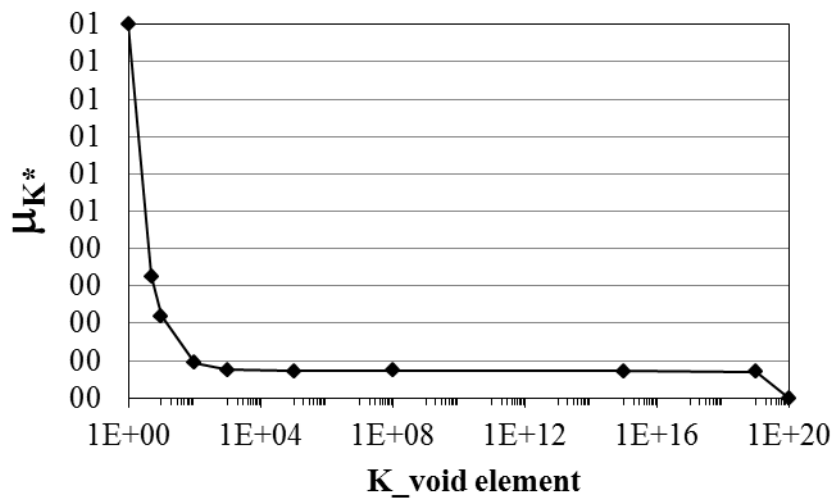


Figure 16 Influence of void element permeability on the normalized mean effective permeability. ($K^* = K / K_{\text{void element}}$)

Following each set of 1000 Monte-Carlo simulations, the mean of the normalized effective permeability were computed for a range of parametric variations of n and $K_{\text{void element}}$, with results shown in Figures 17. It can be noted that the mean normalized effective permeability increases towards one with increasing porosity n and that $K_{\text{void element}}$ has little influence.

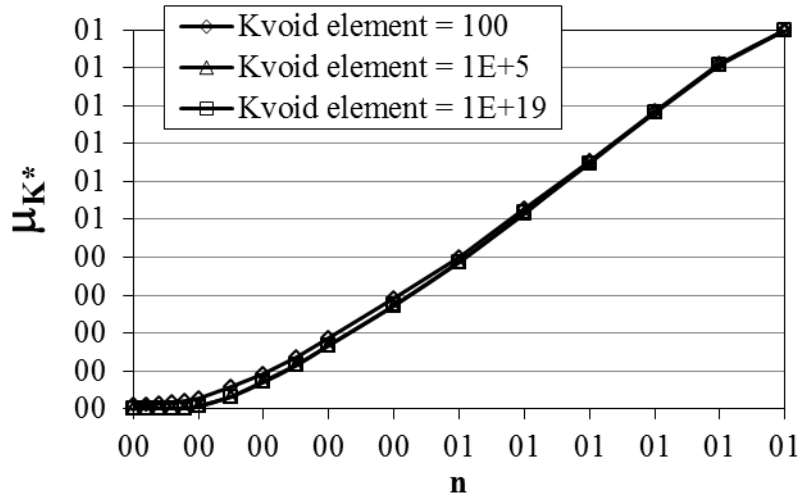


Figure 17 μ_{K^*} vs. n for $100 \leq K_{\text{void element}} \leq 1E+19$

11 CONCLUDING REMARKS

The random finite element method (RFEM) shows promise as a powerful alternative approach for modeling the mechanical influence of inclusions and voids in geomaterials. The RFEM together with Monte-Carlo simulations has been used in this study to investigate the influence of porosity and void size on the effective permeability of geomaterials containing random voids. The voids were not restricted to being simple shapes as in some of the theoretical methods, and the user could control the volume and size of inclusions through changes to the spatial correlation length. It was observed that while porosity had a significant effect on the effective permeability, the void size was less important. Anisotropic void structure was also investigated. It found that the effective permeability depended more on the direction of elongated voids than porosity. When the flow moved from the front left to the back right of the block test, the mean effective permeability had higher than the other directions of elongated voids. The study also investigated the RVE needed to capture the essential properties of a heterogeneous material containing voids. It was found that for the same porosity, the larger the size of the voids, the greater the size of the RVE. Finally, the paper presented favorable comparisons of the effective permeability in 3D with theoretical result and experimental measurements obtained by other investigators.

REFERENCES

- [1]. Abedini, A, Torabi, F. and Tontiwachwuthikul, P., Reservoir rock type analysis using statistical pore size distribution. *Special Topics & Reviews in Porous Media. An International Journal*, 3(2), 97–103, 2011.

- [2]. Barski, M. and Muc, A., Homogenization methods for two-phase composites. *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 47, No. 4, 2011
- [3]. Bear, J., Dynamics of fluids in porous media, *Dover Publications*, ISBN 0-486-65675-6, New York USA., 1972.
- [4]. Bougeat, A., Homogenized behavior of two-phase flows in naturally fractured reservoirs with uniform fractures distribution. *Compute Method APPL MECH ENG*, vol. 47, no. 1-2, pp. 205-216, 1984.
- [5]. Bosl, W.J., Dvorkin, J., Nur, A., A study of porosity and permeability using a lattice Boltzmann simulation. *Geophys. Res. Lett.* 25, 1475–1478, 1998.
- [6]. Doyen, P.M., Permeability, Conductivity, and Pore Geometry of sandstone. *J. Geophysical research*, vol. 93, no. B7, p. 7729-7740, 1988.
- [7]. Edie, Margaret S., Olsen, John F., Burns, Daniel R., and Toksoz, M. Nafi., Fluid flow in porous media: NMR imaging and numerical simulation. *MIT, Earth Resources Laboratory Industry Consortia Annual Report*, 2000-11
- [8]. Ehrenberg, S.N., Eberli, G.P., Keramati, M. and Moallemi, S.A., Porosity-permeability relationships in interlayered limestone-dolostone reservoirs. *AAPG Bulletin*, v. 90, no. 1 (January 2006), pp. 91–114, 2005.
- [9]. Fenton G.A. and Vanmarcke E.H., Simulation of random fields via local average subdivision, *J Eng Mech*, vol.116, no.8, pp. 1733-1749, 1990.
- [10]. Fenton G.A. and Griffiths D.V., Statistics of block conductivity through a simple bounded stochastic medium, *Water Resour Res*, vol.29, no.6, pp.1825-1830, 1993.
- [11]. Fenton G.A. and Griffiths D.V., Risk Assessment in Geotechnical Engineering, *John Wiley & Sons*, Hoboken, NJ, 2008.
- [12]. Griffiths, D.V. and Fenton, G.A., Seepage beneath water retaining structures founded on spatially random soil, *Géotechnique*, 43(6), 577-587, 1993.
- [13]. Griffiths, D.V. and Fenton, G.A., The random finite element method (RFEM) in steady seepage analysis., Chapter 10 in Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, eds. D.V. Griffiths and G.A. Fenton, *Pub. Springer Wien*, New York, pp.225–241, 2007.
- [14]. Grucelski, A., Pozorski, J., Lattice Boltzmann simulation of fluid flow in porous media of temperature-affected geometry. *J. Theor. App. Mech.* 50, 193–214, 2012.
- [15]. Guo, Z., Zhao, T.S., Lattice Boltzmann model for incompressible flows through porous media. *Phys. Rev. E* 66, 036304, 2002.
- [16]. Hashin, Z., and S. Shtrikman, A variational approach to the theory of the elastic behavior of multiphase materials: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11, 127–140, 1963.
- [17]. Held, R., Attinger, S. and Kinzelbach, W., Homogenization and effective parameters for the Henry problem in heterogeneous formations. *Water resources research*, Vol. 41, W11420, 2005.
- [18]. Hidajat, I., Singh, M., Cooper, J. and Mohanty, K., Permeability of Porous Media from Simulated NMR Response. *Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. Transport in Porous Media* 48: 225–247, 2002.
- [19]. Hively, Roger E., Independent Geologist. "Geological Aspects of the Codell Sandstone, Weld and Larimer Counties, Colorado, Document ID 13885-PA." *SPE Formation Evaluation (Society of Petroleum Engineers)* 1, no. 6 : 623-627, 1986.

- [20]. Hoden, L. and O. Lia, A tensor estimator for the homogenization of absolute permeability: *Transport in porous media*, v.8, P.37-46, 1992.
- [21]. Jin, G., Torres-Verdin, C., Toumelin, E., Comparison of NMR simulations of porous media derived from analytical and voxelized representations. *Journal of Magnetic Resonance*, 200 313–320, 2009.
- [22]. Jiru, Z, Gaoling, T, Li, H. and Lun, Y., Porosity models for determining the pore-size distribution of rocks and soils and their applications. *Science China Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg* 2010 Vol.55 No.34: 3960–3970, 2010.
- [23]. Kalam, M.Z., Digital Rock Physics for Fast and Accurate Special Core Analysis in Carbonates. *INTECH, New Technologies in the Oil and Gas Industry*, Chapter 9, p. 201-226, 2012.
- [24]. Kate, J. M. and Gokhale, C. S., A simple method to estimate complete pore size distribution of rocks, *Eng. Geol.*, vol.84, pp. 48–69, 2006.
- [25]. Kimmich, R., Strange kinetics, porous media, and NMR. *Elsevier Science B.V. Chemical Physics* 284, p. 253–285, 2001.
- [26]. Klusemann, B. and Svendsen, B., Homogenization methods for multi-phase elastic composites Comparisons and Benchmarks, *Technische Mechanik*, 30, 4, (2010), 374-386, 2009.
- [27]. Liaw, H.K., Kulkarni, R., Chen, S. and Watson, A.T., Characterization of fluid distributions in porous media by NMR techniques. *Materials, Interfaces and Electrochemical Phenomena. AIChE Journal*, Vol. 42, No. 2, 1996.
- [28]. Liu, C., On the minimum size of representative volume element: An experimental investigation, *Exp Mech*, 45(3), pp.238-243, 2005.
- [29]. Mercier, S., Molinari, A., Berbenni, S. and Berveiller, M., Comparison of different homogenization approaches for elastic-viscoplastic materials. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 20, 024004 (22p), 2012.
- [30]. Muc, A. and Barski, M., Homogenization, Numerical Analysis & Optimal Design of MR Fluids. *Advanced Materials Research*, Vols. 47-50 pp 1254-1257, 2008.
- [31]. Ostoja-Starzewski, M., X. Du, Khisaeva, Z.F. and Li, W., On the size of Representative Volume Element in Elastic, Plastic, Thermoelastic and Permeable Random Microstructures. *Materials Science Forum*, Vols. 539-543 pp 201-206, 2007.
- [32]. Paiboon J. Griffiths D.V. Huang J. and Fenton G.A., Numerical analysis of effective properties of geomaterials containing voids using 3D random fields and finite elements. *International Journal of Solids and Structures*, vol.50, no.20-21, pp.3233-3241, 2013.
- [33]. Popov, P., Efendiev, Y., and Qin, G., Multiscale Modeling and Simulations of Flows in Naturally Fractured Karst Reservoirs. *Commun. Comput. Phys. In press*, 2008.
- [34]. Pouya, A. and Vu, M., Fluid flow and effective permeability of an infinite matrix containing disc-shaped cracks. *Advances in Water Resources*, 42 37–46, 2012.
- [35]. Pozdniakov, S., Tsang, C.-F., A self-consistent approach for calculating the effective hydraulic conductivity of a binary, heterogeneous medium. *Water Resour. Res.* 40, W05105, 2004.
- [36]. Hinton, E., Sienz, J., & Afonso, S. M. B., Experiences with Olhoff's 'exact' semi-analytical algorithm. In Olhoff, N. & Rozvany, G. I. N., eds, *First World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-1)*, pp. 41–46, 1995.
- [37]. Ramm, E., Strategies for tracing the nonlinear response near limit points. In Wunderlich, W., Stein, E., & Bathe, K. J., eds, *Nonlinear Finite Element Analysis in Structural Mechanics*, pp. 63–89. Springer-Verlag, 1981.

- [38]. Ramstad, T., Idowu, N. and Nardi, C., Relative permeability calculations from two-phase flow simulations directly on digital images of porous rocks. *Transp Porous Med* 94:487–504, 2012.
- [39]. Saez, A. E., C. J. Otero, and I. Rusinek, The effective homogeneous behavior of heterogeneous porous media: *Transport in Porous Media*, v. 4, p. 213–238, 1989.
- [40]. Sharp, B., DesAutels, D., Power, G., Young, R. Noble Energy Inc., Foster, S., Diaz, E. and Dvorkin, J., *World oil, reservoir characterization*. P. 67-68, 2009.
- [41]. Sørland, G.H., Djurhuus, K., Widerøe, H.C., Lien, J.R. and Skauge, A., Absolute pore size distributions from NMR. *The Open-Access Journal for the Basic Principles of Diffusion Theory, Experiment and Application. Diffusion Fundamentals* 5 4.1 - 4.15, 2007.
- [42]. Smith, I.M., Griffiths, D.V., and Margetts, L., Programming the finite element method, *John Wiley and sons, Chichester, New York*, 5th edition, 2014.
- [43]. Szymkiewicz, A., Calculating Effective Conductivity of Heterogeneous Soils by Homogenization. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 52 (2005), No. 2, pp. 111–130, 2005.
- [44]. Waki, H., et al., Estimation of effective permeability of magnetic composite materials. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 41, NO. 5, 2005.
- [45]. White, Joshua A., Borja, Ronaldo I., and Fredrich, Joanne T., Calculating the effective permeability of sandstone with multiscale lattice Boltzmann/finite element simulations. *Acta Geotechnica*, 1:195–209, 2006.
- [46]. Zhang, T., Hurley, N.F., Zhao, W. and Schlumberger-Doll research., Numerical modeling of heterogeneous carbonates and multi-scale dynamics. *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*, June 21-24, 2009.
- [47]. Zhang, X., Lattice Boltzmann implementation for fluids flow simulation in porous media. *IJIGSP* 3, 39–45, 2011.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the support of (i) NSF grant CMMI-0970122 on “GOALI: Probabilistic Geomechanical Analysis in the Exploitation of Unconventional Resources”, and (ii) The Royal Thai Government.

DEVELOPMENT OF SUBJECT-SPECIFIC MODELS WITH MATERIAL PROPERTIES AND BOUNDARY CONDITIONS DERIVED FROM MEDICAL IMAGING

Marie-Christine HO BA THO

Tien Tuan DAO

Sabine BENSAMOUN

hobatho@utc.fr

Tien-tuan.dao@utc.fr

somebody3@elsewhere.com

Biomechanics and Bioengineering CNRS UMR 7338, University of Technology of Compiègne, 60205 Compiègne, FRANCE

Abstract. *The objective of the paper is to address the methodology developed to model musculoskeletal systems with personalised geometric and material properties and boundary conditions derived from medical image data. For hard tissue, from Computed Tomography (CT) personalized bone mechanical properties could be extracted but moreover its follow up could provided data for validation of patient specific predictions. For soft tissue advanced MRI such as dynamic MRI and Magnetic Resonance Elastography (MRE) allowed respectively to analyse the in vivo forces generated by the muscles in movement but also its mechanical properties in passive and active behavior. Based on these knowledges, patient specific geometry, mechanical properties and forces are assessed derived from advanced medical imaging techniques. These data are of importance for developing patient specific computer modelling for prediction and evaluation of therapeutic, surgical or functional rehabilitation treatments. Clinical application on the lumbar spine and the face will be given as illustrative examples.*

Keywords: subject specific model, material properties, Computed Tomography, dynamic MRI, Elastography Magnetic Reseonance

1. INTRODUCTION

The paper will address the methodology we have developed in order to model bone and joints with appropriate geometric and mechanical properties derived from medical imaging.

Medical imaging system such as MRI (Magnetic Resonance Imaging) CT (Computed Tomography) is commonly used to evaluate musculo-skeletal disease.

Numerical methods are used for solving physical and mechanical engineering problems. These numerical methods are appropriate for modelling such complex system as human bone and joints and musculoskeletal systems. Literature review demonstrated the extensive use of finite element modelling in biomechanics. During the last decade, the Virtual Physiological Human (VPH) a framework supported by the European Commission has allowed researchs based on personalised, predictive, and integrative medicine with in silico modelling at different scales of the body.

Patient specific computer modelling has been developed since the last decade but still the specificity is not fully described or is limited to patient geometry. Concerning bone and joints modelling it is possible to obtained geometry and mechanical properties derived from CT, but using medical images c should be paid on the reliability of the images quality and the control of the acquisition parameters (Ho Ba Tho et al. 2003) [1], (Hellmich and Kober, 2006) [2].

Besides these extensive numerical models, most of models are derived from CT data and few from MRI. Few consider appropriate material properties derived from tissue characterization obtained from medical images, as they mostly are issued from literature (data or relationships).

The methodology we have developed is based on a semi-automatic generation of a three dimensional geometric model of bone and joints, muscles anatomy derived from medical imaging CT or MRI data. Predictive relationships obtained from previous work demonstrated significant correlation between the material properties and quantitative measurements derived from imaging techniques [Rho et al. 1995] [3]. Then, from the same source of medical imaging data, numerical models with individualised geometric and mechanical properties were developed. Concerning soft tissue same methods are applied (correlation between in vivo tissue characterization and in vitro) or direct assessment could also be performed using MRE (Magnetic Resonance Elastography) (Bensamoun et al. 2008) [4]. Concerning the in vivo forces, dynamic MRI (Dao et al. 2013 [5]) and MRE (Bensamoun et al. 2013) [6] are able to provide data which could be exploited via a musculoskeletal model in order to predict in vivo loads by dynamic inverse analysis.

2. METHODS

2.1 Patient specific geometry

There are different modalities of medical imaging techniques to explore bone and joints: X-ray radiographs, CT scanner (Computed Tomography), MRI (Magnetic Resonance Imaging). The two first techniques are based on absorption of X-rays, and are often used to diagnose bone disease. Meanwhile the last one is based on proton resonance and is more dedicated to soft tissue such as ligaments, cartilage besides bone structures are also visualised. In order to assess the anatomical data, we have developed a pre processing medical image CT and MRI [SIP 305, ©Inserm, HoBaTho 1993] [7].

The different steps of the image processing were 1) to decode the stack of medical image data representing the three dimensional of bone and joints structure, 2) to perform an edge detection after a threshold process and 3) to build geometric entities of the bones with a creation of an output data file in a neutral format or an IGES format (Figure 1, 2).

Once the geometry obtained any commercial software could be used for developing the finite element models.

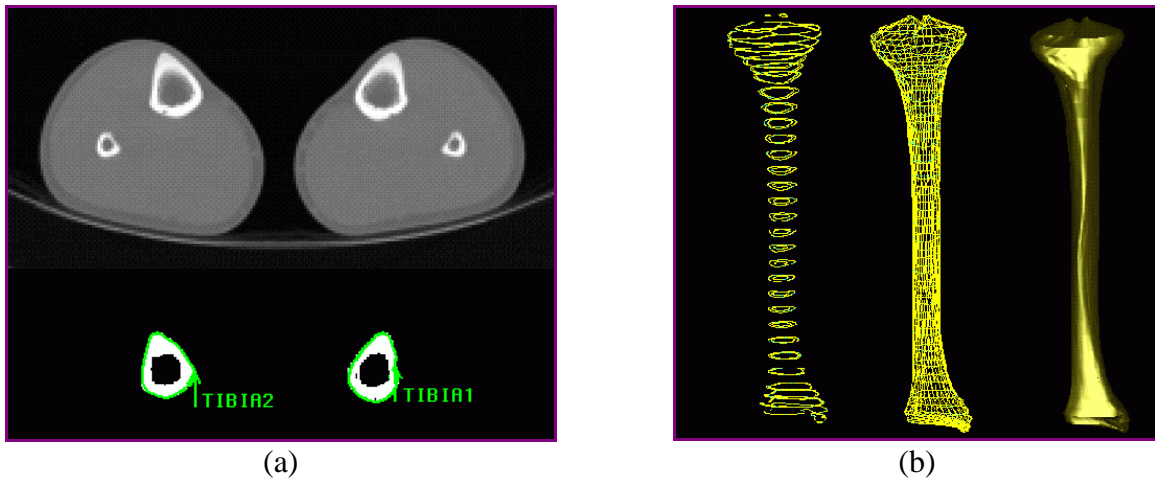


Figure 1 : Different steps of 3D geometrical reconstruction of the tibia derived from CT images : threshold, edge detection and geometric reconstruction (a) and visualisation (b) (Patran MSC.Software) (HoBaTho 2003).

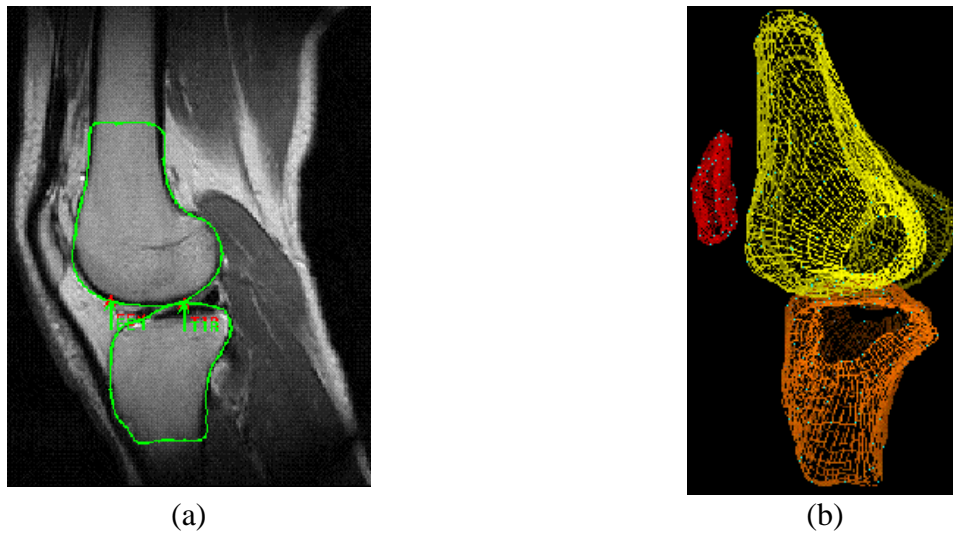


Figure 2 : Another example derived from MRI images of the knee. Geometric reconstruction using edge detection (a) and visualisation of the geometric entites of the knee (b).

2.2 Patient specific mechanical properties of hard tissue bone derived from Computed Tomography (CT).

Mechanical properties of bone have been studied for over three decades in order to understand the mechanical behaviour of bone in the process of fracture risk, repair and bone related disease. Besides, few data were available or insufficient for human bone modelling. Human bone is highly heterogeneous and anisotropic material. It can be compared to composite materials; it is made of two different tissue spongy bone (high porosity) and cortical bone

(compact bone) depending on the anatomical location.

In order to associate geometric and mechanical properties, we assume that measurements derived from medical imaging could predict material properties. We have investigated the relationships between CT number derived from CT imaging technique and mechanical properties of bone. The CT number characterizes a linear coefficient of attenuation of X-ray within the tissue. For the CT scan, the pixel values are represented by an empirical number called CT number expressed in Hounsfield Units (HU). Predictive relationships between elastic properties and density and CT numbers for different human bone have been provided (Rho et al. 1995).

Finally from CT images one could model geometric and mechanical properties of the subject as illustrated (figure 3) (Périé et al. 2001) [8].

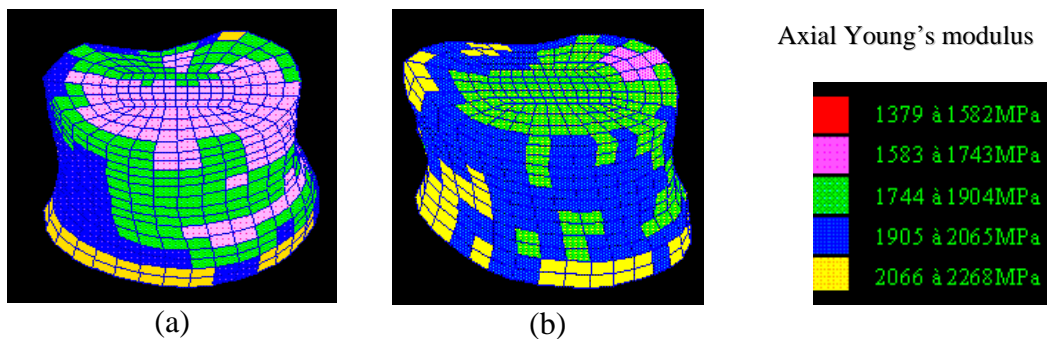


Figure 3 : Visualisation of two patient specific mechanical properties distribution of L4 vertebrae (a) and (b).

2.3 Patient specific mechanical properties of soft tissue derived from advanced MRI techniques

For soft tissue, MRI is appropriate to perform tissue characterization by a direct measurement (Elastography Magnetic Resonance) or indirect measurement which needs *à posteriori* relationships with mechanical properties assessed elsewhere. Some examples of advanced techniques of MRI used are illustrated in order to assess quantitative analyses of the disc and mechanical properties of the muscles.

Advanced MRI tissue characterization.

Advanced MRI sequences such as T2 Mapping, Diffusion-weighted, and Diffusion tensor sequences have been developed in order to assess quantitative tissue characterization of the intervertebral disc (IVD). We developed a custom-made framework using Python, Numpy package (Python Software Foundation, USA), and Visualization ToolKit (VTK) library (Kitware Inc., USA) as programming and visualization tools. The practical framework was used to analyze and visualize three feature maps of the IVD: the T2 relaxation time, the apparent diffusion coefficient (ADC), and the anisotropy. They are derived from advanced MRI sequences such as T2 Mapping, Diffusion-weighted, and Diffusion tensor sequences. These features were quantified using regression analysis with least squares and signal intensity-based direction-oriented methods. Based on these maps, a threshold-based geometrical computing procedure was developed to compute the geometrical repartition maps. As a first case study, *in vivo* features of Annulus Fibrosus (AF) and Nucleus Pulposus (NP) regions of the L4/5 intervertebral disc were

analyzed and visualized. Our framework allows useful information of IVD to be quantified and used for early diagnosis as well as for further modeling purpose (Dao et al. 2013) [9]. Figure 4 illustrates different T2 mapping showing different tissue characterization and geometries could be differentiated according to T2 mapping.

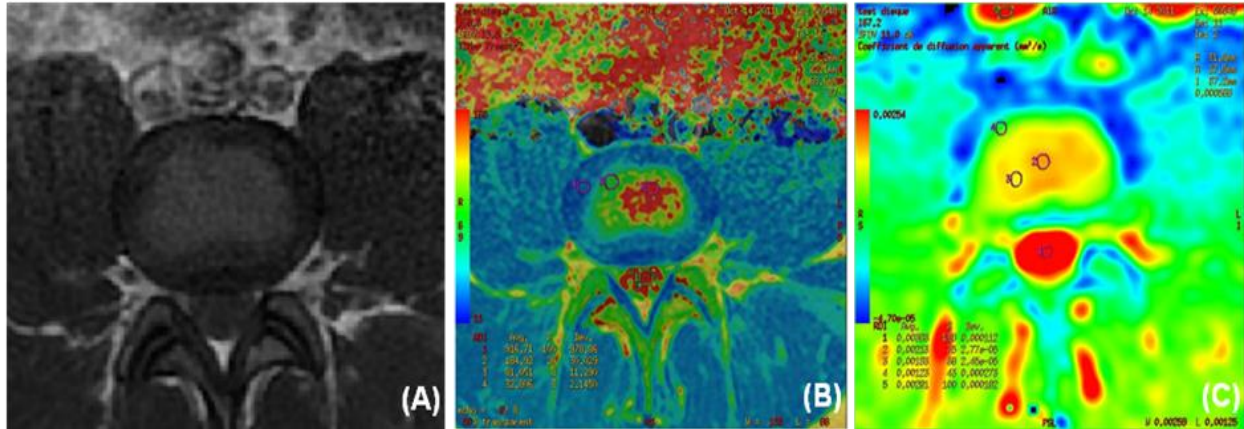


Figure 4. Native MRI image (A) T2 mapping , ADC mapping (B).

MRE (Magnetic Resonance Elastography).

We develop specific mechanical protocol coupled with MRI techniques as for example MRE. The principle of MRE is to generate longitudinal and transversal waves applied to the thigh muscles with a pneumatic driver. Only the shear (or transversal) waves were measured inside the muscle and elastic properties in vivo could be derived using different rheological models. Specific MRE tests allowed for the determination of the functional properties revealed by the viscoelastic properties composed of elastic and viscous parameters of the in vivo muscle in passive and active conditions. Figure 5 illustrates another anatomical location the in vivo elastic properties cartography of the muscle of the back.

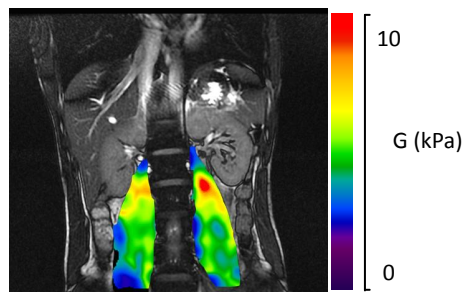


Figure 5. Cartography of elastic properties derived from MRE.

2.4 Patient specific forces derived from advanced MRI techniques

Estimation of in vivo forces from dynamic MRI or MRE

We developed specific protocol allowing to register the dynamic movement of the spine performed by the subject using MRI (Dao et al. 2013) [5]. Figure 6 illustrates the different movements captured by the dynamic MRI.

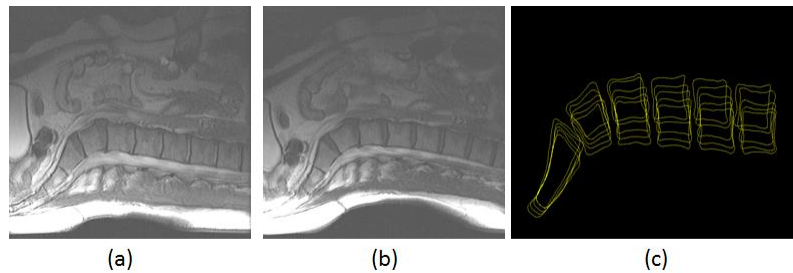


Figure 6. Dynamic MRI data: initial (a) and maximal (b) hyperlordosis positions and contour-based reconstruction of hyperlordosis motion (c) of one subject.

In order to estimate the in vivo forces from MRE a patient specific rigid body model has to be developed [10, 6]. Using MRE techniques, the mechanical properties of the muscles could be integrated in the musculoskeletal model and then in vivo forces could be estimated during the movement. Concerning the dynamic MRI, the example of the lumbar spine shows that it allows to estimate patient specific lumbar spine muscle forces during hyperlordosis [5].

3. APPLICATIONS

Derived from these abilities to obtain patient specific geometrical, material and forces derived from medical images, one could develop subject specific finite element model. As an example, for the lumbar spine, within a workframe of a european project, the patient specific model could provide predictive simulations to treat spinal diseases and contribute to the improvement of the clinical outcome. Another example will illustrate the development of a subject specific finite element model of the muscle in order to simulate the facial mimics (Ho Ba Tho et al. 2013) [11].

REFERENCES

- [1]. Ho Ba Tho, M.C, *Bone and joints modelling with individualised geometric and mechanical properties derived from medical image*. CMES, Vol.4, n°3&4, pp.489-496, 2003.
- [2]. Hellmich, C., Kober, C. *Micromechanics-Supported Conversion of Computer Tomographic (CT) Images into Anisotropic and Inhomogeneous Finite Element Models of Organs: the Case of a Human Mandible*, PAMM - Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, pp. 71 – 74, 2006.
- [3]. Rho J.Y., Ho Ba Tho M.C., Ashman R.B. *Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone*. Med Eng Phys 17: 5. 347-355 Jul 1995
- [4]. Bensamoun S., Glaser KJ., Ringleb SI., Chen Q., Ehman RL, An KN. *Rapid magnetic resonance elastography of skeletal muscle using one dimensional projection*. J Magn Reson Imaging, 27:1083–108, 2008.

- [5]. Dao T.T, Pouletaut P., Charleux F., Lazáry A., Eltes P., Pal Varga P., Ho Ba Tho MC *Estimation of Patient Specific Lumbar Spine Muscle Forces using Multi-Physical Musculoskeletal Model and Dynamic MRI*. Proceedings of the Fifth International Conference on Knowledge and Systems Engineerig 2013, Advances in Intelligent and Soft Computing (Springer Editor) , Volume 245, 2014, pp 411-422, 2013.
- [6]. Bensamoun SF., Dao TT., Charleux F., Ho Ba Tho MC. Estimation of muscle force derived from in vivo MR elastography tests: a preliminary study. *J Musculoskeletal Research*. 16(3):1350015-1350025, 2013.
- [7]. HoBaTho, M.C. (1993) Logiciel SIP 305, Logiciel de prétraitement d'images médicales, Scanner, IRM.
- [8]. Périé D., Sales de Gauzy J., Baunin C., Ho Ba Tho M.C. *Tomodensitometry measurements for in vivo quantification of mechanical properties of scoliotic vertebrae*. *Clin Biomech* (Bristol, Avon) 16: 5. 373-379, 2001.
- [9]. Dao T.T, Pouletaut P., Robert L., Aufaure P., Charleux F., Ho Ba Tho M.C. *Quantitative Analysis of Annulus Fibrosus and Nucleus Pulposus derived from T2 Mapping, Diffusion-weighted and Diffusion Tensor MR Imaging*. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization* 1(3):138-146, 2013.
- [10]. Dao T.T., Marin F., Pouletaut P., Aufaure P., Charleux F., Ho Ba Tho M.C. *Estimation of Accuracy of Patient Specific Musculoskeletal Modeling: Case Study on a Post Polio Residual Paralysis Subject* *Computer Method in Biomechanics and Biomedical Engineering* 15 (7): 745-751, 2012.
- [11]. Ho Ba Tho MC, Dao T.T, Bensamoun S.F, Dakpe S., Devauchelle B., Rachik M. *Subject Specific Modeling of the Muscle Activation. Application to the Facial Mimics* . Proceedings of the Fifth International Conference on Knowledge and Systems Engineerig 2013, Advances in Intelligent and Soft Computing (Springer Editor),Vol 245, 2014, pp 423-433, 2013

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge INSERM, CNRS, Picardy Region (SIMOVI project), National Agency for Research (ANR-10-EQPX-01-01), European Commission (MySpine – GA-269909).

ANALYSIS OF POTENTIALS IN CRYSTAL NETWORKS BY MEANS OF NON LINEAR OPTIMIZATION TECHNIQUES

René Meziat

rene.meziat@urosario.edu.co

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad del Rosario. Bogotá, Colombia.

Abstract. *In this work we apply the method of the moments to non convex variational problems used as models of equilibrium in crystal networks. To treat this kind of problems, as in our earlier work on electrodynamics, we must make use of the method of the moments for variational problems. We present a simple outline that incorporates the boundary conditions within the system.*

Keywords: Optimization techniques, crystal networks, nonlinear analysis.

1 INTRODUCTION

In this work we apply the method of the moments to non convex variational problems used as models of equilibrium in crystal networks. To treat this kind of problems, as in our earlier work on electrodynamics, we must make use of the method of the moments for variational problems. We present a simple outline that incorporates the boundary conditions within the system.

We treat the calculation of convex hulls of non convex surfaces, as a solution to a definite variational problem. We present a detailed description of the process of discretization that must be carried out to transform a variational problem into a program of mathematical programming using the theory of finite elements. To illustrate the process we use a particular problem of the form

$$\iint_{\Omega} \left(\left(1 - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + u^2(x, y) \right) dx dy.$$

We intend to analyze non convex problems that can be expressed in the following way:

$$\begin{aligned} \min_u I(u) &= \int_{\Omega} \{ f(\nabla u(x, y)) + (u(x, y) - h(x, y))^2 \} dx dy \\ \text{s.t. } u|_{\partial\Omega} &= g \end{aligned} \tag{1}$$

where f is a non convex function and u is the family of all the admissible functions in the space of Ω . See [6, 7, 8].

To analyze this kind of problems we use relaxation by means of Young measures, so we introduce a generalized functional with the appropriate boundary conditions:

$$\begin{aligned}
 I(\nu) &= \int_{\Omega} \left(\int_{\mathbb{R}^2} f(s, t) d\mu_{x,y}(s, t) + (u(x, y) - h(x, y))^2 \right) dx dy \\
 \text{s.t. } \nabla u(x, y) &= \int_{\mathbb{R}^2} (s, t) d\mu_{x,y}(s, t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

and the boundary condition of (1). Here

$$\nu = \{\mu_{x,y} : (x, y) \in \Omega\}$$

is a parametrized family of probability measures supported on the plane. Each of these sets ν is known as Young measure, therefore the generalized functional is defined on the family of all the Young measures.

The theory of Young measures [11] predicts that the generalized function (2) has a minimizing Young measure $\nu^* = \{\bar{\mu}_{x,y} : (x, y) \in \Omega\}$ that provides information on the minimizing series of the functional defined in (1). Therefore $\nabla u_n(x, y) \rightarrow d\bar{\mu}_{x,y}$ in the measure, whenever u_n be a minimizing series of the functional. Moreover the optimal parametrized measures $\bar{\mu}_{x,y}$ represent the states in the classical velocities or the moment type operators in the quantum cases of the corresponding mechanical system.

The functional has a single minimizer if and only if the generalized functional has a minimizer ν^* consisting only of Dirac measures, that in this case have the form $\bar{\mu}_{x,y} = \delta_{\nabla u(x,y)}$ with ν^* a minimizer.

In this work we will treat non convex bidimensional functions that have the general form

$$f(s, t) = \sum_{0 \leq i+j \leq 2n} c_{i,j} s^i t^j. \tag{3}$$

2 BIDIMENSIONAL HULLS

Let us remember that for the case of a one-dimensional polynomial it is possible to define its convex hull as

$$f_c(t) = \min_{\mu} \int_{\mathbb{R}} f(\lambda) d\mu(\lambda)$$

where μ represents the family of all the probability measures with mean t . In this case each probability measure represents a convex combination of points over the real line. Therefore the measure

$$\mu^* = \lambda_1 \delta_{t_1} + \lambda_2 \delta_{t_2} \tag{4}$$

represents the convex combination that satisfies

$$\lambda_1(t_1, f(t_1)) + \lambda_2(t_2, f(t_2)) = (t, f_c(t)).$$

We know that μ is supported, at the most, in only two points thanks to Carathéodory's theorem of convex analysis [1, 2, 3, 4, 5].

For a one-dimensional polynomial the calculation of the convex hull for f ,

$$f(t) = \sum_{i=0}^{2n} c_i t^i,$$

can be solved by means of the mathematical program

$$f_c(t) = c_0 + c_1 t + \min \sum_{i=2}^{2n} c_i m_i$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{bmatrix} 1 & t & m_2 & \dots & m_n \\ t & m_2 & m_3 & \dots & m_{n+1} \\ m_2 & m_3 & \vdots & \dots & m_{n+2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ m_n & m_{n+1} & m_{n+2} & \dots & m_{2n} \end{bmatrix} \geq 0.$$

When f has a non separable bidimensional form as in (3) its convex hull is defined as

$$f_c(s, t) = \min_{\mu} \int_{\mathbb{R}} f(\sigma, \gamma) d\mu(\sigma, \gamma) \quad (5)$$

where μ represents the family of all the probability measures supported on the plane that satisfy

$$(s, t) = \int_{\mathbb{R}} (\sigma, \gamma) d\mu(\sigma, \gamma).$$

Now, given the polynomial we try to analyze is non separable, we characterize the Young measure of the bidimensional convex hull by means of the theory of moments [10] constructing an adequate matrix of moments. Keeping in mind that to the bidimensional polynomial (3) in the point t corresponds an optimal probability distribution with bidimensional algebraic moments $m_{i,j}$ that solve the mathematical problem

$$f_c(a, b) = \min_m \sum_{0 \leq i+j \leq 2n} c_{i,j} m_{i,j} \quad (6)$$

where $m_{i,j}$ is the moment associated to the function $x^i y^j$ of the measure μ ,

$$m_{i,j} = \int x^i y^j d\mu(x, y).$$

We can express the analysis of a convex hull as the minimization of the linear combination in (6) and the reconstruction of the optimal measure μ^* from the optimal values $m_{i,j}^*$. The constraint necessary over the mathematical program (6), for it to be a problem defined over moments, requires

that the matrix m be composed of moments. So, we must be able to characterize the appropriately. To that end we use matrices with the form

$$M(m) = (m_{i+i',j+j'} : 0 \leq i + j \leq n; 0 \leq i' + j' \leq n)$$

called constraint matrices. For m to meet the mentioned requisites, $M(m)$ must be positive semi definite and have a particular form in its internal structure [4, 5]. The constraint matrix M for a polynomial of degree 4 is constructed in the following way:

1. A vector V is created in the following way:

$$V = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 \end{bmatrix}$$

2. A matrix N is created in the following way:

$$N = V^T V$$

3. Each entry of matrix N is changed for its corresponding moment:

$$x^n y^r \rightarrow m_{nr}$$

and these correspond to the entries of the constraint matrix M .

This way the internal form of the semi definite constraint matrix is found. Its structure and its positive definiteness guarantee that it is a matrix of bidimensional moments, at least up to an adequate degree of approximation.

2.1 Example

Consider the particular case of a fourth order general polynomial. Matrix N is written as

$$N = V^T V = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 \\ x & x^2 & xy & x^3 & x^2y & xy^2 \\ y & xy & y^2 & x^2y & xy^2 & y^3 \\ x^2 & x^3 & x^2y & x^4 & x^3y & x^2y^2 \\ xy & x^2y & xy^2 & x^3y & x^2y^2 & xy^3 \\ y^2 & xy^2 & y^3 & x^2y^2 & xy^3 & y^4 \end{bmatrix}.$$

We change the entries of N for their respective moments. Then the constraint matrix M is written as

$$M = \begin{bmatrix} 1 & m_{10} & m_{01} & m_{20} & m_{11} & m_{02} \\ m_{10} & m_{20} & m_{11} & m_{30} & m_{21} & m_{12} \\ m_{01} & m_{11} & m_{02} & m_{21} & m_{12} & m_{03} \\ m_{20} & m_{30} & m_{21} & m_{40} & m_{31} & m_{22} \\ m_{11} & m_{21} & m_{12} & m_{31} & m_{22} & m_{13} \\ m_{02} & m_{12} & m_{03} & m_{22} & m_{13} & m_{04} \end{bmatrix}$$

and the problem of finding the bidimensional convex hull in (a, b) for a fourth degree polynomial is reduced to solving the following mathematical problem:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{0 \leq i+j \leq 4} c_{i,j} m_{i,j} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{bmatrix} 1 & m_{10} & m_{01} & m_{20} & m_{11} & m_{02} \\ m_{10} & m_{20} & m_{11} & m_{30} & m_{21} & m_{12} \\ m_{01} & m_{11} & m_{02} & m_{21} & m_{12} & m_{03} \\ m_{20} & m_{30} & m_{21} & m_{40} & m_{31} & m_{22} \\ m_{11} & m_{21} & m_{12} & m_{31} & m_{22} & m_{13} \\ m_{02} & m_{12} & m_{03} & m_{22} & m_{13} & m_{04} \end{bmatrix} \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

where the constraint matrix must be positive semi definite and the moments m_{10} and m_{01} are equal to a and b respectively.

3 CONSTRUCTION OF THE MEASURE

Assuming that the solution of the optimal moments $m_{i,j}^*$ of the program (7) is known, we proceed to the construction of the optimal measures that solve the program (5) and contain the information of the convex hull in a particular point (a, b) .

To obtain the measure of a bidimensional polynomial we take the following steps [9, 10]: It is in our interest to obtain the measure of a fourth degree bidimensional polynomial. Next we show the steps to follow using an analysis based on the moments of the marginal probability distributions:

1. Build two polynomials $P(x)$ and $P(y)$ from the determinant of the Hankel matrix constructed with the optimal moments of the marginal probability distributions for x and y :

$$P(x) = \begin{vmatrix} m_{00}^* & m_{10}^* & m_{20}^* & m_{30}^* \\ m_{10}^* & m_{20}^* & m_{30}^* & m_{40}^* \\ m_{20}^* & m_{30}^* & m_{40}^* & m_{50}^* \\ 1 & x & x^2 & x^3 \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$P(y) = \begin{vmatrix} m_{00}^* & m_{01}^* & m_{02}^* & m_{03}^* \\ m_{01}^* & m_{02}^* & m_{03}^* & m_{04}^* \\ m_{02}^* & m_{03}^* & m_{04}^* & m_{05}^* \\ 1 & y & y^2 & y^3 \end{vmatrix}$$

The marginal moment m_{00}^* equals 1 since we deal with a probability distribution, $m_{10}^* = a$, $m_{01}^* = b$ because we apply Carathéodory's theorem in the point (a, b) in which we need to reconstruct the optimal measure that determines the convex hull.

2. Proceed to construct the support of the optimal measure

$$\mu^* = \sum_{i=1}^3 \delta_{t_{x_i}, t_{y_i}}$$

which according to Carathéodory's theorem must have 3 points at the most ($i = 1, 2, 3$) since we deal with a bidimensional surface, therefore we establish three procedures in accordance with the principal minors of the Hankel matrices in (8).

- Case (i): Analyze the smallest principal minors of each matrix independently (2×2 minors).

$$\left| \begin{bmatrix} m_{00}^* & m_{10}^* \\ m_{10}^* & m_{20}^* \end{bmatrix} \right| = 0 \quad \acute{o} \quad \left| \begin{bmatrix} m_{00}^* & m_{01}^* \\ m_{01}^* & m_{02}^* \end{bmatrix} \right| = 0$$

Given the determinants of these submatrices equal zero, the support coincides with only one point $t_X = a$ (support on the X axis) y $t_Y = b$ (support on the Y axis), therefore it is a convexity zone in the function.

- Case (ii): Analyze, independently, the 3×3 principal minors, since the 2×2 principal minors are positive.

$$\left| \begin{bmatrix} m_{00}^* & m_{10}^* \\ m_{10}^* & m_{20}^* \end{bmatrix} \right| > 0 \quad \acute{o} \quad \left| \begin{bmatrix} m_{00}^* & m_{01}^* \\ m_{01}^* & m_{02}^* \end{bmatrix} \right| > 0$$

$$\left| \begin{bmatrix} m_{00}^* & m_{10}^* & m_{20}^* \\ m_{10}^* & m_{20}^* & m_{30}^* \\ m_{20}^* & m_{30}^* & m_{40}^* \end{bmatrix} \right| = 0 \quad \acute{o} \quad \left| \begin{bmatrix} m_{00}^* & m_{01}^* & m_{02}^* \\ m_{01}^* & m_{02}^* & m_{03}^* \\ m_{02}^* & m_{03}^* & m_{04}^* \end{bmatrix} \right| = 0$$

If the determinant of this 3×3 submatrix equals zero, the support coincides with two points (t_{X_1}, t_{Y_1}) , (t_{X_2}, t_{Y_2}) and they are determined finding the roots of the polynomials

$$P(t_X) = \left| \begin{bmatrix} m_{00}^* & m_{10}^* & m_{20}^* \\ m_{10}^* & m_{20}^* & m_{30}^* \\ 1 & t_X & t_X^2 \end{bmatrix} \right|$$

ó

$$P(t_Y) = \left| \begin{bmatrix} m_{00}^* & m_{01}^* & m_{02}^* \\ m_{01}^* & m_{02}^* & m_{03}^* \\ 1 & t_Y & t_Y^2 \end{bmatrix} \right|$$

- Case (iii): When the principal minors up to dimension 3×3 are all positive, we must

take a minor of dimension 4 that defines the following polynomials:

$$P(t_X) = \begin{vmatrix} m_{00}^* & m_{10}^* & m_{20}^* & m_{30}^* \\ m_{10}^* & m_{20}^* & m_{30}^* & m_{40}^* \\ m_{20}^* & m_{30}^* & m_{40}^* & m_{50}^* \\ 1 & t_X & t_X^2 & t_X^3 \end{vmatrix}$$

ó

$$P(t_Y) = \begin{vmatrix} m_{00}^* & m_{01}^* & m_{02}^* & m_{03}^* \\ m_{01}^* & m_{02}^* & m_{03}^* & m_{04}^* \\ m_{02}^* & m_{03}^* & m_{04}^* & m_{05}^* \\ 1 & t_Y & t_Y^2 & t_Y^3 \end{vmatrix}$$

In this case the support is found taking the roots of each polynomial in expression (9), which are real and not equal. Therefore the solution of the x (t_{X_i} where $i = 0 \dots 3$) such that $P(t_x) = 0$ coincides with the support points on the X axis and the solution of the y (t_{Y_i} where $i = 0 \dots 3$) such that $P(t_y) = 0$ coincides with the support points on the Y axis.

3. Finally, we obtain the weights of the distribution to reconstruct the probability measure completely. These weights represent the convex combination that defines the convex hull of f in terms of its graph. Therefore they can be assigned to the points found earlier. They can be obtained in accordance with the determinants of the principal minors of the Hankel matrix illustrated in the previous case. That is:

- Case (i): The weight is $\mu = 1$ when there only exists one support point, then the probability is concentrated whole in a single point. The marginal distributions of the optimal measure are given by

$$\mu_X^* = \delta_{t_X} \quad \mu_Y^* = \delta_{t_Y}$$

in such a way that the optimal measure is a Dirac measure

$$\mu^* = \delta_{(t_X, t_Y)}.$$

- Case (ii): The weights for the marginal distributions of the optimal measure are obtained according to the following equation:

$$\begin{aligned} \mu_{X1} &= \frac{t_{X2} - a}{t_{X2} - t_{X1}} & \mu_{X2} &= \frac{a - t_{X1}}{t_{X2} - t_{X1}} \\ \mu_{Y1} &= \frac{t_{Y2} - b}{t_{Y2} - t_{Y1}} & \mu_{Y2} &= \frac{b - t_{Y1}}{t_{Y2} - t_{Y1}} \end{aligned}$$

where (a, b) is the point where we want to obtain the measure and $t_{i,j}$, with $i = X, Y$ and $j = 1, 2$, are the supports obtained in case (ii) of the previous step as roots of P in (8). The optimal measure is given by

$$\mu_X = \mu_{X1}\delta_{t_{X1}} + \mu_{X2}\delta_{t_{X2}} \quad \mu_Y = \mu_{Y1}\delta_{t_{Y1}} + \mu_{Y2}\delta_{t_{Y2}}$$

- Case (iii): The weights μ are obtained solving the linear equations system

$$\begin{bmatrix} m_{10}^* \\ m_{20}^* \\ m_{30}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{X1} & t_{X2} & t_{X3} \\ t_{X1}^2 & t_{X2}^2 & t_{X3}^2 \\ t_{X1}^3 & t_{X2}^3 & t_{X3}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{10} \\ \mu_{20} \\ \mu_{30} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} m_{01}^* \\ m_{02}^* \\ m_{03}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{Y1} & t_{Y2} & t_{Y3} \\ t_{Y1}^2 & t_{Y2}^2 & t_{Y3}^2 \\ t_{Y1}^3 & t_{Y2}^3 & t_{Y3}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{01} \\ \mu_{02} \\ \mu_{03} \end{bmatrix}$$

Therefore, in the more general case there exist three weights for each marginal distribution, that correspond to the three support points of the bivariate optimal measure on the plane, which are assigned in the same order to each of the marginal supports.

Generalizing and following the previous steps we can construct the marginal distributions for each one of the axes in the following way:

$$\mu_X^* = \sum_{i=1}^k \mu_{i0}^* \delta_{t_{X_i}} t_{X_i} \quad \mu_Y^* = \sum_{i=1}^k \mu_{0i}^* \delta_{t_{Y_i}} t_{Y_i} \quad (10)$$

where k is the number of support points found, $1 \leq k \leq 3$. So that the bivariate optimal measure holds the information about the convex hull of f in the point (a, b) and hence the information necessary to determine the possible steady states of the system.

4 FINITE ELEMENT ANALYSIS

Let us analyze the variational problem (1) in an Ω defined by

$$\Omega = [0, 1]^2 \quad (11)$$

and f can be written as a bidimensional polynomial of the form

$$f(x, y) = \|z - a\|^2 \|z + a\|^2 \quad (12)$$

and $z = (x, y)$.

To solve the problem (1) within the domain (11) and with the function (12) we use a finite element plan. We divide the domain Ω in basic elements as figure 1 shows.

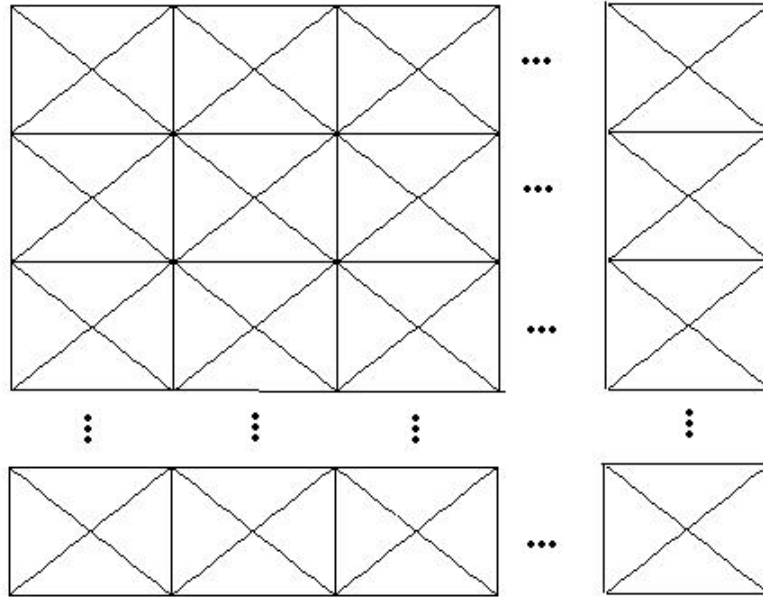


Figure 1: Basic elements structure

Without loss of generality in the problem (1), we will assume that both the value in the border g as well as the function to be approximated h equal zero, this means

$$g = 0 \quad h = 0$$

and the problem that we will analyze becomes

$$\begin{aligned} \min_u I(u) &= \iint_{\Omega} f(\nabla u(x, y)) + u(x, y)^2 dx dy \\ \text{s.t. } u|_{\partial\Omega} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

The functional of the problem (13) can be written as

$$\iint_{\Omega} f(\nabla u(x, y)) dx dy + \iint_{\Omega} u(x, y)^2 dx dy \quad (14)$$

The integral in the domain Ω of $u(x, y)$ squared can be replaced as a product of coefficients by a constant matrix that represents the integral over the domain. We are considering that the admissible function u can be expressed as a linear combination of the members of a local approximation base: $u = \sum_{j=1}^n c_j \phi_j$. Then the problem can be written as

$$\min_c \iint_{\Omega} f\left(\sum_{j=1}^n c_j \nabla \phi_j(x, y)\right) dx dy + c^T \Gamma c \quad (15)$$

where c is an $n \times 1$ vector that represents coefficients, which are design variables of the problem, Γ is an $n \times n$ matrix that represents the integrals over the surface defined by the supports of the base functions ϕ_j , and n is the number of nodes present in the mesh.

As the discretization of the problem (15) is carried out to write it as a mathematical program, we use a plan of integration by sums and the program will be

$$\min_c \sum_{k=1}^n A_k f(\nabla u(e_k)) + c^T \Gamma c. \quad (16)$$

where e_k represents the k -th element, A_k represents the area of the element and n is the number of basic elements present in the surface.

Next we carry out a finite element description for the case of 16 elements (division in 2 rows and 2 columns), then for 36 elements (division in 3 rows and 3 columns) and finally we will make an algorithmic generalization of the method and will show cases of 25 elements, 100 and 400 elements.

4.1 16 mesh elements

We take the particular case where the mesh of figure 1 is composed of 16 basic elements. Figure 2 shows the distribution of the 16 elements and the numbering we will use to refer to each one, also the numbering that will be used as reference for each node associated to the mesh.

It fits to remind the reader that we are solving the problem where the value in the border equals zero and therefore the value that node 5 will take will be 0. In spite of that, the numbering is adapted and node 5 will be considered as a fake node.

The area of each element of figure 2 corresponds to the area of a triangle with base $1/2$ and height $1/4$ therefore the area of each element is

$$A_k = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4}}{2} = \frac{1}{16}$$

To complete the formulation of the problem (16) we must find the components of the matrix Ω

$$\Gamma_{i,j} = \iint_{\Omega} \phi_i \phi_j dx dy$$

Considering only one element (see figure 3), we can calculate the integral as

$$\Gamma_{ii} = 4 \int_0^{\frac{1}{4}} \int_x^{\frac{1}{2}-x} 16x^2 dx dy = \frac{1}{24} \quad \forall i = 1, 3, 4, 6 \quad (17)$$

The rest of the elements are calculated the same way but the shape functions change in accordance with the node being analyzed. The value that represents the interaction between node 2 and nodes 3, 4 and 6 can be expressed as

$$\begin{aligned} \Gamma_{1,2} &= \Gamma_{2,1} = \Gamma_{3,2} = \Gamma_{2,3} = \Gamma_{2,4} = \Gamma_{4,2} = \Gamma_{2,6} = \Gamma_{6,2} \\ &= 2 \int_0^{\frac{1}{4}} \int_x^{\frac{1}{2}-x} (4x)(1 - 2x - 2y) dx dy \\ &= \frac{1}{96}. \end{aligned} \quad (18)$$

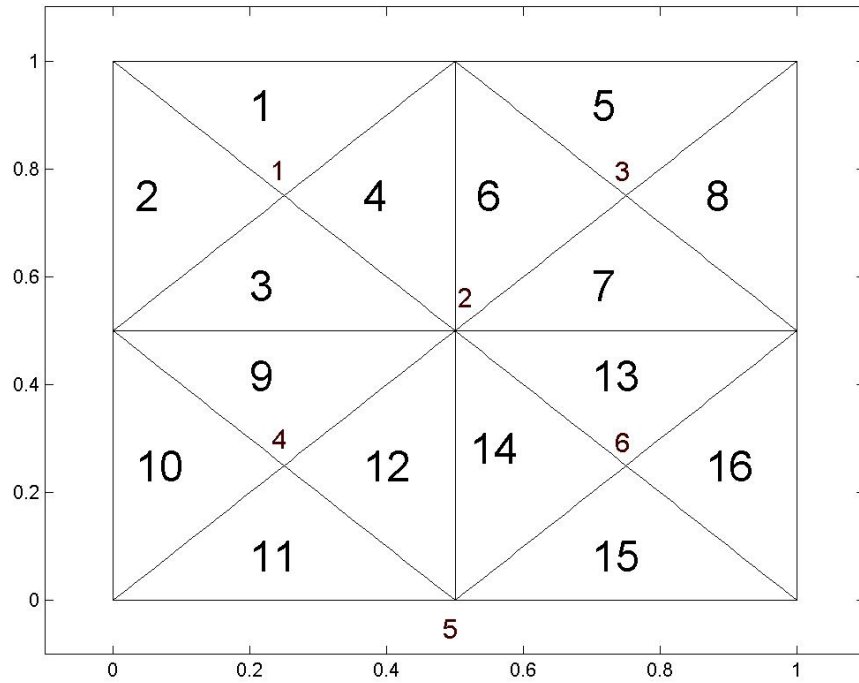


Figure 2: Basic elements 2×2 structure

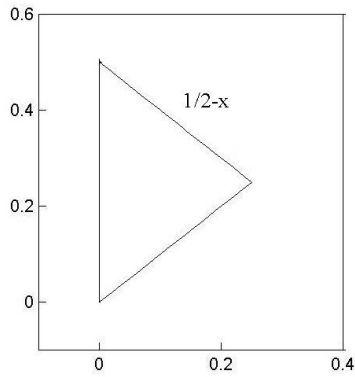


Figure 3: Basic element

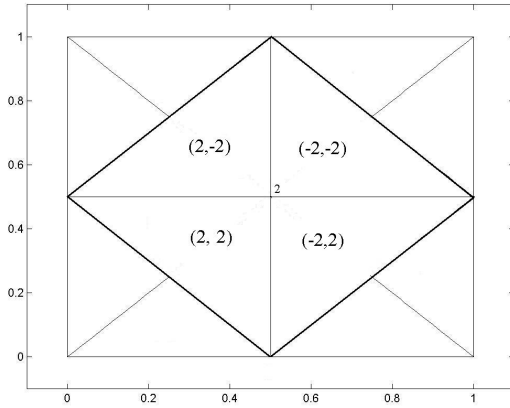
Finally we calculate the value of Γ_{22} , since this node is the node of interconnection with the rest, and must be assigned a value different from that of Γ_{ii} :

$$\begin{aligned} \Gamma_{22} &= 8 \int_0^{\frac{\sqrt{2}}{4}} \int_x^{\frac{\sqrt{2}}{4}} 8x^2 dx dy \\ &= \frac{1}{12}. \end{aligned} \tag{19}$$

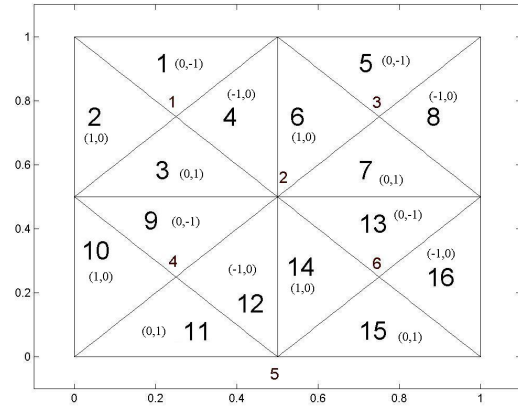
With equations (17), (18) and (19) we can write Γ as

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{1}{24} & \frac{1}{96} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{96} & \frac{1}{12} & \frac{1}{96} & \frac{1}{96} & 0 & \frac{1}{96} \\ 0 & \frac{1}{96} & \frac{1}{24} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{96} & 0 & \frac{1}{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{96} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{24} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Now, we must define the values of the gradients of each element associated to the constraints to formulate completely the mathematical program. Figures 4(a) and 4(b) show the gradients assigned to each element.



(a) Joint gradients



(b) Gradients by element

Figure 4: Gradients of the elements

Mathematically they can be written as

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} g_1^x \\ g_1^y \end{bmatrix} &= C_1 \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_2^x \\ g_2^y \end{bmatrix} &= C_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} g_3^x \\ g_3^y \end{bmatrix} &= C_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} 2 \\ -2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_4^x \\ g_4^y \end{bmatrix} &= C_1 \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} 2 \\ -2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} g_5^x \\ g_5^y \end{bmatrix} &= C_3 \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_8^x \\ g_8^y \end{bmatrix} &= C_3 \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} g_6^x \\ g_6^y \end{bmatrix} &= C_3 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} -2 \\ -2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_7^x \\ g_7^y \end{bmatrix} &= C_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} -2 \\ -2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} g_{10}^x \\ g_{10}^y \end{bmatrix} &= C_4 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_{11}^x \\ g_{11}^y \end{bmatrix} &= C_4 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} g_9^x \\ g_9^y \end{bmatrix} &= C_4 \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_{12}^x \\ g_{12}^y \end{bmatrix} &= C_4 \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} g_{15}^x \\ g_{15}^y \end{bmatrix} &= C_6 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_{16}^x \\ g_{16}^y \end{bmatrix} &= C_6 \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} g_{13}^x \\ g_{13}^y \end{bmatrix} &= C_6 \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} -2 \\ 2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} g_{14}^x \\ g_{14}^y \end{bmatrix} &= C_6 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} -2 \\ 2 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

These constraints along with the functional

$$\min_c \sum_{k=1}^{16} \frac{1}{16} f(g_k) + \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{24} & \frac{1}{96} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{96} & \frac{1}{12} & \frac{1}{96} & \frac{1}{96} & 0 & \frac{1}{96} \\ 0 & \frac{1}{96} & \frac{1}{24} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{96} & 0 & \frac{1}{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{96} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{bmatrix} \quad (21)$$

define completely the mathematical program adequate for this case.

Here $f(g_k)$ is a non convex function defined by (12), therefore the mathematical program (21) must be tackled with the relaxation methods studied for non convex polynomials. To face the convexity problem we use the theory of convex hulls presented in the previous section.

Next we put forward the case for 36 elements that corresponds to dividing the structure in 3 rows and 3 columns.

4.2 36 mesh elements

The case of 36 elements in a mesh is another particular case, which corresponds to the structure in figure 5.

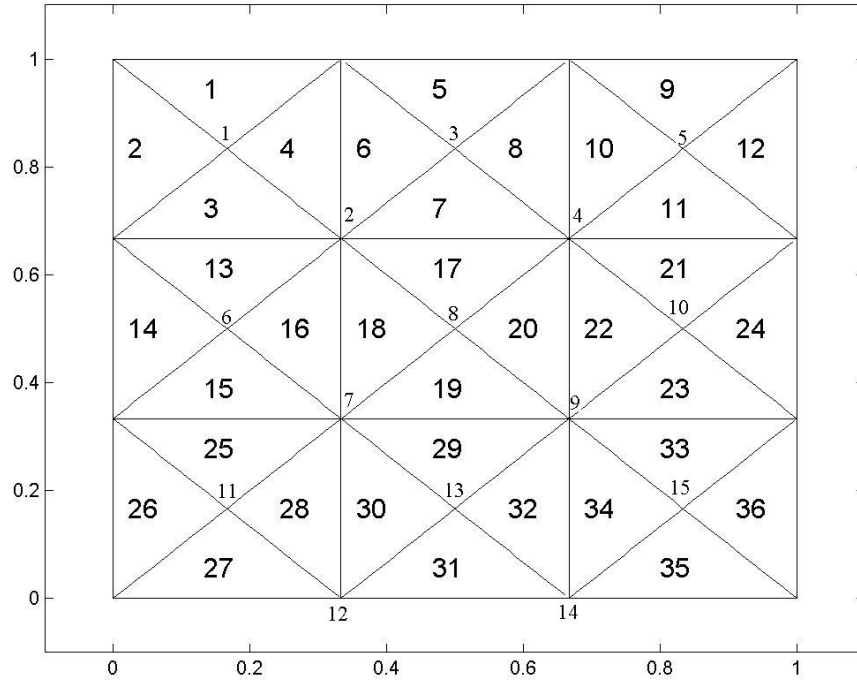


Figure 5: 36 elements structure

As in the previous problem we use a numerical notation and given we are assuming the border conditions equal zero ($g = 0$), nodes 12 and 14 are fictitious and are used to define a numbering algorithm.

The 36 elements we use come from triangle shaped basic elements within the domain of Ω previously defined. As for 16 elements, we must define the mathematical program and therefore the discretization matrix Γ with $n = 15$ and $N = 36$, as well as the 36 constraints of the problem.

We begin defining the structure of the elements that correspond to the nodes in the diagonal of matrix Γ and are independent of the other elements:

$$\Gamma_{ii} = 4 \int_0^{\frac{1}{6}} \int_x^{\frac{1}{3}-x} 36x^2 dx dy = \frac{1}{54} \quad \forall i = 1, 3, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 15 \quad (22)$$

Now we define the nodes that are dependent of other nodes:

$$\begin{aligned} \Gamma_{22} = \Gamma_{44} = \Gamma_{77} = \Gamma_{99} &= \int_0^{\frac{\sqrt{2}}{6}} \int_x^{\frac{\sqrt{2}}{6}} 18x^2 dx dy \\ &= \frac{1}{27} \end{aligned} \quad (23)$$

and the remaining nodes:

$$\begin{aligned}
 \Gamma_{1,2} &= \Gamma_{2,1} = \Gamma_{3,2} = \Gamma_{2,3} = \Gamma_{4,5} = \Gamma_{5,4} = \Gamma_{2,6} = \Gamma_{6,2} = \\
 \Gamma_{8,4} &= \Gamma_{4,8} = \Gamma_{10,4} = \Gamma_{4,10} = \Gamma_{7,6} = \Gamma_{6,7} = \Gamma_{7,8} = \Gamma_{8,7} = \\
 \Gamma_{9,10} &= \Gamma_{10,9} = \Gamma_{11,7} = \Gamma_{7,11} = \Gamma_{7,13} = \Gamma_{13,7} = \Gamma_{9,13} = \Gamma_{13,9} = \\
 \Gamma_{9,15} &= \Gamma_{15,9} = 2 \int_0^{\frac{1}{6}} \int_x^{\frac{1}{3}-x} (6x)(1-3x-3y) dx dy = \frac{1}{216}.
 \end{aligned} \tag{24}$$

And matrix Γ for this case is defined as

$$\Gamma = \begin{bmatrix}
 \frac{1}{54} & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{216} & \frac{1}{27} & \frac{1}{216} & \frac{1}{216} & 0 & \frac{1}{216} & \frac{1}{216} & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{216} & \frac{1}{54} & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{216} & \frac{1}{216} & \frac{1}{27} & \frac{1}{216} & 0 & 0 & \frac{1}{216} & \frac{1}{216} & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{1}{216} & \frac{1}{54} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{54} & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{216} & \frac{1}{27} & \frac{1}{216} & \frac{1}{216} & 0 & \frac{1}{216} & 0 & \frac{1}{216} & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{216} & 0 & \frac{1}{216} & 0 & 0 & \frac{1}{216} & \frac{1}{54} & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{1}{216} & 0 & 0 & \frac{1}{216} & \frac{1}{216} & \frac{1}{27} & \frac{1}{216} & 0 & 0 & \frac{1}{216} & 0 & \frac{1}{216} \\
 0 & 0 & 0 & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{216} & \frac{1}{54} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{54} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{216} & 0 & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{54} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{216} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{54}
 \end{bmatrix} \tag{25}$$

As in the previous case we must define the values of the gradients that represent the constraints of the mathematical program. Figures 6(a) and 6(b) show the gradients assigned to each element.

And 72 linear constraints are obtained, distributed as

$$\begin{aligned}
 g_k^x & \quad \forall k = 1, \dots, 36 \\
 g_k^y & \quad \forall k = 1, \dots, 36
 \end{aligned} \tag{26}$$

This way we define the mathematical program as

$$\begin{aligned}
 \min_c \quad & \sum_{k=1}^{36} \frac{1}{36} f(g_k) + c^T \Gamma_{15 \times 15} c \\
 \text{s.t.} \quad & g_k^x = \sum_{i=0}^1 5C_i v_i^x, \quad g_k^y = \sum_{i=0}^1 5C_i v_i^y, \\
 & (v_i^x, v_i^y) \in \left\{ \left(\frac{6}{\sqrt{2}}, -\frac{6}{\sqrt{2}} \right), \left(-\frac{6}{\sqrt{2}}, -\frac{6}{\sqrt{2}} \right), \left(\frac{6}{\sqrt{2}}, \frac{6}{\sqrt{2}} \right), \left(-\frac{6}{\sqrt{2}}, \frac{6}{\sqrt{2}} \right) \right\}
 \end{aligned} \tag{27}$$

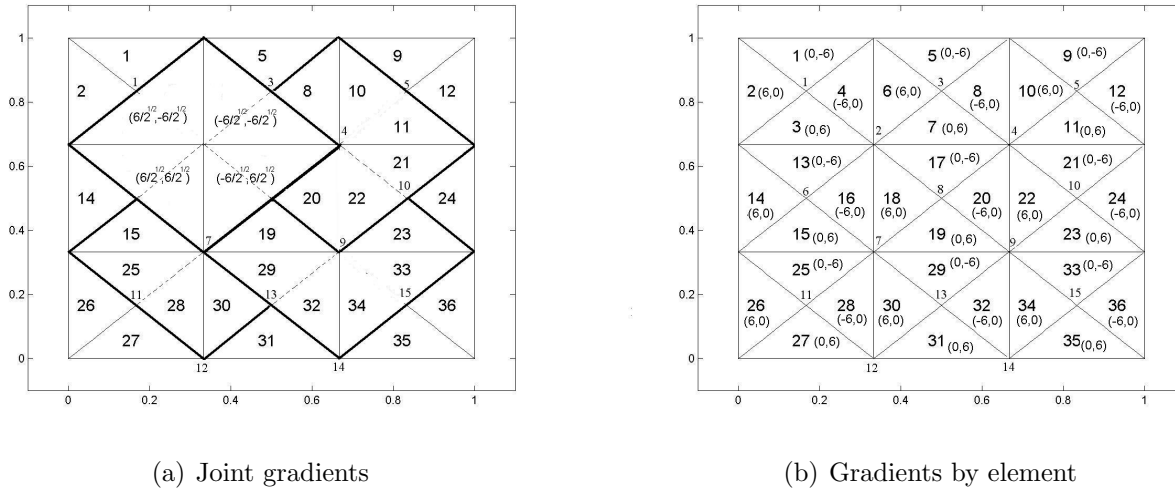


Figure 6: Gradients of the 36 elements

Acknowledgments

- Author wishes to thank INTERNATIONAL CENTER FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING (CIMNE) in Barcelona, Spain and AULA CIMNE network in Latin America. The author is also grateful to Juana Vall-Serra for extraordinary support and help in \LaTeX tipping, translation, \LaTeX edition, supervision and advice on Scientific English usage and style and Dr. Diego Patiño for helping in numerical experiments.
- Dr. Eugenio Oñate, Centro Internacional de Métodos Numéricos, Barcelona.
- Dr. Tomáš Roubíček, Universidad Carlos IV, Praga.
- Dr. Pablo Pedregal, Universidad de Castilla-La Mancha.
- Dr. Ernesto Aranda, Universidad de Castilla-La Mancha.
- Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología, Banco de la República, Colombia.
- Sun Microsystems.
- Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes.
- Departamento de Matemáticas, Universidad de los Andes.

REFERENCES

- [1] R. Curto and L. A. Fialkow, *Recursiveness, positivity and truncated moment problems*, Houston Journal of Mathematics (1991).
- [2] ———, *Solution of the truncated complex moment problem for flat data*, Memoirs of the AMS (1996).
- [3] ———, *The truncated complex k -moment problem*, Transactions of the AMS (2000).
- [4] J. Lasserre, *Global optimization with polynomials and the problem of moments*, SIAM J. Optim. (2001).
- [5] ———, *Semidefinite programming vs. LP relaxations for polynomial programming*, Annals of Operations Research Journal (2002).
- [6] R. Meziat, *El método de los momentos para problemas variacionales no convexos*, Ph.D. thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2001.
- [7] ———, *Analysis of non convex polynomial programs by the method of moments*, Frontiers in Global Optimization, Kluwer, 2003.
- [8] ———, *Analysis of two dimensional nonconvex variational problems*, Optimization and Control with Applications, Springer, 2005.
- [9] R. Meziat and D. Patiño, *Exact relaxation of non-convex variational problems*, Optimization Letters (2007).
- [10] R. Meziat, J. Villalobos, and D. Patiño, *Cálculo de microestructuras mediante relajación de problemas variacionales no convexos*, Tech. report, Proyecto de Investigación 1596, Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología, 2004.
- [11] L. C. Young, *Lectures on the calculus of variations and optimal control theory*, W. B. Saunders Co., 1969.

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN LA ESTRUCTURA DEL ROTOR DE UN GENERADOR ELÉCTRICO

Pablo J. Roa

Jesús M. García

pablo.roa@unet.edu.ve

jmgarcia@unet.edu.ve

Laboratorio de Prototipos, Universidad Nacional Experimental Del Táchira
Avenida Universidad, Paramillo, San Cristóbal-Venezuela

Resumen: *Este estudio se realizó en una Central Hidroeléctrica venezolana, donde se encuentra fuera de servicio una Unidad Generadora, debido a la presencia de fallas mecánicas originadas por la propagación de grietas y fisuras en la estructura o rayo del rotor, dejándose de producir 60 MW que se venían generando en esta unidad. A raíz de ello se desarrolla este trabajo que se puede dividir en 3 etapas: La cuantificación de las fallas en la estructura, la búsqueda de las causas que propiciaron dichas fallas y la generación de propuestas de solución para la recuperación de la Unidad Generadora. Para la cuantificación de las fisuras y grietas presentes en el rotor, se realizó una defectoscopia sobre la estructura que consistió en la aplicación de pruebas de líquidos penetrantes. Se encontró una gran cantidad de grietas especialmente ubicadas en las zonas contiguas a unos refuerzos que fueron adicionados a la estructura en una reparación anterior. A partir de ello, se realizaron y/o analizaron otras pruebas para encontrar la causa probable de la falla. Dichas pruebas consistieron en: mediciones de la circularidad del rotor, mediciones del centrado del conjunto turbina-eje-rotor, mediciones del centrado del estator con respecto al rotor y análisis estático de esfuerzos utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF). Después de realizar estas pruebas se determinó en primer lugar, que existe una desalineación en el eje del rotor con el consecuente descentrado del mismo respecto al estator; y en segundo lugar, una concentración de esfuerzos en la zona donde se produjo la falla causada por los refuerzos adicionales colocados en una reparación anterior realizada en el año 2008. La última etapa de este trabajo consistió en el dimensionamiento de un nuevo rotor para la Unidad Generadora, el cual contiene algunos elementos mecánicos nuevos de refuerzo que permitirán a la estructura distribuir mejor los esfuerzos y funcionar con la capacidad de potencia instalada en la unidad. Para esta propuesta se aplicó un análisis estático de esfuerzos utilizando MEF como primer paso para el diseño completo del nuevo rotor de dicha unidad generadora.*

Palabras clave: Falla mecánica, Grietas, Análisis de esfuerzos, Método de Elementos Finitos.

1. INTRODUCCIÓN

En una central hidroeléctrica venezolana, se encuentra fuera de servicio una unidad generadora, por presentar altas vibraciones en su eje, aparición de grietas y fisuras en la estructura o rayo del rotor (anillo de frenado y costillas). Esto trajo como consecuencia la pérdida de 60 MW que venía generando esta unidad. La superintendencia de la Central ha decidido recuperarla, por lo que se hizo necesario realizar un proyecto de rehabilitación para la estructura del rotor, en el que se requirió de un estudio donde se determinó la causa raíz del problema, siendo necesario indagar minuciosamente en el montaje y centrado del eje, para dar solución a la recuperación del generador, al proponer soluciones de rehabilitación.

El historial de fallas de este rotor que originalmente estaba diseñado para generar 150 MW, data desde el año 2007, cuando a raíz de la generación de fuertes ruidos y altas vibraciones, se realizó un mantenimiento mayor en la máquina. En este procedimiento se evidenció mediante una inspección, el desprendimiento de un soporte "T" (soporte de la estructura) el cual produjo roce entre los polos y el estator, provocando grietas en el anillo de frenado. En consecuencia, una contratista externa recomendó la extracción de 24 soportes "T" y la reparación del anillo de frenado. Posteriormente al final de ese año se encontró, durante otra inspección de mantenimiento preventivo, la aparición de grietas en las costillas de la araña, sobre todo en el canal de la cuña de soporte del laminado. Debido a esto se instalaron nuevamente 16 soportes "T" en los brazos de la araña que se habían retirado anteriormente, para distribuir el peso de los polos y del anillo magnético entre la Cuña Central y los soportes.

A continuación en el año 2008, se presentaron nuevas grietas en el anillo de frenado, lo que dio lugar a una segunda reparación de dicho anillo y la instalación de 32 refuerzos por parte de la empresa, quedando la unidad disponible para el sistema eléctrico nacional limitada a 80 MW. Además, durante el año 2009, se presentaron nuevas grietas en el anillo de frenado y en los refuerzos, por lo que se hizo la tercera reparación del rotor, en donde se realizó la sustitución de 24 refuerzos del anillo de frenado por presentar grietas y 4 secciones en el anillo de frenado. La Unidad Generadora quedó limitada a 60 MW para el Sistema Eléctrico Nacional siendo utilizada en las horas pico o en caso de emergencia, ejecutándose una inspección visual al rotor mensualmente o después de cada disparo de emergencia de la Unidad. Por último, en el año 2010, nuevamente se detectaron grietas en el anillo de frenado, en los refuerzos y en las secciones del anillo que fueron sustituidas, dichas grietas se habían extendido, lo que ocasionó la parada indefinida de la Unidad Generadora.

2. DESCRIPCIÓN DEL ROTOR ESTUDIADO

La estructura del rotor está fabricada con acero ASTM A36 (de acuerdo a un estudio realizado por una contratista externa). Está compuesta por dos discos que están unidos por medio de ocho brazos (alabes) los cuales tienen en sus extremos unas costillas que sirven para sujetar o acoplar la estructura a la corona donde van los polos magnéticos (ver Fig. 1). Los discos van unidos por medio de soldadura a los brazos; adicionalmente, en un anillo de frenado va unido al disco inferior, el cual tiene como función reforzar la zona donde está colocada la zapata de frenado, para absorber los esfuerzos que sufre la estructura al momento de una parada o salida del sistema. La estructura está unida al eje mediante pernos en la zona de acople ubicada en el centro del disco inferior.

Para determinar el estado actual de la estructura se realizó un estudio mediante la inspección de la misma realizando pruebas con líquidos penetrantes y siguiendo la técnica descrita por Echevarria [1]. En este estudio se preparó la superficie a analizar mediante la aplicación de abrasivos para dejar la superficie sin pinturas, es decir, al brillo del metal. En algunos sitios se procedió a aplicar líquido penetrante y luego líquido revelador (donde se presumía la existencia de grietas), en las áreas donde se observaron fisuras y fracturas

completas simplemente se realizó una inspección visual. Las zonas preparadas para el estudio fueron las siguientes: Costillas del rotor, refuerzo del anillo de frenado, zonas de soldadura en los brazos del rotor y esfuerzos adicionales entre los alabes y el anillo de frenado.

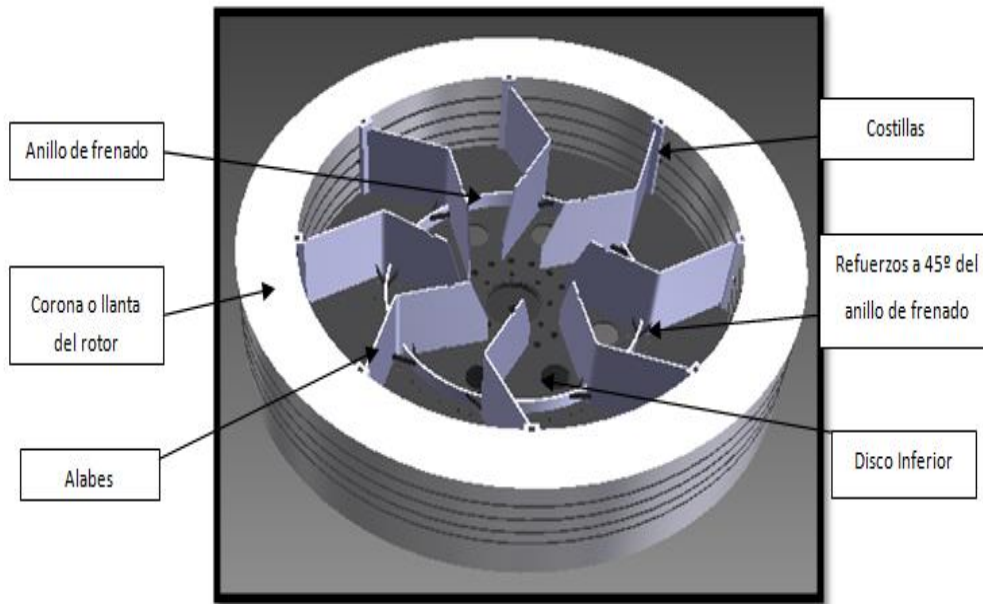


Figura 1. Rotor mostrando sus partes (el disco superior se ha retirado para mejor visualización)

Se detectaron grietas de tamaño y profundidad significativa en todos los elementos mencionados (Fig. 2). A simple vista se distinguieron fracturas y desplazamientos relativos del material en los refuerzos del anillo de frenado adicionales, también existen grietas en las costillas del rotor a la altura de las chavetas cuya función es impedir el desplazamiento vertical de la corona con respecto a la estructura del rotor. Reuniendo toda la información obtenida en la defectoscopia y plasmándola en un mismo gráfico, se puede observar la posición de las grietas en la estructura del rotor en la Fig. 3.

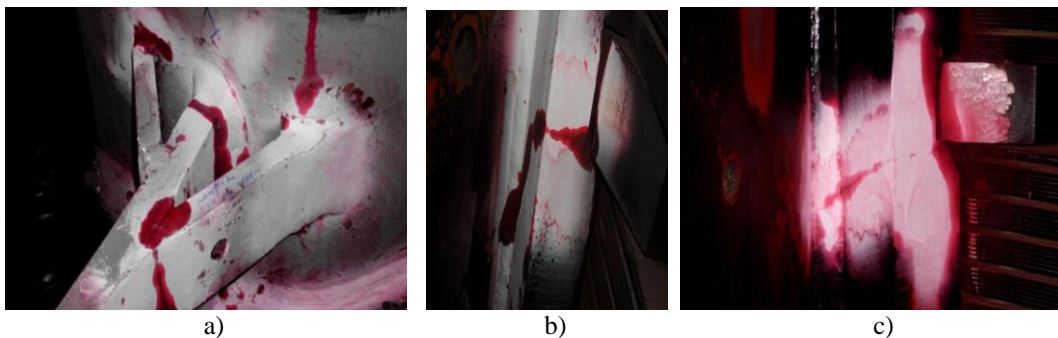


Figura 2. Fisuras y grietas detectadas en diversas partes del rotor. a) En los refuerzos del anillo de frenado. b) y c) En la zona de la cuña de soporte.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLA

Para establecer las causas que originaron el deterioro de la estructura del rotor fue necesario realizar una serie de procedimientos para cuantificar variables importantes en la estructura lo que permitió estimar la causa probable de falla. Para ello se realizaron los siguientes análisis y pruebas:

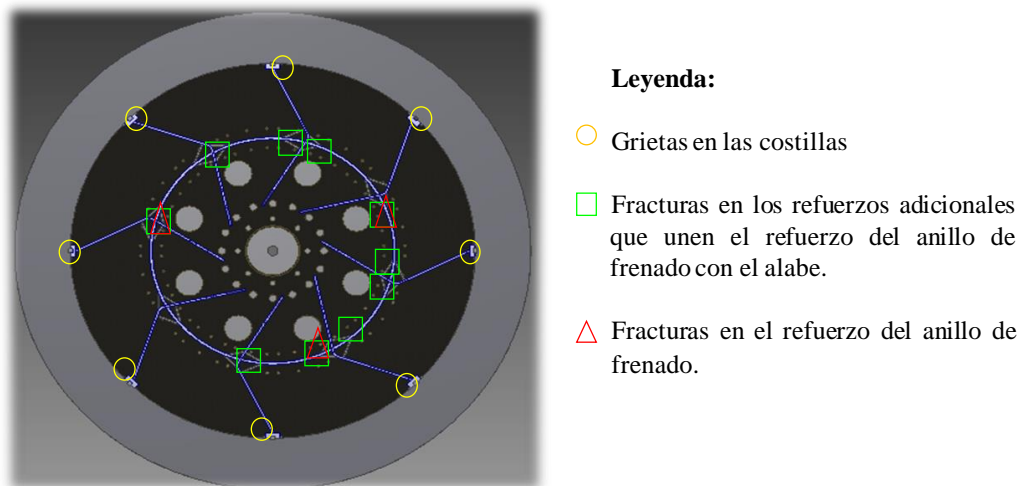


Figura 3. Distribución de Grietas y Fracturas en el rotor

Circularidad del rotor. Los estudios realizados determinaron que la circularidad está dentro de los límites permitidos por el fabricante (diferencia en las desviaciones $\leq 3\text{mm}$). Las medidas fueron tomadas mediante una cuerda de piano ubicada en el centro del rotor, con la ayuda de un micrómetro puesto en una barra larga. De acuerdo con la información obtenida, se puede concluir que es descartable la posibilidad de que se presentaron fuertes vibraciones o algún desbalance de la estructura por motivos de una circularidad deficiente, ya que se midieron desviaciones de 16.5 mm en el radio más corto y 19mm en el más largo, con una diferencia entre ambas de 2.5mm, menor que la máxima permitida por el fabricante.

Centrado del conjunto turbina-eje-rotor. Se procedió a verificar con un micrómetro, el centrado del eje tanto en el cojinete de la turbina como en el cojinete del generador. Para ello se midió la distancia desde el eje hasta la ménsula del cojinete en distintas posiciones angulares alrededor del eje. Se encontró que existe un desplazamiento del eje con respecto al centro de la ménsula en ambos cojinetes.

Respecto al cojinete de turbina, el eje se encontró desplazado aguas abajo y a la izquierda. De acuerdo con las mediciones hechas, las medidas máximas y mínimas que se obtuvieron son $3.53\ \mu\text{m}$ y $2.13\ \mu\text{m}$ respectivamente; La diferencia entre ambas medidas tiene un valor de $1,4\ \mu\text{m}$ la cual está por encima del límite especificado por el diseñador ($\leq 0,4\ \mu\text{m}$). En el cojinete de empuje o del generador se observó un desplazamiento del eje aguas arriba y a la derecha. En este caso, las medidas máximas y mínimas que se obtuvieron son $1.21\ \mu\text{m}$ y $0.99\ \mu\text{m}$ con una diferencia entre medidas de hasta $0,22\ \mu\text{m}$ la cual es mayor que la permitido por el fabricante ($\leq 0,1\ \mu\text{m}$).

Centrado del estator con respecto al rotor. Se procedió a verificar el centrado del estator, para ello se colocó la cuerda de piano sobre un bastidor ubicado en la ménsula superior del generador, centrando la cuerda con respecto al eje (ya centrado). Una vez centrada la cuerda se procedió a medir el centro del estator con respecto al centro de la máquina, en cuatro alturas diferentes del estator, tal y como lo indica el fabricante en el manual de montaje del generador. Se encontró un desplazamiento considerable ($1.66\ \mu\text{m}$) y fuera de tolerancia ($\pm 0,9\ \mu\text{m}$) con dirección a aguas arriba y a la derecha. La alineación del estator es un factor determinante en el buen funcionamiento del generador, su mal montaje puede traer como consecuencia el roce con el rotor y desalineación del campo magnético que pueden llevar a la destrucción parcial o total de la unidad generadora.

Análisis de esfuerzos. Se realizó un análisis estático de los esfuerzos en la estructura del rotor. Para ello se utilizó una herramienta CAD, el cual contiene un simulador basado en el Método de Elementos Finitos (MEF) con el cual se analizó toda la estructura y se

determinó a través de dicho análisis, los puntos donde existen concentración de esfuerzos y otras zonas críticas donde la estructura pueda presentar falla. Es importante considerar que se hicieron dos análisis de esfuerzos tomando el modelo CAD de la estructura después de la última reparación. En el primer análisis hecho, se consideraron las condiciones de trabajo nominal, es decir, la máquina trabajando a plena carga (150 MW), pero la unidad venía funcionando con una capacidad máxima de 60 MW desde la incorporación de los refuerzos en el anillo de frenado, por lo cual se hizo un segundo análisis para esta condición.

Al simular la estructura con en el primer caso (150 MW), el rotor soportaba un torque mecánico de 6366723 N.m. Para dicha carga se encontró un esfuerzo Von Mises máximo de 431 MPa, con un factor de seguridad de 0.64. En la segunda simulación (60MW), se cargó la estructura con un torque de 2546581,2 N.m. Se encontró el esfuerzo Von Mises máximo con un valor de 237 MPa y un factor de seguridad de 1.18 (ver Fig. 4), en las otras partes de la estructura del rotor se presentaron factores de seguridad mayores a 4. Con estos resultados se evidencia la decisión acertada de la empresa, al limitar la potencia de generación para dicha estructura a 60 MW después de las reparaciones hechas al rotor.

Cabe destacar que, al detallar los resultados obtenidos, se encontró que los máximos esfuerzos de la estructura están ubicados en los refuerzos adicionales del anillo de frenado, comprobando así que dichos refuerzos adicionales actuaron como concentradores de esfuerzos y los puntos más propensos a la falla. Esta hipótesis queda demostrada al estudiar la posición de las fracturas encontradas durante el estudio de defectoscopia, ya que estas fallas están ubicadas en su mayoría en los refuerzos adicionales, lo cual concuerda con los resultados de la simulación.

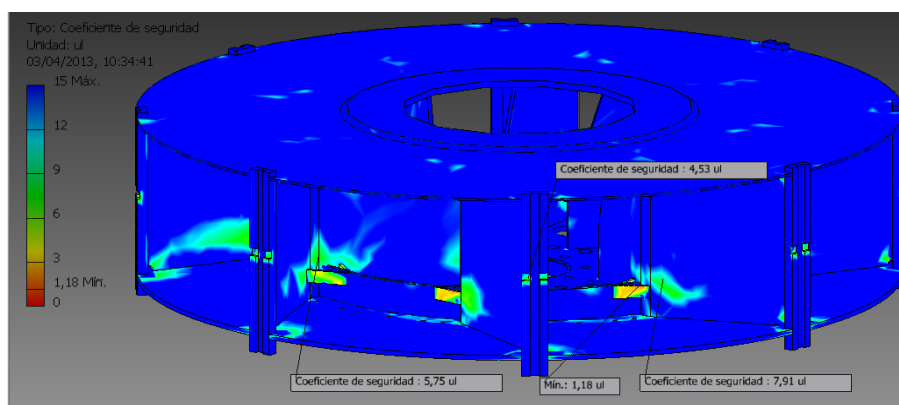


Figura 4. Simulación del rotor mostrando el factor de seguridad en la estructura analizada.

Después del análisis hecho, se presume que la causa-raíz que originó el deterioro de la estructura fue en parte por el mal montaje del generador, que originó una desalineación en la máquina que trajo como consecuencia esfuerzos variables en la estructura y por consiguiente el deterioro de la misma por el mecanismo de fatiga, evidenciado por la aparición de grietas (Budynas & Nisbett, [1]). Adicionalmente, el deterioro de anillo de frenado fue acelerado por los refuerzos adicionales colocados en una reparación realizada en el año 2008 que actuaron como concentradores de esfuerzos [2] en la zona donde se produjo la falla.

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Se presenta el caso de rehabilitación de una unidad generadora perteneciente a una central hidroeléctrica venezolana, en la que se desea la puesta en operación de dicha unidad con la recuperación de su capacidad total (150 MW). Para esto, es necesaria la sustitución de la estructura del rotor (araña del rotor), de igual forma es necesario el debido mantenimiento y centrado del conjunto turbina-eje-rotor como también el centrado del estator, debido a que la

falla presentada en la estructura presumiblemente fue causada por la desalineación del conjunto y el mal centrado del estator.

Para la rehabilitación del rotor, se diseñaron 3 propuestas de las cuales se seleccionó como mejor alternativa, un rotor que deberá contar con 16 soportes (modelo sugerido por un fabricante) y 16 costillas nuevas con la misma forma y dimensiones del modelo original. Estos 32 elementos permitirán distribuir el peso de los polos y la corona. Para esta nueva estructura, se hizo un análisis estático de esfuerzos utilizando MEF. Se cargó la estructura con un torque de 6366723 N.m. (torque al generar 150 MW). Los resultados de la simulación arrojaron un esfuerzo máximo ubicado en el disco inferior con un valor de 205.6 MPa y el factor de seguridad de la estructura de 1.36 (ver Fig. 5)

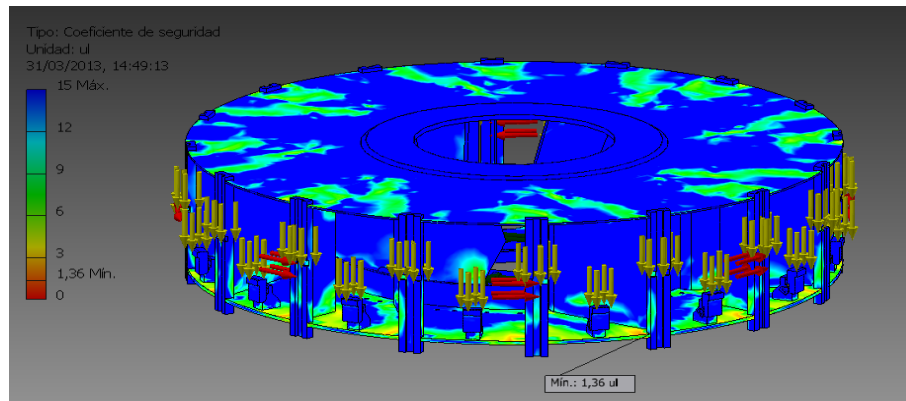


Figura 5. Simulación del nuevo rotor propuesto mostrando el factor de seguridad en la estructura analizada.

5. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio detallado de la estructura del rotor determinándose que el deterioro del mismo fue causado en principio por el mal montaje del generador que originó una desalineación en la máquina y trajo como consecuencia esfuerzos variables en la estructura que propiciaron la fatiga del material. De igual forma se encontró que un rediseño de la estructura realizado en reparaciones anteriores y que consistió en la colocación de los refuerzos adicionales en el anillo de frenado, produjo concentradores de esfuerzos en la zona donde se generó la falla.

Se especificó una alternativa de sustitución, la cual permite distribuir el peso equitativamente en la estructura con lo cual el rotor soportará más eficientemente los esfuerzos al generar la potencia instalada para la unidad (150 MW). Al rotor propuesto se le realizó un análisis estático de esfuerzos utilizando MEF determinándose que la estructura es segura. Como trabajos futuros, se espera implementar otros análisis sobre la estructura (fatiga, modal) para asegurar que el diseño propuesto sea seguro y no falle durante su vida útil estimada.

6. REFERENCIAS

- [1] Echevarria, R. *Líquidos penetrantes*. Universidad Nacional de Comahue. <http://www.sistendca.com/DOCUMENTOS/LP.pdf> [Consulta: Febrero 2013]
- [2] Budynas, R. & Nisbett, K., *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. McGraw Hill, 2008.
- [3] Hamrock, B., Jacobson, B. & Schmid, S. *Elementos de máquinas*. McGraw Hill, 2000

FATIGUE LIFE AND DYNAMIC BEHAVIOR OF SUBMARINE PIPELINES SUBJECTED TO SLUG FLOW AND VORTEX-INDUCED VIBRATIONS

Boris Bossio

Armando Blanco

Euro Casanova

bossiob@usb.ve

ajblanco@usb.ve

ecasanov@usb.ve

Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica, Caracas 1080- A, Venezuela

Abstract. *This article summarizes and describes the evolution of several studies on fatigue life prediction due to slug flow and vortex-induced vibration in submarine pipelines, carried out by the fluid-structure research group of the Universidad Simón Bolívar since 2008 and until the present date. The research responds to the fact that the world will continue to be largely dependent on fossil fuel in the medium term, looking for better ways of transporting oil from subsea facilities to land avoiding accidents due to pipeline ruptures associated with material fatigue. The focus is on the creation, development and improvement of numerical models used to study fatigue life and dynamic behavior of submarine pipelines subjected to an internal slug flow and VIV due to external flow. Models based on Finite-Element Method and Finite Differences were developed to reproduce the phenomenon of slug flow in a submarine pipeline. Some features of the proposed models include the use of Fourier expansion series to reduce computational costs, taking into account soil's non-linearity effects and applications on both, risers and horizontal pipelines. These numerical models allowed to include simultaneously effects of both internal and external flow to predict more accurately the fatigue damage in submarine pipelines.*

Keywords: Vortex-Induced Vibration, Fatigue-Life, Submarine-Pipelines, Slug Flow, Dynamic Behavior.

1. INTRODUCTION

In some cases, depending on flow conditions, when a slender structure interacts with an external fluid flow, an induced motion in the body can be produced. This motion, known as

vortex-induced vibration (VIV) appears frequently in some engineering fields. In the design of ocean and offshore structures, the consideration of VIV effects on fatigue life is relevant.

VIV has been studied for several years. Williamson & Govardhan [1] had summarized fundamental results and discoveries concerning VIV on the last two decades. The practical significance of VIV has led to a large number of fundamental studies, many of which are discussed in the comprehensive reviews by Blevins [2]. One of the most interesting cases from a practical point of view of VIV appears in offshore pipelines (horizontal, inclined and risers), structures which are suspect to experience the effects of submarine currents (external flow) that would produce unwanted oscillatory movements that could impact their anchorage, the operation of devices attached to them, and the structures themselves.

In this article, the authors present the highlights and describe briefly the evolution of several studies on fatigue life prediction due to slug flow and vortex-induced vibration in submarine pipelines, carried out by the fluid-structure research group of the Universidad Simón Bolívar since 2008. The development and improvement of several numerical models used to study fatigue life and dynamic behavior of submarine pipelines subjected to an internal slug flow and VIV due to external flow are described. In the following section, it is shown the five-years evolution of the numerical models, beginning with the development of a Finite Element (FE) model able to reproduce the phenomenon of slug flow in a submarine pipe [3], which was optimized taking advantage of the periodicity of slug flow using Fourier expansion series to reduce computational costs [4]. Later, soil's non-linearity effects on the dynamic behavior and fatigue life of pipeline was included [5]. More recently a model based on finite-difference schemes was developed in order to study the VIV phenomenon on riser pipelines [6], and the dynamical interaction between slug flow and VIV in horizontal submarine pipelines.

2. NUMERICAL MODEL EVOLUTION

When a fluid encounters an object in its path, it slows down –as long the fluid is in contact with the object- and a boundary layer is formed. In the case of a cylinder, the formed boundary layer would try to surround it and at some point, the boundary layer will separate from the cylinder's surface, due to excessive curvature, and this situation will promote the formation of vortexes. Under some particular flow conditions, vortexes detach in a non-symmetrically way from the cylinder's symmetry plane, producing different lift forces at the two sides of the cylinder; this fact originates a resultant global lift force acting on the cylinder, inducing structure displacement mainly in the transversal direction to the fluid flow. The generated transversal movement changes the vortexes formation nature in a way that vibration amplitude is limited, in most cases. At low Reynolds' number values, current lines are expected to be symmetrical. However, when flow regime becomes less laminar or turbulent, the asymmetry in path lines will be more evident and vortexes will form. The basic equation of movement that represent VIV phenomenon in a cylinder oscillating in the transverse (normal to the flow) direction is:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F \quad (1)$$

where m represents the structural mass, c is related to the structural damping, k quantifies the structural stiffness, and F is the fluid force in the transverse direction. The symbol (\cdot) means derivative with respect to the time. If natural frequency of the structure and VIV frequency are closer, resonance effects can be expected to be reinforced and drastic changes in the dynamics of the pipeline could appear. This phenomenon is known as “lock-in”. Additionally, internal

multiphase flow in pipelines can induce vibrations in the structure (vibrations mainly related to local variations in average density of the gas-liquid mixture transported). So, it is desirable to formulate models that include both, external and internal flow effects.

The first numerical model was created to predict the fatigue life in extra long submarine gas pipelines subjected to slug flow [3]. This model considers the “dynamic slug” effect over fatigue life cycle of pipelines with extra long tie-backs (>100 km). In order to determine the pipeline fatigue life, two fundamental aspects were emphasized: the prediction of the multiphase flow regime inside of pipeline and, when slug flow appears, the necessity of characterize the flow conditions that can produce pipeline vibration. Only internal intermittent flow is able to induce vibration in the pipeline because of the transient variation of local fluid weight at different points in the pipe, and therefore, this was the case associated to fatigue damage. In order to calculate the dynamic stress level produced by the slugs, in this first approach, the well known algorithm of Taitel & Duckler [7] was employed to predict flow regimes. Once it was established that slug flow pattern was present in the pipeline, slug frequency, total slug length, liquid and film zone lengths, and pressure drop could be calculated. In this first approach, the mechanistic model proposed by Taitel & Barnea [8] was used to calculate the characteristic slug parameters (slug length, liquid and film zones) for specific gas and liquid production flow rates. Regarding the slug frequency, several correlations were proposed. Since good agreement with most experimental data was obtained by Grescovich’s correlation [9], it was considered in this work. In this way, local values of fluid weight along all pipeline length were obtained.

Once the slug geometrical characteristics were obtained, a structural Finite Element (FE) model was developed in order to determine the dynamic response of the pipeline under moving loads. The interaction between two phase flow (liquid-gas) and the pipeline structure resulted to be very complex because both average fluid density and pressure variations can induce pipe vibrations. Wu *et al.* [10], using FE and analytical methods, developed a methodology to determine the dynamic response of a structure excited by a single moving load.

The structural FE model developed in this first work assumes that slugs are multiple moving loads traveling along the pipe, which is considered as a simple supported beam. The system dynamic response was calculated for different spans conditions and slugs characteristics corresponding to different gas-oil ratios, typical from oil field production conditions.

Because the proposed numerical model was based in a moving load approach, model validation was accomplish by comparison with results with Wu *et al.* [10] for a single moving load on a beam, using a FE model. The proposed model captured, in an adequate manner, the dynamical behavior of the structure. In order to apply the methodology, data supplied by CSIRO Petroleum for a gas production field was analyzed, and eight different cases generating slug flow patterns were selected [3]. Results show that for some flow conditions, slug characteristics may produce a substantial reduction in the fatigue life of submarine pipes.

Being the loads variable in a periodic way, as slugs travel in the pipe, this numerical model was improved by using Fourier expansion series [4], considering that for each spatial point, the loads due to slug flow were periodic in time. The dynamic response of the structural model was obtained via numerical approximation by a Fast Fourier Transformation. The proposed fluid-structural model was validated regarding the application of distributed moving loads. The behavior of the new FE model was studied to assess their performance considering accuracy, computational cost and memory requirements. The results of this particular research clearly indicate that is possible to get a good approximation of the pipe behavior with very few terms of the Fourier expansion after making a reordering of the harmonics based on their amplitudes. This truncation resulted in a significant reduction in the computational cost and time.

Later, in order to study the effect of soil non-linearity in the dynamics of a pipeline subjected to slug induced vibration [5], the FE model was improved by considering the effects of four different types of seabed supports: rigid supports, linear elastic, non-linear perfectly plastic (bi-linear), and non linear with tension cut-off. The linear case simulates the situation in which the seabed opposes a linear force against pipe movement in both, compression and tension. The non-linear perfectly plastic case simulated a soil behavior in which a linear force was opposed to the pipe movement in compression and tension, but only up to a certain deflection. Beside that deflection, the opposed force was constant. Finally, the non-linear case with tension cut-off is similar to the perfectly plastic case in compression but in tension the soil is considered to opposing a linear force to a certain deflection and beside that point no force is produced.

The influence of these types of supports has been studied by Ai *et al.* [11] for the case of free spans of pipelines subjected to VIV. Figure 1 shows the supports in pipeline free span. For the sake of simplicity, seabed supports were modeled by soil equivalent stiffness and damping, and they were considered to act in a pipe sector of length L_s at each end of the span considered. Sea bottom was modeled as a viscoelastic foundation.

It was shown that seabed support models and soil parameters had an important influence on the dynamic response of a pipe span subjected to slug induced vibration; amplitudes and shapes of the stress cycles were affected by seabed support as well as by the support model. In general, as a conclusion, non-linear seabed support models will produce greater response and stresses amplitudes.

A second family of numerical models [6], based on finite differences schemes was developed in the period 2010-2011. These models consider fluid-structure interaction for analyzing the dynamical behavior of a riser subjected to simultaneous internal slug flow and an external marine current uniform flow. The fluid model was based on the classical wake oscillator model of van der Pol. In order to analyze the variations in the dynamics of a pipeline due to simultaneous effects of slug flow and external marine currents, coupled models to represent pipe motion (structural model), external hydrodynamic forces (fluid model) and slug dynamics were implemented. Different tests cases were modeled to analyze the riser dynamics for a typical field case, considering marine current velocity constant. The wake oscillator model of van der Pol is represented by:

$$\ddot{q} + c(q^2 - 1)\dot{q} + q = 0 \quad (2)$$

where q represents the displacement and c is a parameter which governs the intensity of the non-linear effects.

The riser structural model consists of a straight slender pipe whose external diameter is D and internal diameter able to move only in the direction y transverse to the flow, as showed in Fig. 2.

Regarding the fluid model, according to Facchinetti *et al.* [12] and Violette *et al.* [13], hydrodynamics forces imposed by vortex shedding were computed using a forced van der Pol oscillator equation. When considering the numerical model, two different numerical schemes based in the method of finite differences were implemented to solve the coupled system. This system was numerically integrated in space and time using a standard centered finite difference method of second order in both domains, and by using a Runge-Kutta-Fehlberg (RKF) scheme. Tests were conducted to assure independence of model's predictions from time and space discretization. Null displacements and bending moments were the boundary conditions imposed on riser's extremes.

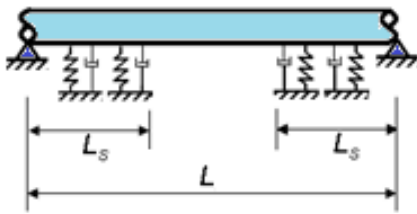


Figure 1- Supports in pipeline free span.

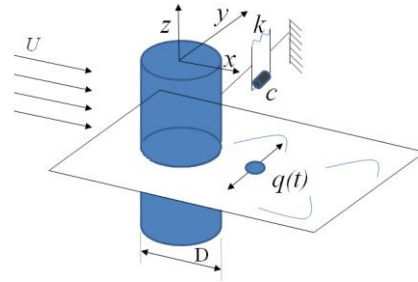


Figure 2- Pipeline structural model scheme.

This model was used to study the dynamics of risers, in the same conditions proposed by Tang and Huang [14]. External flow velocity was selected in order to assure that the pipeline was into lock-in regime. Numerical results showed that the evolution in time of the system lead to a standing wave condition. Even though no influence on vibration amplitude due to variations on slug flow frequency was observed, in some cases, slug flow can induce a change in the oscillation mode, and, consequently, the predicted fatigue life may be significantly modified, when the conjunction of effects from loads due to internal slug flow and vortex shedding are considered. Also, numerical results shows that considering the monophasic flow of a fluid whose density is equivalent to that of the slug flow is totally equivalent. Consequently, scenario analysis for different types of slug flow in risers might be simplified considering the extreme cases of an empty pipe and a monophasic flow whose density corresponds to the one of the liquid plug in the slug flow.

Later, the model was improved through considering gravity effect with the incorporation of Slug-Induced Vibration (SIV) and VIV phenomena in order to study the dynamical interaction between slug flow and vortex-induced vibration regarding horizontal submarine pipelines [15]. This work constitutes the first study in this field and it has not been published yet. The Finite Differences model was modified to analyze the variations in the dynamics of the horizontal pipeline. The considered structural model took into account different effects, such as the structure stiffness, tension and added mass effects. The slug flow was characterized by a sequence of liquids plugs and gas bubbles. A numerical model based on the finite difference method using a second order spatial and temporal discretization was implemented and the convergence of the proposed fluid-structural model was verified. As a conclusion of this study, different tests cases were modeled to analyze the pipeline dynamics for two typical field cases considering different relative slug-size flows and marine current velocities around “lock-in” zone. Numerical results show that, in all considered cases, evolution in time of the system lead to a standing wave condition. This study should be extended to consider the whole range of practical slug length values and slug frequencies. This is already being addressed by the authors.

4. CONCLUSIONS AND FINAL REMARKS

In a five-year period, several numerical models based on finite-elements and finite differences schemes have been developed, which are able to predict accurately the fatigue damage due to fluid-structure interaction including the main effects: slug flow, vortex-induced vibrations, support, inertial and gravitational. These models permit to consider a wider number of cases helping in the design of submarine pipelines in order to estimate their fatigue life.

REFERENCES

- [1]. Williamson C.H.K., Govardhan R. Vortex-Induced Vibrations. Annual Revision of Fluids Mechanics. 2004.
- [2]. Blevins R.D. Flow-Induced Vibrations. New York: Van Nostrand Reinhold. 1990.
- [3]. Kansao, R., Casanova, E., Blanco, A., Kenyery, F., Rivero, M.; Fatigue Life Prediction due to slug flow in extra long submarine gas pipelines. Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE 2008. June 15-20, 2008.
- [4]. Casanova, E., Pelliccioni, O., Blanco, A. Fatigue life prediction due to slug flow in extra long submarine gas pipelines using Fourier expansion series. Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2009-79642.
- [5]. Casanova, E., Blanco, A. Effects of Soil non-linearity on the Dynamic Behavior and Fatigue Life of Pipelines Spans subjected to slug flow. Proceedings of the 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE 2010. June 6-11, 2010.
- [6]. Blanco, A., Casanova, E., A preliminary study on the interaction between slug flow and vortex-induced vibration in fatigue life of submarine pipelines. Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2010. June 6-11 2010.
- [7]. Taitel Y. and Dukler A. E.; A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-liquid Flow, AIChE Journal 22, Vol. 1 (1976), pp. 47-55.
- [8]. Taitel, Y.; Barnea, D.; Two-Phase Slug Flow, Advances in Heat Transfer, Academic Press Inc., New York City, Vol. 20 (1990), pp 83-132.
- [9]. Greskovich, E. and Shrier A.; Slug frequency in horizontal gas-liquid slug flow. Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. 11 (1972), pp.317-318.
- [10]. Wu, J.J., Whittaker, A.R., Cartmell, M.P.; “Dynamic Responses of Structures to Moving Bodies Using Combined Finite Element and Analytical Methods”. International Journal of Mechanical Sciences 43. (2001).
- [11]. Ai, S.; Sun, L. and Ma G.; The Effect of Soil Non-Linearity on VIV Response of a Free Spanning Pipeline, ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2009), June 2009, Honolulu, USA. OMAE2009-79063.
- [12]. Facchinetti, M., E. de Langre, and F. Biolley. “Coupling of structure and wake oscillators in vortex induced vibrations”. Journal of Fluids and Structures. (2004). Vol.19, pp.123–140.
- [13]. Violette R., de Langre E. and Szydlowski J. “Computation of vortex-induced vibrations of long structures using a wake oscillator model: Comparison with DNS and experiments”. Computers and Structures, (2007). Vol.85, pp. 1134–1141.
- [14]. Tang S. and Huang W. “Numerical study of the interaction of in-line and cross-flow VIV”, ASME 28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA, OMAE2009-79308, May 2009.
- [15]. Bossio B., Blanco A. and Casanova E. “Numerical Modelling of the Dynamical Interaction between Slug Flow and Vortex Induced Vibration in Horizontal Submarine Pipelines” Submitted to Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, Nov. 2012.

ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN EL COLAPSO AXIAL DE TUBOS CONCÉNTRICOS DE METAL EXPANDIDO

Helio Borges. A

Carlos Graciano. G

Gabriela Martínez. B

heliodanielb@gmail.com

cgracian@usb.ve

gabrielamb@usb.ve

Decanato de Investigación y Desarrollo y Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Miranda (Venezuela).

Depto. De Ing. Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín (Colombia).

Resumen. *En el presente trabajo se evalúa la capacidad de absorción de energía y el modo de colapso en tubos concéntricos de metal expandido sometidos a cargas axiales de impacto variando las dimensiones de la malla metálica y la velocidad de la masa de impacto. La configuración estudiada es conformada por un tubo con celdas orientadas verticalmente (90°) en el interior y un tubo con las celdas orientadas horizontalmente (0°) en el exterior. El análisis se llevó a cabo utilizando un modelo numérico explícito que emplea el Método del Elemento Finito (MEF). Los resultados muestran que una configuración de tubos concéntricos 90-0 presenta mejores propiedades de absorción de energía que los dos tubos individualmente.*

Palabras claves: Elementos finitos, Impacto, Deformación plástica, Absorción energía

1. INTRODUCCIÓN

Diversos mecanismos de absorción de energía han sido estudiados en la literatura [1, 2]. Sin embargo, recientemente se han realizado investigaciones sobre la capacidad de absorción de energía en tubos fabricados con malla de metal expandido debido a su bajo costo y gran capacidad de deformación plástica. Graciano et al. [3] llevó a cabo un estudio experimental del modo de colapso y absorción de los tubos según la orientación de las celdas en la malla de metal expandido. Saavedra et al. [4] analizó los mismos parámetros bajo cargas dinámicas mediante un modelo numérico. Ambos autores concluyeron que los tubos con celdas orientadas a 90° (fig. 1 a)

absorben más energía que los tubos con celdas orientadas a 0° (fig. 1 b), aunque colapsan de manera inestable y por lo tanto generan altas cargas de impacto. Por otro lado, los tubos con celdas a 0° colapsan de manera estable a medida que las celdas de metal expandido se cierran. Martínez et al. [5] estudiaron numéricamente el colapso de tubos concéntricos sometidos a cargas cuasi-estáticas donde las celdas de metal expandido están orientadas en un solo sentido dentro de cada grupo concéntrico de tubos.

Sin embargo, se desconoce el comportamiento dinámico de los tubos concéntricos combinando la orientación de las celdas. En este trabajo se estudia numéricamente la capacidad de absorción de energía de tubos concéntricos con configuración 90-0, donde las celdas del tubo interno están orientadas a 90° y las del tubo externo a 0° (fig. 1). Con esta configuración se busca combinar las cualidades de absorción de energía del tubo con celdas a 90° con la estabilidad de colapso del tubo con celdas a 0° mediante su interacción.

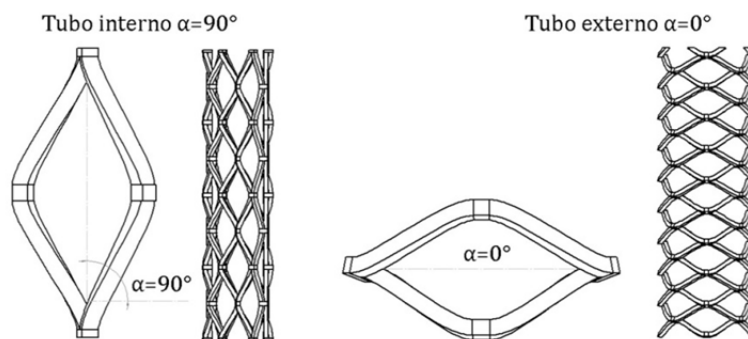


Figura 1. a) Tubo interno con celdas a 90° , b) externo con celdas a 0° .

2. METODOLOGÍA

Modelo de elementos finitos. Para modelar el colapso axial de los tubos de metal expandido se utilizó el código explícito ANSYS AUTODYN [6], que emplea el método del elemento finito (MEF). El mallado de los tubos está conformado por elementos tetraédricos de bajo orden tipo SOLID164 de 4 nodos y 9 grados de libertad por nodo (traslación, velocidad y aceleración en X, Y y Z). Luego de alcanzar la convergencia en tubos con metal expandido de diferentes dimensiones, se observó que elementos con una longitud del 95% de la distancia mayor entre t y w (fig 2 a) generan resultados suficientemente buenos.

En la figura 2b se muestra la geometría del tubo y las condiciones de borde para el modelo numérico. La longitud aproximada de los tubos de metal expandido es de 400mm, mientras que el diámetro se aproxima a 130mm, las dimensiones de los tubos son similares a las empleadas por Graciano y Saavedra [3, 4]. Los nodos de las celdas en la base del tubo están completamente restringidos. En el otro extremo del tubo se limitan los desplazamientos en X y Z, de manera que solo sea posible el desplazamiento axial, para modelar una tapa soldada en el extremo del tubo, estas condiciones son similares a las utilizadas en los estudios mencionados. La masa de impacto se modela como un objeto totalmente rígido. Esta tiene velocidad inicial V . El contacto entre todas las superficies en el modelo es definido como *frictionless* (sin fricción) mediante un algoritmo que emplea el método de la “penalidad” [6].

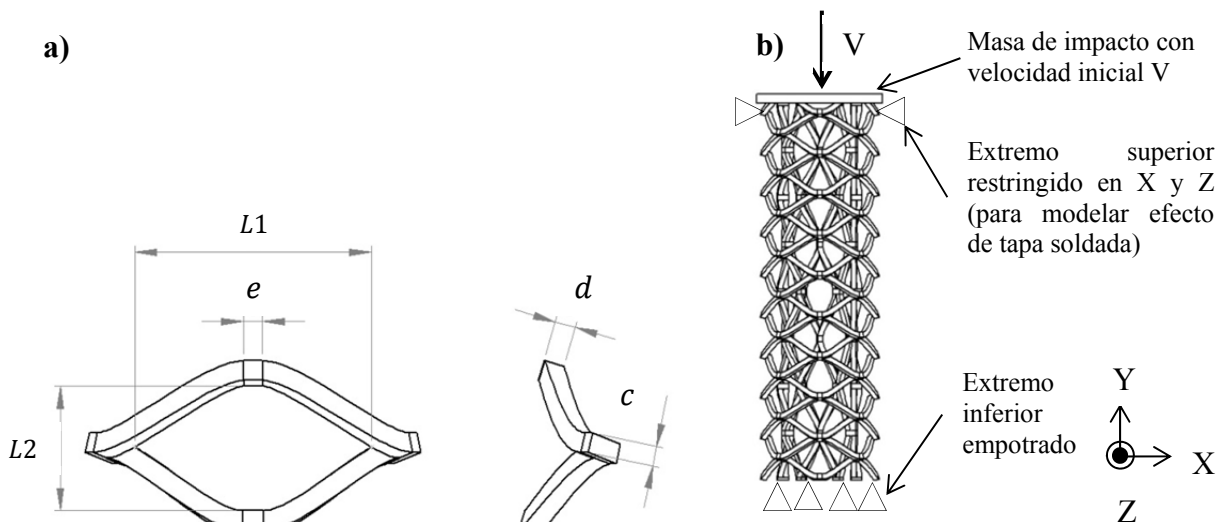


Figura 2. a) Dimensiones de una celda de metal expandido. b) Condiciones de borde del modelo numérico.

En la simulación numérica, se utilizan las propiedades del material obtenidas por Graciano et. al [3], que empleó un acero ASTM-A569 con módulo elástico $E = 205GPa$, módulo de Poisson $\nu = 0,3$, densidad $\rho = 7835Kg/m^3$ y esfuerzo de fluencia $S_y = 250MPa$. La plasticidad del material se modela mediante la ecuación (1). Esta ecuación toma en cuenta la variación del esfuerzo de fluencia producto de la tasa de deformación del material mediante el modelo de Cowper-Symonds [7].

$$S_y^d = (S_y + B \times \varepsilon_{pl}^n) \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \right) \quad (1)$$

En la Ec. (1), S_y^d es el esfuerzo de fluencia dinámico, B es el módulo plástico, n es el coeficiente de endurecimiento por deformación, ε_{pl} es la deformación plástica y $\dot{\varepsilon}_{pl}$ es la tasa de deformación plástica. Los valores de S_y , B y n fueron obtenidos a través de un ensayo de tracción en [3]. D y q son las constantes del modelo de Cowper-Symonds. Los valores empleados para D y q fueron tomados de [8]. En la Tabla 1 se muestran los valores usados de estas constantes.

Tabla 1. Propiedades del metal expandido en el rango plástico para el modelo numérico.

S_y (MPa)	B (MPa)	n	D	q
250	600	2,8	6844	3,91

Validación del modelo de EF. Para la validación del modelo numérico se utilizó la probeta T42 ensayada previamente por Abramowicz [8]. En la Figura 3 se puede observar una buena correlación entre las curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidas.

Estudio Paramétrico. Para estudiar la influencia de la velocidad de impacto y las dimensiones del material en el colapso de los tubos concéntricos, se realizó un estudio paramétrico empleando tres velocidades de impacto (10, 20 y 30m/s, respectivamente) y tres tamaños comerciales de

malla de metal expandido, adicionalmente se consideró una masa de impacto de 100kg. Se utilizaron las mallas H-23, H-23A y H-27A del catálogo de la empresa venezolana Maboca. En las tablas 2 y 3 se muestran las dimensiones de las mallas utilizadas y de las configuraciones de los tubos concéntricos.

Tabla 2. Dimensiones de las mallas de metal expandido.

Metal expandido	$L1(mm)$	$L2(mm)$	$c(mm)$	$d(mm)$	$e(mm)$
H-27A	81,6	36,8	6	6	6
H-23A	58,6	29,2	7,5	6	6
H-22A	64,5	30,6	4,1	4,5	4,1

Tabla 3. Detalles de diseño de tubos concéntricos.

Tubo concéntrico	Malla de metal expandido	Tubo interno y externo	\varnothing (mm)	N (# de celdas en la circunferencia)	L (mm)
A	H23	Interno ($\alpha=90^\circ$)	80	7	407
		Externo ($\alpha=0^\circ$)	109	4	
B	H27A	Interno ($\alpha=90^\circ$)	88	6	428
		Externo ($\alpha=0^\circ$)	134	4	
C	H23A	Interno ($\alpha=90^\circ$)	73	6	409
		Externo ($\alpha=0^\circ$)	115	4	

3. RESULTADOS

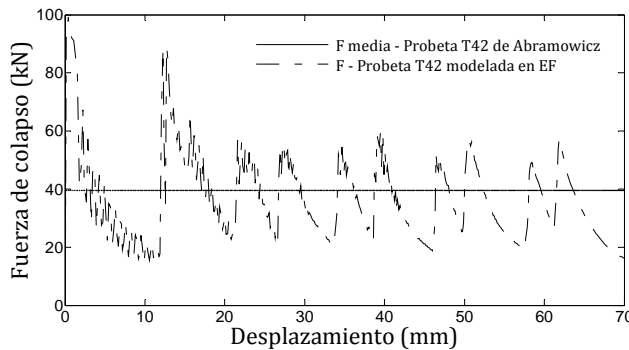


Figura 3. Comparación de las curvas fuerza-desplazamiento.

Tabla 4. Energía absorbida (E_{200}) y Fuerza media de colapso ($F_{media-200}$) en 200mm de compresión para los tubos concéntricos A, B y C.

Tubo	Velocidad (m/s)	E_{200} (kJ)	F_{media} (kN)
A	20	5,6	27,2
	30	7,5	36,2 (+32,8%)
B	20	11,3	56,9
	30	11,5	56,5 (+0,7%)
C	20	19,9	107,9
	30	18,8	93,8 (-13,1%)

En las Figuras 4, 5 y 6 se observa la influencia de las dimensiones del metal expandido sobre la fuerza de colapso en los tubos concéntricos. Esta aumenta a medida que las dimensiones c y d son mayores y $L1$ y $L2$ son menores. Esto se debe al incremento de la cantidad de material que se deforma plásticamente y a la variación de la geometría de la celda.

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 4, la fuerza de colapso en los tres tubos (A, B y C) no varía de manera consistente al cambiar la velocidad de impacto. Al aumentar la velocidad, la fuerza aumenta en el tubo A, se mantiene en el tubo B y disminuye en el tubo C. Las variaciones en los tubos A y C son significativas y podrían ser causadas por la interacción entre los tubos interno y externo. La influencia de la tasa de deformación en las propiedades del material y los efectos inerciales parecieran no tener mayor importancia en el rango de velocidades estudiado.

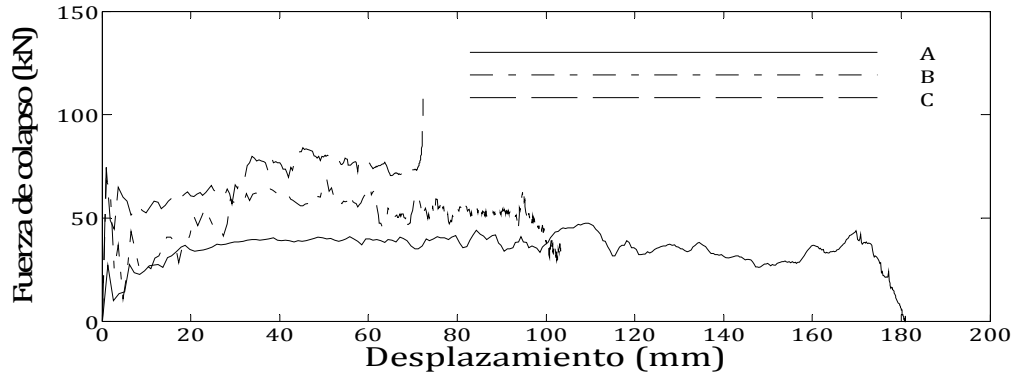


Figura 4. Fuerza de colapso vs. Desplazamiento a $V=10\text{m/s}$.

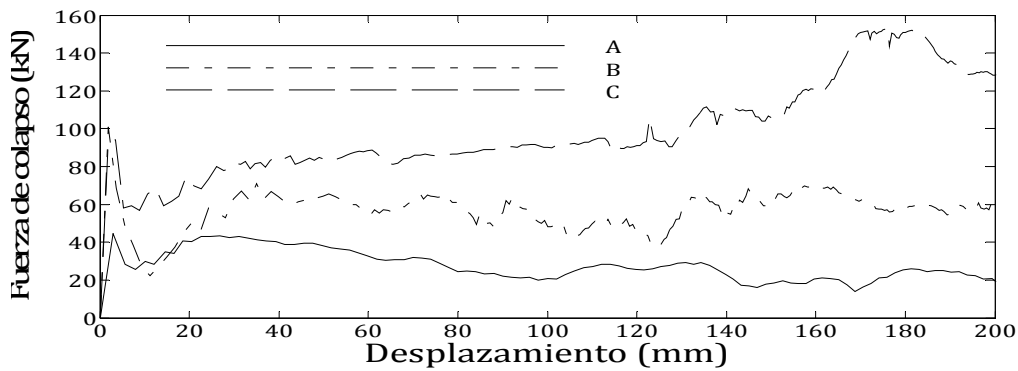


Figura 5. Fuerza de colapso vs. Desplazamiento a $V=20\text{m/s}$.

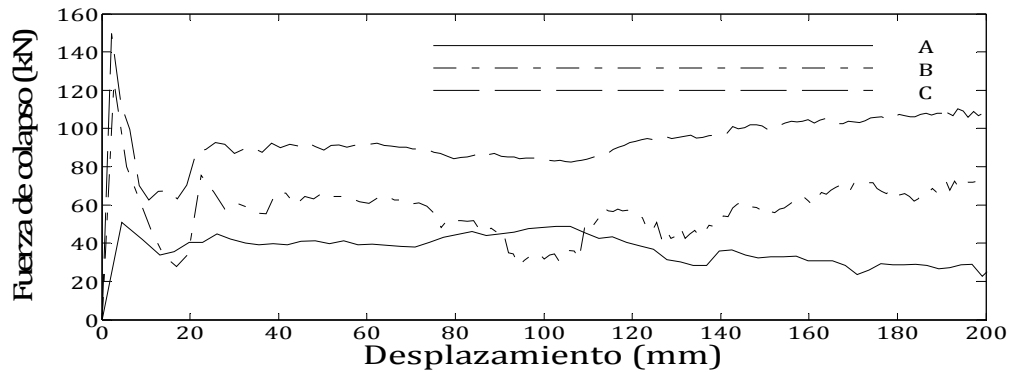


Figura 6. Fuerza de colapso vs. Desplazamiento a $V=30\text{m/s}$.

La Figura 7 muestra los modos de colapso de los tubos internos y externos. En los tres casos la malla metálica del tubo externo contiene a la del tubo interno, de esta manera, se logra mayor deformación plástica y absorción de energía. El tubo C (fig 6c) es el que colapsa con más estabilidad ya que las celdas del tubo interno y externo se cierran a medida que colapsan plásticamente, mientras que los tubos internos A y B colapsan de manera irregular.

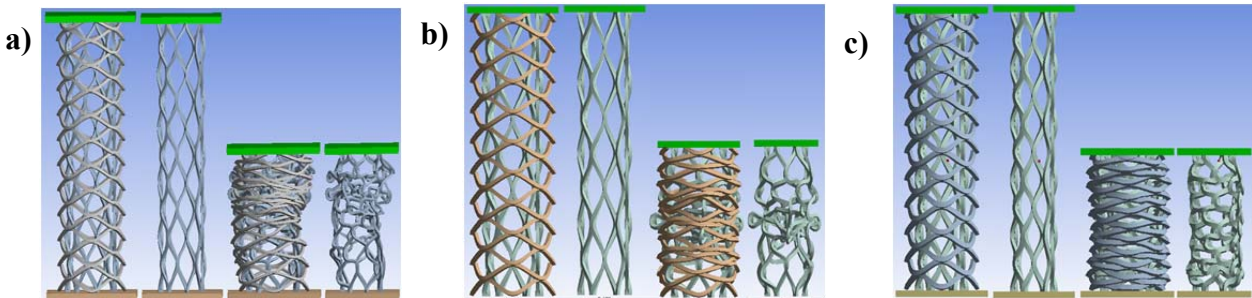


Figura 7. Forma original y modos de colapso del tubo interno ($\alpha=90^\circ$) y externo $\alpha=0^\circ$ con 200mm de compresión y velocidad de impacto $V=30\text{m/s}$. a) Tubo A b) Tubo B c) Tubo C.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el colapso axial de tubos concéntricos $90-0^\circ$, el tubo interno ($\alpha=90^\circ$) comienza a fallar por pandeo global, hasta hacer contacto con la pared del tubo externo (0°), por lo tanto el tubo interno es contenido y forzado a deformarse para ajustarse al volumen reducido. De esta manera se aumenta la cantidad de energía absorbida por deformación plástica y se regulariza el modo de falla a medida que colapsa el tubo, manteniendo así una fuerza de colapso constante, propiedades deseables en dispositivos de absorción de energía.

Se recomienda complementar este estudio en el futuro con pruebas experimentales que le den validez al modelo numérico.

AGRADECIMIENTOS: Los autores agradecen el apoyo del Decanato de Investigación y Desarrollo de la Universidad Simón Bolívar, sin el cual, este trabajo no hubiese sido posible.

5. REFERENCIAS

- [1] A. A. A. Alghamdi, «Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview,» *Thin-Walled Structures*, vol. 39, n° 2, pp. 189-213, 2001.
- [2] A. G. Olabi, E. Morris y M. S. J. Hashmi, «Metallic tube energy absorbers: A synopsis,» *Thin-Walled Structures*, vol. 45, n° 7-8, pp. 706-726, 2007.
- [3] C. Graciano, G. Martínez y D. Smith, «Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes,» *Thin-Walled Structures*, vol. 47, n° 8-9, pp. 953-961, 2009.
- [4] E. Saavedra, C. Graciano y G. Martínez, «Estudio numérico de estructuras tubulares fabricadas con láminas de metal expandido sometidas a impacto axial,» de *Avances en simulación computacional y modelado numérico*, Isla de Margarita, 2012.
- [5] G. Martínez, C. Graciano y P. Teixeira, «Energy absorption of axially crushed expanded metal tubes,» *Thin-Walled Structures*, vol. 71, pp. 134-146, 2013.
- [6] ANSYS, *Academic Research, Release 14.0, Help System, Ansys, Inc.*
- [7] G. R. Cowper y P. S. Symonds, «Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams,» (No. TR C 11 28). BROWN UNIV PROVIDENCE RI, 1957.
- [8] W. Abramowicz y N. Jones, «Dynamic axial crushing of circular tubes,» *International Journal of Impact Engineering*, vol. 2, n° 3, pp. 263-281, 1984.

MODELING AND SIMULATION IN A COMPONENT OF AN "AIR DRILL" PLANTER

Gastón Bourges

Mabel Medina

gbourges@fceia.unr.edu.ar

mmedina@fceia.unr.edu.ar

Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.

Universidad Nacional de Rosario. - Argentina

Escuela de Formación Básica. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.

Consejo de investigaciones. Universidad Nacional de Rosario. - Argentina

Abstract. *In "air drill" seeders, grains conveying is done by mean of air currents. On these equipments, flexible hoses are used to convey seeds from the hoper to the distributor head, and from the latter to each sowing bodies. The accumulation of seeds in controversial sectors of the system is a common problem. A key component of these systems is the flow distributor head. With the aim of finding the minimum velocities of transport of seeds, without jams or accumulations, the air-seeds flow behavior, in a commercial distributor head, is numerically studied. In this paper, it is analyzed the behaviour of soybeans in an "air drill" distributor head, using an Eulerian approach for the fluid. Navier-Stokes equations are used for the air flow simulation, solved with a Reynolds Average Navier-Stokes standard technique, with a $k-\epsilon$ turbulence model. Particle trajectories are numerically calculated using a Lagrangian approach. Soyabeans are considered spherical, uniform size, and rigid particles. The air-particle mixture is analyzed as dilute phase. Weak coupling between solid and fluid phases is used. Particle position is computed using Newton's second law, and the acting forces are: the drag force, and the gravity force. Numerical tests show a mixing flow inhomogeneity, with tendency of particles to exit through the frontal tubes of the expansion zone of the distributor head. Non uniform flow distribution is obtained from numerical test, having frontal pipes of distributor head, the higher seeds flow. Numerical results are compared with experimental ones that were made in a test bench.*

Keywords: Pneumatic conveying, Air drill seeders, Numerical simulation, One way coupling.

1. INTRODUCTION

At present, pneumatic conveying of grains is widespread. In the case of agricultural machinery, such as "air drill" planters [1], flexible tubes are used to move the seeds from the storage hopper to distributor head, and from this to each sowing body. A common problem in this type of machines is the accumulation of seeds in troubled sectors of the system, for example, in sectors of sudden change of direction, or in section change of pipe (reduction or increase). It is important to choose the air velocity as low as possible, to save energy and to reduce breakage of seeds.

In pneumatic conveying, when particle concentration is low enough, one way fluid-particle coupling can be used. In this type of coupling, the dilute phase (particles) is affected by the presence of the dense phase (fluid), while the fluid behavior is not influenced by the presence of particles.

In this paper, it is modeled the behavior of soybeans in an "air drill" distributor head, using an Eulerian approach for the fluid and a Lagrangian approach for the particles. Limitations of the model are discussed. Numerical results are compared with experimental data from test bench.

2. MATERIAL AND METHODS

Figure 1 (a) & (b) shows distributor head test bench setup, where air-seeds mixture gets inside the horizontal tube of inner diameter $D_i = 0.063$ m. Then, mixing flow rise by an elbow, first, and then by a vertical tube subsequently. Thereafter, air flow enters in expansion sector ($D_{exp} = 0.15$ m), where is divided among each of the outlet tubes. This distributor head is a commercial one, obtained from a local manufacturer of agricultural machinery. Results will be compared with laboratory test on the distributor head test bench (Fig. 1 (a)) from the Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM), belonging to the Universidad Nacional de Rosario (UNR). This equipment has a seeds hopper, which contains and meters them, and an air blower, which delivers the air flow.

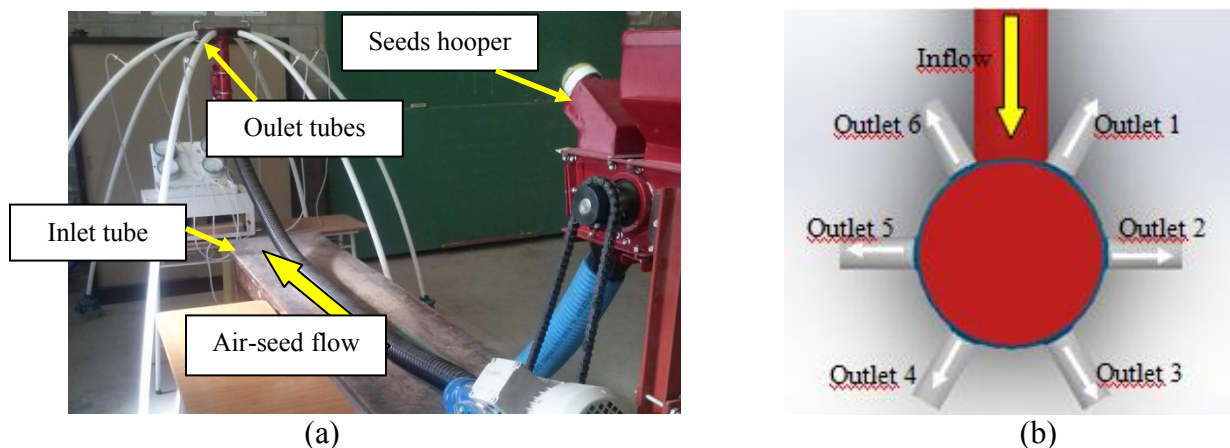


Figure 1 - (a) Distributor head test bench. (b) Distributor flow scheme.

2.1 Numerical Model

Navier-Stokes equations are used for the air flow simulation, solved with a Reynolds Average Navier-Stokes standard technique, with a k- ϵ turbulence model [2]. The algorithm is steady and is solved by the finite element software Comsol Multiphysics®. For this experiment, flow Reynolds number varies between 34000 and 81000. Second order tetrahedral elements were used in velocities and first order ones in pressures. The total number of mesh elements is 223596, where 167298 are tetrahedral elements, 56298 are prism elements, 19004 are triangular elements, 210 are quadrilateral elements, and 2027 are both edge and vertex kind. Near the boundaries structured meshes is used, in order to maintain the value of the term of distance from the wall in viscous units (δ_w^+) below 100 [3]. Finally, average mesh quality is 0.569. Boundary conditions are described in Table 1.

The air properties used in this calculation: density $\rho = 1,17 \frac{kg}{m^3}$ and dynamic viscosity $\mu = 1,983 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m s}$.

Table 1. Fluid flow model and particle trajectories boundary conditions.

	Inlet surface	Internal walls	Outlet surfaces
Fluid flow model	normal inflow velocity $v_i = 10$ m/seg	logarithmic wall velocity gradien	null pressure
Particle trajectories model	normal velocity $v_{ip} = 0.2$ m/seg	specular reflection	freeze

Particle trajectories are numerically calculated using a Lagrangian approach. Soyabeans are considered spherical, uniform size, and rigid particles. It is supposed that particles are so coarse that are not affected by the fluid turbulence [3]. The air-particle mixture is analyzed as dilute phase. Weak coupling between solid and fluid phases is used. Particle position is always computed using Newton's second law, and the acting forces are: the drag force, and the gravity force.

$$\frac{d}{dt}(m_p v_p) = F_p \quad (1)$$

Where m_p is the particle mass, v_p the particle velocity, F_p the total force exerted on the particle.

$$\frac{d}{dt}(q_p) = v_p \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(m_p v_p) = F_{Drag} + F_g \quad (3)$$

Being q_p the particle position vector, g is the gravity acceleration and F_{Drag} is the drag force exerted by the air flux on the particle, which is calculated by the Schiller-Naumann law :

$$F_{\text{Drag}} = \frac{3 \mu C_D R_{ep}}{4 \rho_p D_p^2} m_p (v - v_p) \quad (4)$$

Where R_{ep} is the Reynolds particle number, given by:

$$R_{ep} = \frac{\rho_{\text{aire}} D_p |v - v_p|}{\mu} \quad \text{and} \quad C_D = \frac{24}{R_{ep}} (1 + 0,15 R_{ep}^{0,637}) \quad (5)$$

Other parameters are the fluid local velocity v , the air density ρ , and the particle diameter D_p . The gravity force F_g is:

$$F_g = m_p g \frac{(\rho_p) - \rho}{\rho_p} \quad (6)$$

Values of fluid velocity field and its derivatives are obtained from the numerical simulation of air in the distributor head, with the software Comsol Multiphysics®. When a seed touches a duct wall, linear and angular velocities are calculated considering an elastic collision, with specular reflection. This is a very restrictive assumption of the model, since experimentally obtained values of the restitution coefficients of soybean, being tangential and normal coefficients 0.1 and 0.6, respectively [4]. This would produce a strong decrease of the kinetic energy in each bounding seed, changing seeds trajectory in comparison with the ones solved from this model. In this model, output tubes are not considered in its true size (diameter output is retained, but not its length). Null output pressure is imposed, while in actual case each duct has different pressure drop.

3. NUMERICAL RESULTS

Using the numerical model described above, results for an air inlet condition of 20 m/s, are obtained. Once velocity field is calculated, 210 seeds are released 10 by 10 each second, during 21 seconds. The total simulation time is 90 seconds. The seeds are released into the pipe inlet, uniformly distributed. Seeds initial velocity is 0.2 m/s, coinciding with the main axis of the horizontal tube (Table 1).

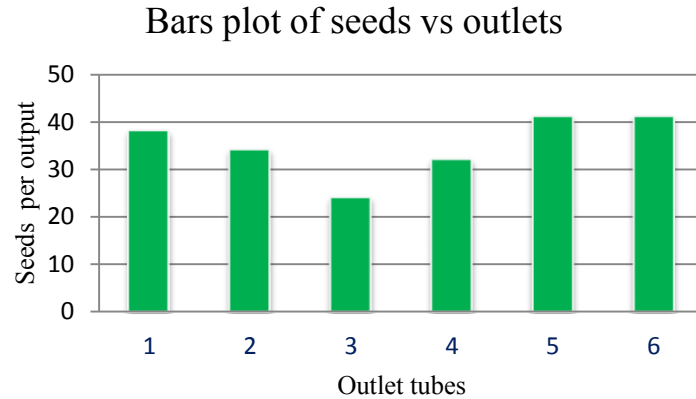


Figure 2 – Simulation results: number of seeds per outlet tube.

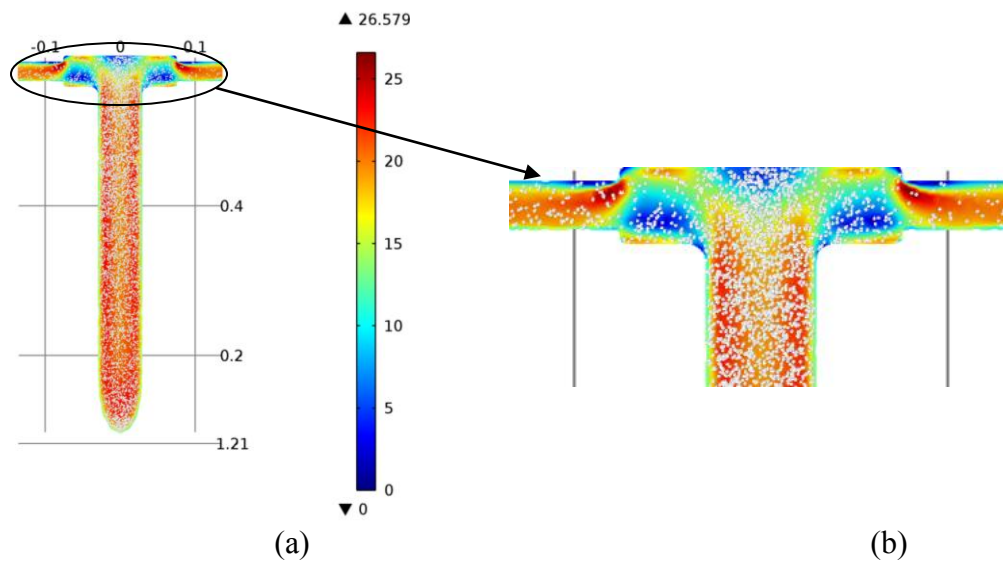


Figure 3 – (a) Poincaré map of seeds distribution in vertical tube. (b) Particle distribution in expansion sector.

This simulation is better than the results in [5], where qualitative results of seed distribution were obtained with a similar trend to the currently.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

In the experiment, two kilograms of seeds are injected into the air stream, from the metering hopper. The mass of the seeds that come out each output is measured. The total test duration is 4 minutes. Tests were designed in blocks of six to ten repetitions each [6].

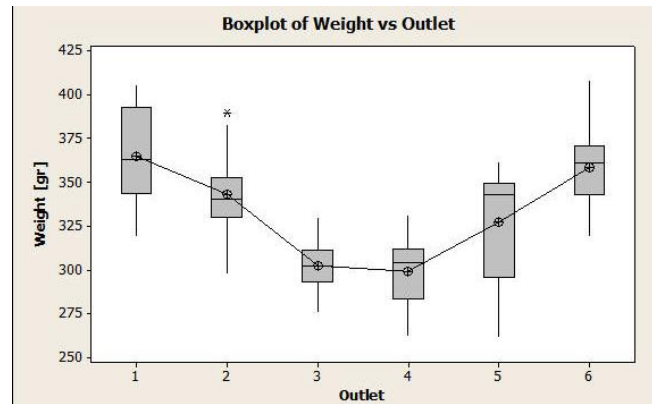


Figure 4 – Experimental results: mass of seeds per outlet tube.

Figure 4 shows boxplot diagram of the weights of the seeds that were obtained in each output. Horizontal lines in boxes are the medians and circles are the means. It is noted that the outputs 1 and 6 have larger average, while outputs 3 and 4 have lower values. This indicates that frontal outlets send more seeds than rear ones.

5. CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

Trajectories of seeds in the examined distributor head are obtained. A numerical tool is used in this trajectories analysis. Numerical results are consistent with experimental ones and the statements by manufacturers, on an irregular distribution and tendency to flow through frontal ducts.

In future works, new models designs will be numerically tested to improve the performance of the actual distributor head. New designs will take in account the regular distribution between outlet tubes.

REFERENCES

- [1]. Bragachini, M. *Sembradoras de Grano Fino / Soja*. Tendencias. INTA Manfredi. <http://www.agriculturadeprecision.org>. 2005.
- [2]. Wilcox D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc. ISBN: 0-9636951-0-0. 1994.
- [3]. Tashiro H.; Watanabe E.; Shinano H.; Funatsu K. and Tomita Y. 2001. *Effect of mixing gas fine particle suspension flow with small amount of coarse ones in horizontal pipe*. Int. J. Multiphase Flow. 27 (10), 2001-2013. 2001.
- [4]. Mattara M., Ponso R. and Medina M. *Coeficiente de Restitución sobre Superficies de Acero para Granos de Soja (Glycine Max Merrick) Transportados*. Avances en ingeniería rural 2007-2009. 2009.
- [5]. Bourges, G. and Medina, M.. *AIR-SEEDS FLOW ANALYSIS IN A DISTRIBUTOR HEAD OF AN "AIR DRILL" SEEDER*. Acta Hort. (ISHS) 1008:259-264. http://www.actahort.org/books/1008/1008_34.htm. 2013
- [6]. Bourges, G. and Medina, M. *Verificación experimental en Banco de ensayos de cabezales distribuidores de sembradoras "air drill"*. Proceedings of CIBIM 2013. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. 2013.

ELLIPSOIDAL IMPULSE RESPONSES IN FRACTURED MEDIA

Pedro Contreras

pcontreras@ula.ve

Departamento de Física y Centro de Física Fundamental. ULA. Mérida-Venezuela.

Luis Rincón

lrincon@ula.ve

Departamento de Química, Facultad de Ciencias, ULA. Mérida-Venezuela.

José Burgos

joseburgos@ula.ve

Universidad Nacional Experimental Sur del Lago, Zulia y Departamento de Física, ULA

Abstract. *Multiple vertical fracture sets, combined with horizontal fine layering produce an equivalent medium of orthorhombic or monoclinic symmetry. This is particularly important in fracture reservoir characterization. Fractured reservoirs are azimuthal anisotropic with respect to elastic-wave propagation. In this work we introduce an ellipsoidal approximation for monoclinic media that is able to characterize fractured media near the vertical axis of symmetry. The procedure is basically two-fold. First, we estimate phase velocities near the vertical axis using an expansion of the slowness. Secondly, the phase velocities are used to build the group velocities near the vertical axis. We particularly establish that for monoclinic media ellipsoidal functions in the phase domain correspond to ellipsoidal functions in the group domain. Finally, in order to validate the approximation, the P , S_1 and S_2 ellipsoidal impulse responses are compared for different polar angles with the exact responses obtained by solving numerically the eigenvectors problem from the Christoffel equation. Examples are shown for monoclinic media, and are validated showing results from a previous work for orthorhombic media. The whole procedure is valid for homogeneous media.*

Keywords: Monoclinic symmetry, Orthorhombic symmetry, Anisotropy, Elastic wave propagation, Christoffel equation.

1. INTRODUCTION

An orthorhombic model describes a layered medium fractured in two orthogonal directions with azimuthal anisotropic dependence of the group and phase velocities. Wave propagation in orthorhombic media has been extensively studied (see [1,2] among others) Numerical methods

such as finite differences and ray-tracing using weak anisotropic [3] and elliptical approximation [4] have contributed to the modeling of wave-front in orthorhombic media. Recently Tsvankin [3] stressed out the importance of having different approximations to the group wave velocities in order to perform velocity analysis in fracture structures.

A monoclinic model describes two sets of vertical non-corrugated fractures with a horizontal symmetry plane. Monoclinic media have azimuthal anisotropic dependence of the group and phase velocities. There is abundant geological (in situ) [3,7] evidence of multiple fracture sets, which corroborate the importance of monoclinic models in seismic reservoir characterization; however, velocity analysis, and parameter estimation for monoclinic media is a highly challenging task [5] due to the large number of elastic constants involved.

This paper introduces a mathematical treatment based of the solution of the Christoffel equation in terms of the slowness vector expansion around a vertical axis of symmetry. It is important to choose a coordinate frame where the mathematical description of wave propagation has the simplest form [5]. For instance the equation for the eigenvectors in terms of the slowness and the correspondent eigenvalues are

$$F \equiv [G_{il} - \delta_{il}]U_l = 0, \quad F(p_1 p_2, q = p_3(p_1, p_2)) \equiv \det(c_{ijkl} p_j p_k - \delta_{il}) = 0.$$

U is the polarization vector of a plane wave, δ_{il} is the Kronecker's delta, and \hat{G} is the symmetric Christoffel matrix, \mathbf{p} represents an horizontal slowness vector, and \mathbf{q} represents the vertical slowness vector.

For a horizontal reflector the condition is $p_1 = p_2 = 0$; therefore, the zero offset horizontal events in orthorhombic and monoclinic media are obtained by substituting the correspondents values of \mathbf{q} , and the derivatives $q_{,1} = \frac{\partial q}{\partial p_i} = -\frac{F_i}{F_3}$; where $i = 1, 2$, and F_3 is the derivative of F respect to q . The second order derivatives $q_{,ij} = \frac{\partial^2 q}{\partial p_i \partial p_j}$ contain information about the hyperbolic move-out. The derivatives of fourth order $q_{,ijkl} = \frac{\partial^4 q}{\partial p_i \partial p_j \partial p_k \partial p_l}$ contain information about the non-hyperbolic move-out [3]. Finally, the slowness can be written as

$$q(p_1, p_2) = q^0 + q_{,i}|_0 p_i + q_{,ij}|_0 p_i p_j + q_{,ijk}|_0 p_i p_j p_k + q_{,ijkl}|_0 p_i p_j p_k p_l. \quad (1)$$

From symmetry considerations the derivatives of first $q_{,i}|_0$, and third order $q_{,ijk}|_0$, are equal to zero for both types of symmetry. The derivatives of fourth order are taken to be zero since non-hyperbolic move out is neglected. Eq.(1) yields suitable expressions for the vertical slowness \mathbf{q} in the orthorhombic and the monoclinic cases for the three propagation modes; namely P , S_1 and S_2 .

In voigt's notation the elastic tensor for the monoclinic structure has the form [1,2,5]

$$C_{MN} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}$$

Orthorhombic symmetry is described by nine elastic constants (with $C_{16} = C_{26} = C_{36} = C_{45} = 0$). It has two vertical planes of symmetry $[XZ]$, and $[YZ]$. There is not general solution for the Christoffel equation for orthorhombic symmetry; however, in both symmetry planes are possible analytical solutions. For other angles, a numerical solution is given for each mode by the roots of the characteristic polynomial [2,4].

Monoclinic symmetry is described by thirteen elastic constants, but if C_{45} becomes zero, then the matrix becomes diagonal for vertical propagation and the horizontal axes coincide with the polarization directions of the vertical traveling shear wave [1,5]. Therefore, monoclinic symmetry is described by twelve elastic constants. There is not general solution for the Christoffel equation for monoclinic symmetry; the solution always requires a numerical treatment for each propagation mode. The eigenvalue method through the characteristic polynomial gives the phase velocities and the eigenvector method for \mathbf{U} yields the group velocities [2,5,6].

2. ELLIPSOIDAL PHASE VELOCITIES (WAVE-FRONTS) NEAR THE VERTICAL AXIS

Eq.(1) yields the ellipsoidal phase velocities (wave-fronts) near the vertical axis [4,5]; however, the correspondent derivation is long, and we refer for a detailed description of the method to look at appendix of Ref. [5]. A shear mode separation always occurs in fracture media, where two shear velocities exists. The substitution of $q_{,ij}|_0$ in Eq.(1) using a slowness vector $\vec{p} = (p_1, p_2, q)$, and a unitary phase vector $\vec{n} = (\sin \theta_{i1} \cos \theta_{i2}, \sin \theta_{i1} \sin \theta_{i2}, \cos \theta_{i1})$ yields the square of the phase velocities $W_i = V_i^2 \rho$ (where ρ is the density). The calculation for the monoclinic media near the vertical axis gives the following expression

$$W^i = W^{i,z} \cos^2 \theta_{i1}^2 + \sin^2 \theta_{i1}^2 (W_{11}^{i,nmo} \cos^2 \theta_{i2}^2 + 2W_{12}^{i,nmo} \sin \theta_{i2} \cos \theta_{i2} + W_{22}^{i,nmo} \sin^2 \theta_{i2}^2). \quad (2)$$

Eq.(2) represents an ellipsoid in the phase domain for each elastic mode $i = P, S_1$ and S_2 . For waves traveling in the vertical direction: $W^{P,z} = \frac{1}{\sqrt{C_{33}}}$, $W^{S_1,z} = \frac{1}{\sqrt{C_{55}}}$, and $W^{S_2,z} = \frac{1}{\sqrt{C_{44}}}$.

For the longitudinal mode P , the square of the horizontal NMO velocities for the vertical symmetry planes [11] and [22] are

$$W_{[11]}^{P,nmo} = \frac{(C_{33} - C_{44})(C_{13}^2 + 2C_{13}C_{55} + C_{33}C_{55}) + C_{36}^2(C_{33} - C_{55})}{(C_{33} - C_{44})(C_{33} - C_{55})},$$

$$W_{[22]}^{P,nmo} = \frac{(C_{33} - C_{55})(C_{23}^2 + 2C_{23}C_{44} + C_{33}C_{44}) + C_{36}^2(C_{33} - C_{44})}{(C_{33} - C_{44})(C_{33} - C_{55})}.$$

Outside the symmetry planes the NMO velocity is given by the [12] term

$$W_{[12]}^{P,nmo} = C_{36} \frac{[(2C_{55} - C_{13}) - C_{33}(C_{13} + C_{23} + C_{44} + C_{55})]}{(C_{33} - C_{44})(C_{33} - C_{55})}.$$

For the shear mode S_1 , the square of the NMO velocities are:

$$W_{[11]}^{S_1,nmo} = C_{11} + \frac{[C_{13} + C_{55}]^2}{C_{33} - C_{55}}, W_{[12]}^{S_1,nmo} = C_{16} + \frac{C_{36}[C_{13} + C_{55}]}{C_{33} - C_{55}}, W_{[22]}^{S_1,nmo} = C_{66} + \frac{C_{36}^2}{C_{33} - C_{55}}.$$

Finally, for the shear mode S_2 the square of the NMO velocities are:

$$W_{[11]}^{S2,nmo} = C_{66} + \frac{C_{36}^2}{C_{33} - C_{44}}, W_{[12]}^{S2,nmo} = C_{26} + \frac{C_{36}[C_{23} + C_{44}]}{C_{33} - C_{44}}, W_{[22]}^{S2,nmo} = C_{22} + \frac{[C_{23} + C_{44}]^2}{C_{33} - C_{44}}.$$

3. ELLIPSOIDAL GROUP VELOCITIES (IMPULSE RESPONSES) NEAR THE VERTICAL AXES

In order to generate expressions in monoclinic media for group velocities within the ellipsoidal approximation at small group polar angles ϕ_{1i} , and arbitrary azimuthal group angles ϕ_{2i} , we rely on a transformation using in Ref. [8] for VTI media, and in Ref. [4] for orthorhombic media. These transformations are proposed and used here as follows:

$$\theta_{1i} \rightarrow \phi_{1i}, \quad \theta_{2i} \rightarrow \phi_{2i}, \quad W_{i,phase,monoclinic} \rightarrow, \quad W_{group,monoclinic}^{-1,i}$$

ϕ_{1i} are the polar, and ϕ_{2i} are the azimuthal group velocities angles. Then, ellipsoidal group velocities near the vertical axis are ellipsoids in the group domain. The inverse of the square of the group velocity (impulse response) obtained from “Eq. (2)” for each propagation mode (i, P, S_1, S_2) is

$$W_{group}^{-1,i} = \frac{\cos \phi_{i1}^2}{W_{i,z}^2} + \sin \phi_{i1}^2 \left(\frac{\cos \phi_{i2}^2}{W_{[11]}^{i,nmo}} + \frac{2 \sin \phi_{i2} \cos \phi_{i2}}{W_{[12]}^{i,nmo}} + \frac{\sin \phi_{i2}^2}{W_{[22]}^{i,nmo}} \right), \quad (3)$$

where $W_{group}^i = \rho V_{group}^{2,i}$.

4. NUMERICAL EXAMPLES

The validation of our approximation is performed on the cracked Greenhorn shale case of orthorhombic symmetry, but by aggregating a non-perpendicular fracture set, according to the Muir-Schoenberg theory [7,9], the elastic matrix then, becomes monoclinic. The values of the elastic constants are: $C_{11} = 336.6$, $C_{12} = 117.3$, $C_{13} = 103.3$, $C_{22} = 310.0$, $C_{23} = 92.3$, $C_{33} = 223.9$, $C_{44} = 49.1$, $C_{55} = 54.0$, $C_{66} = 94.6$, $C_{16} = 30.0$, $C_{26} = 30.0$ and $C_{36} = 10.0$. As in Ref. [9] we have chosen C_{ij} to be dimensionless, and the density ρ has been set to unity.

The exact group velocity (impulse response) can be found numerically with the expression [2,6]

$$W_{group}^i = C_{ijkl} \alpha_j \alpha_k \beta_l, \quad (4)$$

where C_{ijkl} are the elastic constants in the usual notation, α_j represents the eigenvectors that correspondent to the unit polarization vectors, β_l correspond to the normal direction of the wave-front, Eq.(4) will be numerically solved in order to compare with Eq.(3)

Figure (1) shows horizontal slices of the 3-D impulse responses for each wave propagation mode at different polar angles in the monoclinic case. It can be observed that the exact group velocity (red color) and the ellipsoidal group velocities (blue color) are almost the same for polar angles with small vertical aperture. As the polar angle ϕ_{1i} increases their separation also increases and the ellipsoidal approximation begins to deteriorate. The maximum approximation error is reached at a polar angle of 90° (not shown here). Figure (2) shows horizontal slices of the

3-D impulse responses for each propagation mode at different polar angles ϕ_{1i} in the orthorhombic case.

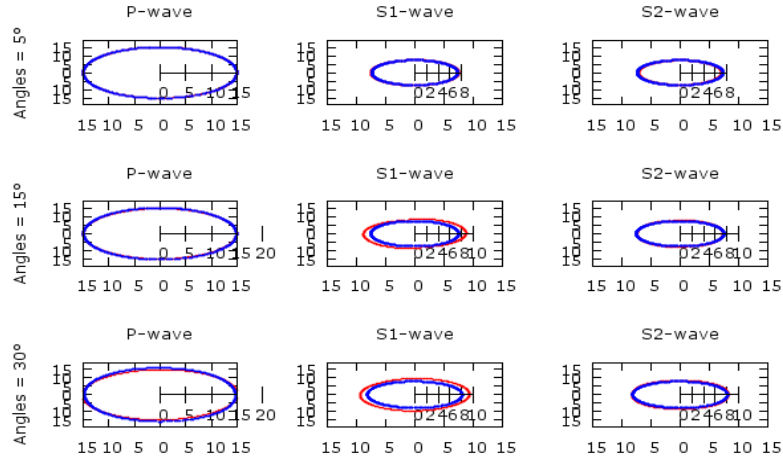


Figure 1: Azimuthal view of each wave-mode impulse response for different polar angles ϕ_{1i} in the monoclinic case. Red color represents the exact solutions from Eq.(4), blue color represents the ellipsoidal approximation of Eq.(3).

It can be observed that exact (red color) and ellipsoidal (blue color) group velocities are almost the same at the $[XY]$ symmetry plane for $\phi_{1i} = 5^\circ$, but at the polar angle ϕ_{1i} of 15° the ellipsoidal approximation of the shear modes begin to deteriorate, as it was shown in Ref.[4]; hence, the horizontal velocity is not well reproduce for large values of ϕ_{1i} .

5. CONCLUSIONS

The impulse responses of all different modes of wave propagation in monoclinic media near the vertical axis are ellipsoids Figure (1). This implies that the ideas depicted in [4, 8] are applicable to monoclinic media as well. On the other hand, it is shown that the horizontal Normal Move-Out velocities for horizontal reflectors are ellipses for monoclinic media in agreement with the results of [5]. It is found that the off diagonal NMO velocities are controlled in monoclinic media for three elastic parameters: the longitudinal mode $W_{[12]}^{P,nmo}$ is controlled by C_{36} , the transversal S_1 mode $W_{[12]}^{S1,nmo}$ is controlled by C_{16} , and the transversal S_2 mode $W_{[12]}^{S2,nmo}$ is controlled by C_{26} . By making these three elastic constants to be zero, the orthorhombic case of Ref.[4] is reproduced as in Figure (2).

Therefore, we particularly establish that for monoclinic media ellipsoidal functions in the phase domain correspond to ellipsoidal functions in the group domain. The ellipsoidal approximation is therefore a simple but a powerful device to reproduce elastic group velocities in fractured media accurately near the vertical axis.

Acknowledgements

We thank Dr. V. Grechka for stimulating discussions. We also acknowledge discussions with Profesores D. Gutierrez, R. Almeida and L. Seijas from the University of Los Andes. This research was supported by the Grant CDCHTA-ULA C-1851-13-05-B.

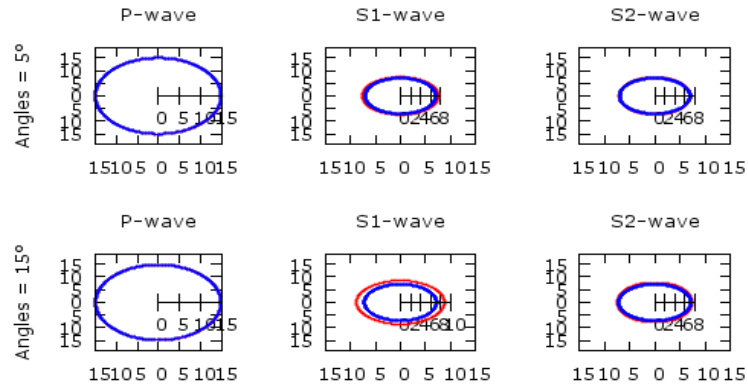


Figure 2: Azimuthal view of each wave-mode impulse response for different polar angles θ_{1i} in the orthorhombic case reproduced according to Ref.[4]. Red color represents the exact solutions from Eq.(4), blue color represents the ellipsoidal approximation of Eq.(3).

REFERENCES

- [1].Musgrave, M. *Crystal Acoustics*, Holden-Day, 1970.
- [2].Helbig, K. *Foundations of anisotropic for exploration geophysics*, Pergamon Press HGE Vol. 22, 1994.
- [3].Tsvankin I. & Grechka V. *Seismology of azimuthally anisotropic media and seismic fracture characterization*, Society of Exploration Geophysicists. Geophysical References Series. Vol. 17, 2011.
- [4].Contreras P., Klie H. & Michelena R. Estimation of elastic constants from ellipsoidal velocities in orthorhombic media, *68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys.* pp. 1491-1494, 1998.
- [5].Grechka V., Contreras P. & Tsvankin I. Inversion of normal move-out for monoclinic media. *Geophysical Prospecting*. Vol. 48, pp. 577-602, 2000.
- [6].Zhou B. & Greenhalgh S. On the computation of elastic group velocities for a general anisotropic medium. *J. Geophys. Eng.* pp. 205-215, 2004.
- [7].Schoenberg M. & Helbig K. Modelling elastic behavior in a vertical fracture earth, *53rd Ann. Meeting of the European Soc. of Expl. Geophys.* pp. 288-289, 1995.
- [8].Byum S. Seismic parameters for media with elliptical velocities dependencies. *Geophysics*. Vol. 47, pp. 1621-1626, 1982.
- [9].Dellinger, J. Anisotropic seismic wave propagation. Ph.D.Thesis, Stanford University, 1991.

ANÁLISIS DE GRIETAS RADIALES EN ELEMENTOS CILÍNDRICOS USANDO EL METODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO - 2D

Paulo Teixeira

Marco González

paulovzla@yahoo.es

margdleon@usb.ve

Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar. Caracas 1080-A, Venezuela.

Abstract: *La mecánica de fractura está jugando un papel importante en el diseño de sistemas de tuberías y recipientes a presión. Numerosos autores trabajan en el área tanto desde un punto de vista experimental como teórico. Sin embargo, con los avances alcanzados en la capacidad de cómputo, técnicas como el método de elementos finitos o el método de elementos de contorno han sido utilizadas para resolver problemas de mecánica de fractura donde el método de elementos de contorno (MEC) ha demostrado ser una herramienta computacional eficiente en el modelado de crecimiento de grietas. En este trabajo se modela el crecimiento de una grieta radial en un perfil cilíndrico de longitud infinita (2D) sometido a presión interna, con el objeto de calcular los factores de intensificación de esfuerzo (SIF) utilizando la integral J y la integral de interacción M. Se considera el criterio del máximo esfuerzo circunferencial para determinar la dirección de crecimiento de grieta en el algoritmo desarrollado con la formulación dual del método de elementos de contorno para resolver el problema elástico fundamental. Los resultados obtenidos fueron comparados satisfactoriamente con los reportados en trabajos semi-analíticos y en la norma API-579.*

Keywords: Grieta radial, Cuerpos cilíndricos, SIF, Integral-J, MEC.

1. INTRODUCCIÓN

Numerosos trabajos han sido desarrollados para evaluar la integridad de componentes cilíndricos presurizados en presencia de grietas, ya que el crecimiento de grietas por fatiga puede ocasionar fallas en dichos componentes por fuga o explosión.

Dentro del alcance de la elasticidad lineal, la mecánica de fractura ha establecido el campo de esfuerzos y deformaciones en la punta de grieta como función de unos parámetros denominados factores de intensificación de esfuerzo (SIF, por sus siglas en inglés) que solo dependen de la geometría y la carga. Estos factores permiten describir el comportamiento mecánico de una grieta y ha sido adoptado por diversos autores y diferentes normas. La validez de esta teoría está limitada por la suposición de fluencia de pequeña escala, al

considerar que la región de deformaciones plásticas es pequeña respecto al resto de la geometría, por lo que todo el sólido se considera en régimen elástico.

Para calcular los SIF existen diferentes técnicas, entre los que destacan el método de la integral J desarrollado por Rice en 1968 [1] y la integral M utilizada por Sutradhar et al. en 2008 [2], que se obtiene a partir de la descomposición de la integral J.

Por otro lado, la norma API 579 [3] reúne los resultados de diversos trabajos y presenta una metodología unificada para evaluar diferentes tipos de fallas y geometrías, incluyendo el caso objeto de estudio (grieta radial en un cuerpo cilíndrico de longitud infinita).

Adicionalmente, Bowie y Freese [4] desarrollaron una solución semi-analítica basada en la técnica de colocación modificada para el problema de una grieta radial interna en un recipiente de pared gruesa sometido a presión interna. El valor de K_I encontrado por estos autores se puede considerar como el resultado más preciso disponible para este problema [5].

El método de elementos de contorno (MEC) ha sido utilizado por diferentes autores para resolver problemas de fractura, gracias a Portela et al. [6], quienes propusieron la formulación dual del método permitiendo modelar grietas coplanares de forma directa. La principal ventaja del MEC para modelar el crecimiento automático de grietas es la capacidad de permitir la modificación de la geometría de la grieta sin afectar la solución, ni los cálculos previamente realizados. Esto, en conjunto con la reducción dimensional del problema ya que solo se requiere discretizar el contorno de la geometría, hace que el método sea computacionalmente atractivo para modelar el crecimiento de grietas [6].

En este trabajo se comparan los resultados obtenidos de aplicar las integrales J y M para calcular los valores de K_I en un elemento cilíndrico con grieta radial, usando el MEC en dos dimensiones, los resultados de Bowie y Freeze, y la norma de ingeniería API 579, con el objeto de validar los resultados obtenidos con el MEC.

2. EL MÉTODO DE ELEMENTOS DE CONTORNO

La formulación del MEC está basada en el teorema de Betti para obtener la Ec. (1), base para el cálculo del campo de desplazamientos en cualquier punto p del dominio a partir de los vectores desplazamiento u y tracción t conocidos en el contorno del sólido Q [7].

$$c_{ij}(p)u_j(p) + \int_S T_{ij}(p, Q)u_j(Q)dS = \int_S U_{ij}(p, Q)t_j(Q)dS \quad (1)$$

Donde $c_{ij} = 1/2$ si p está sobre el contorno y este es continuo o $c_{ij} = 1$ si p está dentro del dominio; adicionalmente T_{ij} es el núcleo de las tracciones y U_{ij} es el núcleo de los desplazamientos. Para resolver el problema elástico en un cuerpo libre de grietas, se discretiza el contorno de la geometría y se escribe la Ec. (1) para cada uno de los nodos, generando un sistema lineal de ecuaciones que se puede resolver al establecer las condiciones de borde [5].

Sin embargo, para un cuerpo con una grieta como la mostrada en la figura 1, donde la cara superior se denomina S_C^+ y la cara inferior se denomina S_C^- , se tiene que ambas caras poseen las mismas coordenadas si estas son coplanares. Esto genera un problema en la formulación del método ya que las ecuaciones escritas para la superficie S_C^+ son linealmente dependientes de las ecuaciones para escritas para S_C^- [6].

Para resolver este problema se puede utilizar la formulación dual del MEC, que consiste en aplicar la Ec. (1) (formulada en desplazamientos) en el contorno de la geometría y en la superficie de grieta S_C^- , y la Ec. (2) (formulada en esfuerzos) para la superficie de grieta S_C^+ . De esta manera, el sistema de ecuaciones queda bien condicionado y se reduce al solo discretizar una superficie de grieta, lo que implica obtener como resultado el desplazamiento

de apertura de grieta Δu [7]. En la Ec. (2), $C_{ij}^* = 1/2$ si p está sobre el contorno y este es continuo, o $C_{ij}^* = 1$ si p está dentro del dominio; por su parte, S_{kij} es el núcleo de las tracciones y D_{kij} es el núcleo de los desplazamientos. Las expresiones completas de los términos de las ecuaciones (1) y (2) se pueden encontrar en [7].

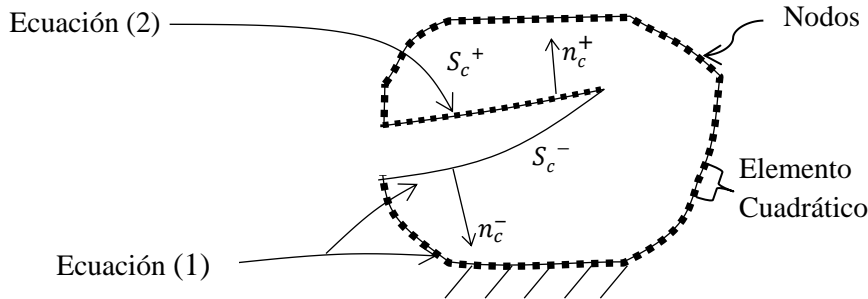


Figura 1 - Geometría de una grieta.

$$C_{ij}^* \sigma_{ij}(p) + \sum_{n=1}^{Ne} \int_{S_n} S_{kij}(p, Q) u_k(Q) d\Gamma = \sum_{n=1}^{Ne} \int_{S_n} D_{kij}(p, Q) t_{jk}(Q) d\Gamma \quad (2)$$

3. MODELO

La Figura 2 muestra el modelo de cuarto de cilindro de radio interno R_i y espesor t con una grieta radial interna de longitud a , ubicada a 45° de los bordes donde se aplican las condiciones de borde.

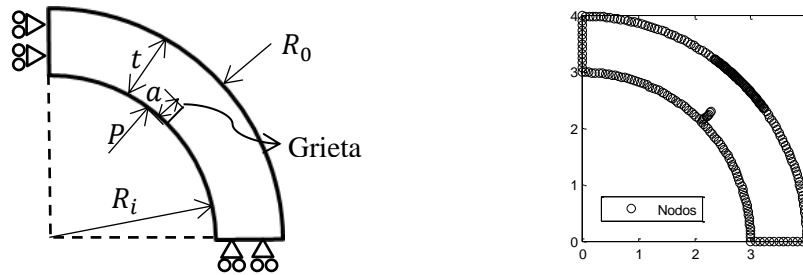


Figura 2 - Modelo de la geometría.

La geometría se discretiza con 136 elementos cuadráticos iso-paramétricos; como condición de borde se restringen los desplazamientos en la dirección normal a los planos de simetría y la cara interna del cilindro, incluyendo la superficie de grieta, es sometida a presión interna.

4. METODOLOGÍA

El MEC es utilizado para resolver el problema elástico. Sin embargo, en el contexto de la mecánica de fractura lineal, el objetivo es calcular los factores de intensificación de esfuerzo (SIF). En el caso de un cilindro con una grieta radial interna, sometido a presión interna, se espera un crecimiento de grieta modo I ocasionado por el esfuerzo circunferencial.

Para calcular K_I se utiliza el método de la integral J [1] indicado en la Ec. (3), así como también la integral de interacción M [2] dada en la Ec. (4). Donde U es la energía de deformación, y aux hace referencia a los campos auxiliares para la integral M.

$$J_k = J_1 = \int_C (U\delta_{1\beta} - \sigma_{i\beta}u_{i,1})n_\beta d\Gamma \quad (3)$$

$$M = \int_\Gamma \left(\frac{1}{2}(\sigma_{ik}\varepsilon_{ik}^{aux} + \sigma_{ik}^{aux}\varepsilon_{ik})\delta_{1j} - (\sigma_{ij}u_{i,1}^{aux} + \sigma_{ij}^{aux}u_{i,1}) \right) n_j d\Gamma \quad (4)$$

Estos cálculos son realizados en una rutina de post-proceso para cada avance de grieta, usando un contorno circular de integración, como se muestra en la figura 3, para luego extraer el valor de K_I usando las expresiones dadas en la Ec. (5) dado en función de K y el módulo de elasticidad E [7].

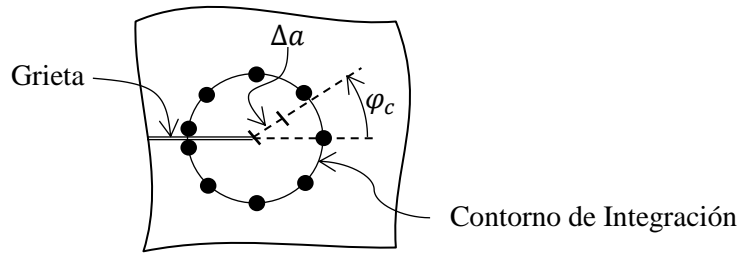


Figura 3 - Modelo de crecimiento de grieta.

$$J = \frac{1}{E'}(K_I^2 + K_{II}^2); \quad M = \frac{2}{E'}(K_I K_I^{aux} + K_{II} K_{II}^{aux}) \quad (5)$$

La implementación del MEC se llevó a cabo con un programa en Matlab®. El crecimiento automático de grieta se efectuó con el criterio del máximo esfuerzo circunferencial, calculando el ángulo de crecimiento φ_c , como se muestra en la figura 3, a partir de los esfuerzos obtenidos en el contorno de integración. El avance de grieta Δa se fijó a partir de la relación $\Delta a/t = 0.025$.

El estudio se realiza para varias configuraciones geométricas denotadas por $R_t = R_i/t$ cubriendo el rango ($1 \leq R_t \leq 20$), con una grieta inicial de dimensión $a/t = 0.05$. El espesor de pared se fijó en $t = 1m$ para todos los casos y la magnitud de la presión es $P = 1Pa$. Aunque los SIF son independientes de las propiedades del material se definieron las siguientes propiedades elásticas del material: $E = 100000Pa$ y $\nu = 0.3$.

5. RESULTADOS

En primer lugar, en la tabla 1 se comparan los SIF calculados mediante el MEC con la solución de Bowie y Freese (B&F) [3] y API 579, donde se destaca la similitud entre los valores dados por J y M . Adicionalmente, se tiene que la diferencia entre los resultados obtenidos y los de referencia es menor a 7%, siendo los valores dados por API 579 mayores que los obtenidos usando MEC y B&F.

Luego, en la figura 4 se grafican los valores obtenidos para la totalidad del rango estudiado de R_t , comparado solo con los valores de API 579, debido a que B&F es válida para $R_t < 4$. El valor de K_I es normalizado como se muestra en la Ec. (6) con el esfuerzo circunferencial para mitigar el efecto del parámetro R_t en los valores.

Los resultados obtenidos son consistentes con la norma API 579 para todos los casos y grandes longitudes de grieta, donde el MEC presenta problemas de estabilidad debido a la integración singular en la punta de la grieta que está cerca del contorno global de la

geometría. No obstante, se alcanzó una diferencia cercana al 7% para configuraciones de pared delgada y $a_t = 0.8$ aunque no se encontraron problemas de convergencia ni estabilidad en esos casos.

Tabla 1. Comparación de K_I para $R_t \leq 3$

R_i/t	a_t	$K_I/(P\sqrt{t})$				Diferencia (%) J vs B&F	Diferencia (%) J vs API
		J	M	B&F	API579		
2/3	0.20	1.68	1.66	1.75	N/A	4,00	N/A
	0.30	2.04	2.02	2.13	N/A	4,23	N/A
	0.40	2.43	2.41	2.51	N/A	3,19	N/A
	0.50	2.90	2.87	2.87	N/A	1,05	N/A
1	0.20	2.10	2.08	2.18	2.21	3,67	4,98
	0.30	2.64	2.61	2.77	2.78	4,69	5,04
	0.40	3.19	3.16	3.35	3.35	4,78	4,78
	0.50	3.83	3.80	3.97	4.05	3,53	5,43
3	0.20	4.40	4.38	4.38	4.46	0,46	1,35
	0.30	6.02	6.00	5.98	6.31	0,67	4,60
	0.40	7.89	7.86	7.85	8.16	0,51	3,31
	0.50	10.10	10.07	10.03	10.84	0,70	6,83

$$K_I = K_I^* P \sqrt{t} \left(1 + \frac{2R_t^2}{2R_t + 1} \right) \tag{6}$$

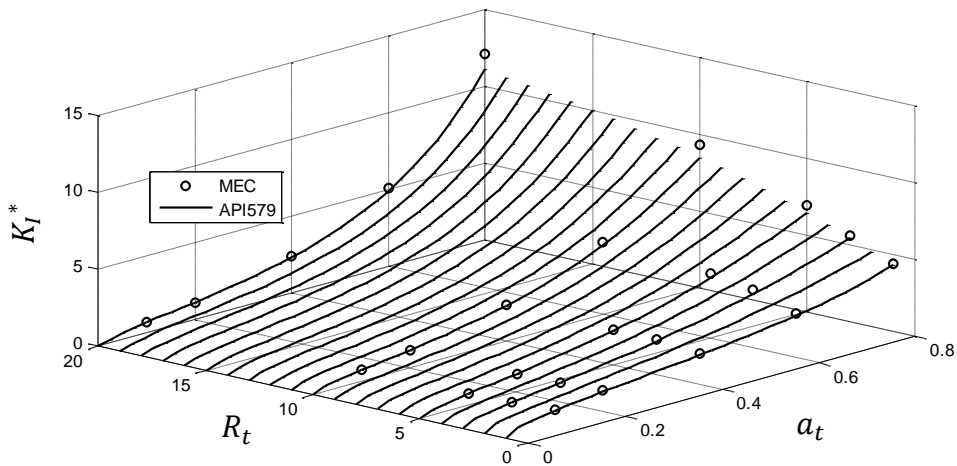


Figura 4 - Comparación de K_I^* con API-579

La solución obtenida usando la Ec. (6) arroja resultados similares para longitudes de grieta $a_t < 0.5$, mientras que para grandes longitudes de grieta la solución tiene un comportamiento diferente.

La mecánica de fractura lineal es válida mientras la zona de deformaciones plásticas esté limitada a una región pequeña, cerca de la punta de grieta. Sin embargo, esta zona puede ser importante como se muestra en la figura 5 donde el esfuerzo de von Mises normalizado respecto al esfuerzo máximo inicial se encuentra graficado.

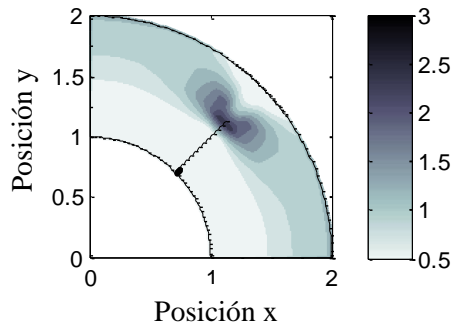


Figura 5 - Distribución de esfuerzos para $R_t = 1$

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un estudio numérico usando el MEC 2D para modelar el crecimiento de grietas, en un recipiente cilíndrico con una grieta radial interna de longitud infinita, con el objeto de determinar los SIF mediante la integral J y la integral M. El MEC-2D permitió el modelado en forma directa sin remallar, así como también evaluar la solución en la cercanía de la punta de grieta. Los resultados fueron validados con la solución propuesta por Bowie y Freese para geometrías de pared gruesa, con buena precisión. Adicionalmente, se compararon los resultados con los valores obtenidos de aplicar la norma API 579 revelando una diferencia menor al 7% para grandes longitudes de grieta. Los resultados mostraron la dependencia que posee K_I de R_t , donde cabe destacar la diferencia en la respuesta que posee la geometría de pared gruesa, respecto a pared delgada ($R_t > 4$, para este trabajo).

REFERENCIAS

- [1] Rice, J. R., A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, *Journal of Applied Mechanics*, Transactions ASME 35(2), pp. 379–386, 1968.
- [2] Sutradhar A., Paulino G. H., y Gray L. J. *The Symmetric Galerkin Boundary Element Method*. Springer-Verlag, Berlin, 2008
- [3] API 579-1 / ASME FFS-1-Fitness-for-Service. American Petroleum Institute and The American Society of Mechanical Engineer, 2007.
- [4] Bowie, O. L., y Freese, C. E., Elastic Analysis for a Radial Crack in a Circular ring, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 4, pp. 315-321, 1972.
- [5] Kendall, D. P. Stress Intensity Factor Equations for Pressurized Thick Walled Cylinders. *Int. Journal of Fracture* 30. R17-R19, 1986.
- [6] Portela, A., Aliabadi M. H., y Rooke D. P. The dual boundary element method: effective implementation for crack problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 33, no. 6, pp. 1269-87, 1993
- [7] Aliabadi, M. H. *The Boundary Element Method. Vol. 2. Applications in Solids and Structures*. John Wiley & Sons, 2002.

MODELAMIENTO BIDIMENSIONAL ELÁSTICO DE MATERIALES BIFÁSICOS A ESCALA MESOSCÓPICA

Héber D'Armas

Gabriela Martínez

hdarmas@usb.ve

gabrielamb@usb.ve

Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar Sartenejas, Caracas-Venezuela

Luis Llanes

luis.miguel.llanes@upc.edu

Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona 08028, España

Resumen. *Se estudian algunas características elásticas de materiales bifásicos a nivel mesoscópico paralelamente con materiales porosos, según el modelo de Eudier con una modificación y considerando la porosidad como una fase con características elásticas nulas. En los materiales porosos se observa que la concentración de esfuerzos está íntimamente relacionada a la geometría de los poros, hecho que es conocido. Por otra parte, en la matriz de los materiales bifásicos se observa que se genera un campo tensional de tracción de mayor intensidad en la zona frontal a la segunda fase, considerando la dirección de una carga uniaxial, hecho que no es ampliamente conocido.*

Palabras claves: Material compuesto, porosidad, método de elementos finitos, materiales bifásicos, escala mesoscópica.

1. INTRODUCCION

En este trabajo se presta especial atención a los materiales bifásicos constituidos por una matriz metálica y partículas de segunda fase inmersas en dicha matriz, considerando para el estudio que la intercara matriz-partícula es de contacto perfecto. Por otra parte, si se consideran las partículas como una fase con características elásticas nulas, es decir agujeros, se puede hablar de un material poroso. Un modelo muy sencillo para materiales porosos es el propuesto por Eudier [1], en el cual se considera que el material está conformado por celdas porosas

(sistema mesoscópico), con poros perfectamente esféricos (ver Figura 1-a). Al aplicar una carga de tracción en la celda porosa, en el área resistente se genera un esfuerzo máximo, σ_{max} , que debe ser inferior a la resistencia a la fluencia de la matriz, tal que no ocurra deformación plástica (Figura 1-b).

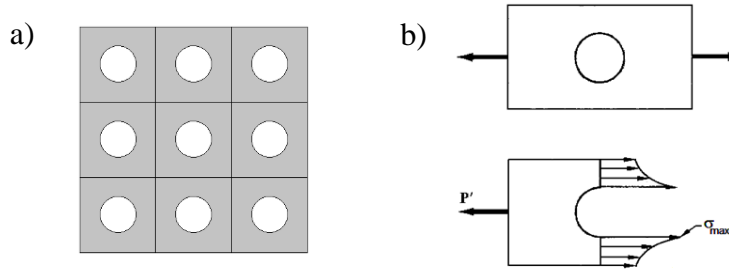


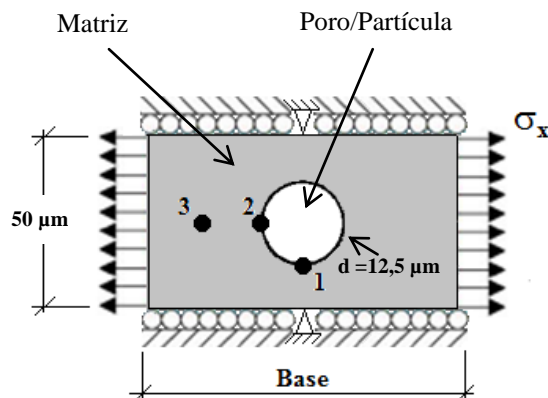
Figura 1- . Modelo simplificado de material poroso: a) modelo de Eudier; b) distribución de esfuerzos.

Chawla y Deng [2] realizaron un modelaje por elementos finitos basado en la microestructura real de aceros sinterizados con diferentes densidades (porosidades), obteniendo que a mayor porosidad ocurre mayor intensificación de la deformación en las áreas resistentes y, por consiguiente, se observó menor resistencia a la tracción y a fatiga. Molinari *et al.* [3] desarrollaron un modelo matemático en base a resultados experimentales, encontrando que la resistencia al impacto del acero sinterizado 1,5%Cr-0,2%Mo es proporcional al área resistente del material poroso. Saritas *et al.* [4] utilizaron el factor “circularidad” propuesto por DeHoff y Aigeltinger [5], y concluyeron que a “mayor circularidad” se tiende a mejorar el comportamiento mecánico de los aceros sinterizados en relación al crecimiento de grietas por fatiga. De lo anterior, se puede decir que el comportamiento mecánico ante cargas estáticas, de fatiga e impacto de una matriz porosa se ve afectado en gran parte, desde el punto de vista de análisis de esfuerzos, por concentraciones de esfuerzos por efecto de la geometría de los poros y el área efectiva de resistencia de la matriz por efecto del tamaño de poro.

Al considerar partículas de refuerzos, frecuentemente las mismas presentan mayor rigidez que la matriz y la falla primaria ante carga de tracción es atribuida a microplasticidad por la concentración de esfuerzos en la matriz por efecto de entalla de las partículas [6]. Según se puede extraer del trabajo de Chawla y Shen [6], el modelamiento del daño en los materiales compuestos de matriz metálica normalmente se realiza función de celdas unitarias, siendo muy enfocado en la fractura de las partículas de refuerzo y la nucleación de porosidades (descohesión de las partículas, lo que justamente produciría un material poroso). Desde esta perspectiva, no existe mayor investigación en el modelamiento del daño en la matriz desde la publicación de tal trabajo y los actuales momentos.

2. MODELAMIENTO ELÁSTICO SIMPLIFICADO

En la Figura 2 se ilustra el modelo simplificado de una celda porosa en base al modelo de Eudier; se utilizó el modelo de Eudier modificado al considerar una partícula de refuerzo, siendo las condiciones de borde las que se muestran en tal figura. Para el análisis numérico, se utilizó el software Ansys 14.5 ©, realizándose un análisis elástico lineal. Las características del modelo se pueden observar en la Figura 2.



Tipo de elemento: Cuadrilátero de 8 nodos (PLANE183) con espesor unitario (se supuso un estado plano de esfuerzos). Se realizó un análisis de convergencia.

Desplazamientos: Se impide en los extremos superior e inferior el desplazamiento vertical y se fija el nodo medio de cada una de éstas aristas.

Tipo de análisis: Estático y elástico-lineal.

$$\sigma_x = 20 \text{ MPa} \quad E = 280 \text{ y } 600 \text{ MPa} \quad \nu = 0,3$$

$$E_m = \text{módulo elástico de la matriz} \quad E_p = \text{módulo elástico de la partícula}$$

Figura 2- . Modelo simplificado de celda porosa y reforzada.

2.1 Comprobación del Principio de Saint Venant

Con la finalidad de verificar que las condiciones de contorno de aplicación de la carga no afecten los resultados en la región donde se desean estudiar los esfuerzos, se ha variado la distancia entre la línea de aplicación de la carga y los tres puntos de control que se muestran en la Figura 2. En la Tabla 1 se muestran los esfuerzos promedios y la desviación estándar en los puntos de control al variar la base entre 50 y 150 μm de 10 en 10 μm , tanto para la celda porosa como para la celda con partícula de refuerzo menos rígida que la matriz. De manera análoga, en la Tabla 1 también se muestran los esfuerzos al variar la base, tanto en la celda porosa como para la celda con partícula de refuerzo más rígida que la matriz.

Se observa que los esfuerzos máximos para las celdas porosas con E_m igual a 280 GPa y 600 GPa se encuentran en el punto 1, como es de esperarse, y que los esfuerzos son de la misma magnitud en ambos casos. Para la celda con la matriz más rígida que la partícula, los esfuerzos máximos se encuentran también en el punto 1. Sin embargo, para la celda con la partícula más rígida que la matriz, los esfuerzos máximos ocurren en el punto 2, por lo que existe una influencia de la rigidez relativa entre la matriz y la partícula en la ubicación de los esfuerzos máximos. Por otra parte, al variar la base, no se observa una desviación de esfuerzo apreciable en los puntos de control, por lo que se puede decir que la base de la celda entre 50 μm y 150 μm cumple con el principio de Saint Venant para el caso de estudio, desde el punto de vista fenomenológico.

Tabla 1. Esfuerzos promedios y desviación estándar en puntos de control.

Matriz (m) con partícula (p) menos rígida ($E_m = 600 \text{ GPa}$; $E_p = 280 \text{ GPa}$)							
Celda porosa	σ_{x1} (MPa)	σ_{x2} (MPa)	σ_{x3} (MPa)	Celda Reforzada	σ_{x1} (MPa)	σ_{x2} (MPa)	σ_{x3} (MPa)
	49,13	0,62	18,20		24,02	17,28	19,77
	\pm	\pm	\pm		\pm	\pm	\pm
	2,47	0,07	1,47		0,21	0,04	0,18

Matriz (m) con partícula (p) más rígida ($E_m = 280 \text{ GPa}$; $E_p = 600 \text{ GPa}$)							
Celda porosa	σ_{x1} (MPa)	σ_{x2} (MPa)	σ_{x3} (MPa)	Celda Reforzada	σ_{x1} (MPa)	σ_{x2} (MPa)	σ_{x3} (MPa)
	49,13	0,62	18,20		13,97	24,08	20,33
	\pm	\pm	\pm		\pm	\pm	\pm
	2,47	0,07	1,47		0,31	0,07	0,24

2.2 Campo Tensional Elástico en una Celda

En las figuras 3a-c se muestra el efecto de la inclusión de una partícula de refuerzo en una celda porosa de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ con un poro de $8 \mu\text{m}$. El esfuerzo en el punto 1 es máximo, y cuando la partícula de refuerzo es de menor rigidez que la matriz, disminuye desde 59,37 MPa (celda porosa) a 30,17 MPa. Por su parte, el valor del esfuerzo en el punto 1 llega a ser mínimo, 12,37 MPa, cuando la partícula es de mayor rigidez que la matriz. Se pone de relieve que en el punto 2 ocurre justamente lo contrario, hecho que se observó con anterioridad. Así, el esfuerzo en el punto 2 pasa de un mínimo de -0,25 MPa en la celda porosa a un mínimo de 14,78 MPa cuando la partícula es de menor rigidez. De igual manera, se llega a producir un esfuerzo máximo en el punto 2, 23,98 MPa en el caso de una partícula de mayor rigidez que la matriz.

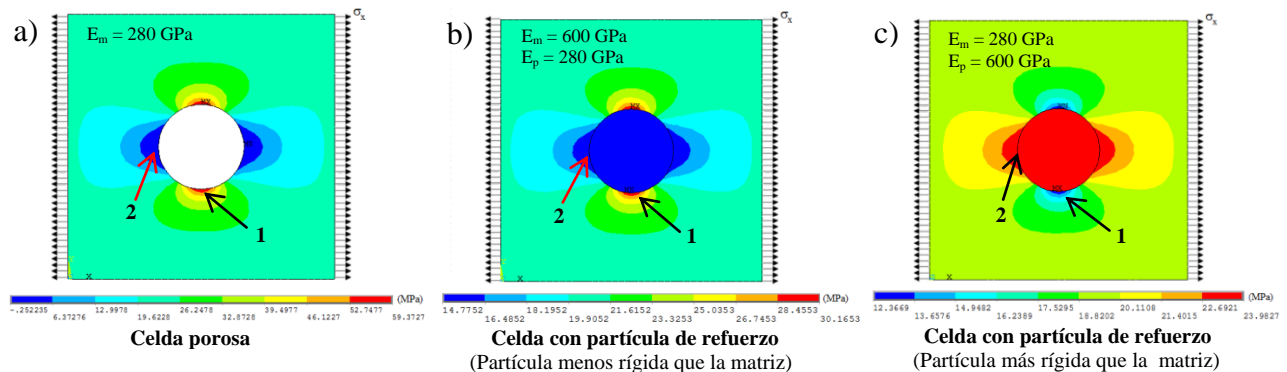


Figura 3- . Efecto de partícula de refuerzo en celda (distribución de esfuerzos en la dirección de la carga): a) celda sin refuerzo; b) celda con partícula menos rígida; c) celda con partícula más rígida.

En referencia a los esfuerzos producidos en las partículas, en todos los casos se mantiene prácticamente homogéneo en las mismas, siendo mínimo para el caso de una partícula de menor rigidez que la matriz, y máximo para el caso de una partícula con mayor rigidez que la matriz.

2.3 Influencia del Tamaño de Poro/Partícula de Refuerzo

Se considera el estudio de la matriz y la partícula con los módulos elásticos $E_m = 280$ GPa y $E_p = 600$ GPa, respectivamente. En la Figura 4-a se puede observar el incremento del valor del esfuerzo máximo en el punto 1 en la celda porosa a medida que se aumenta el diámetro del poro debido a la disminución del área resistente. Por otra parte, se puede apreciar que el esfuerzo máximo en la matriz reforzada presenta un valor relativamente estable cuando se incrementa el tamaño de la partícula de refuerzo. De manera análoga, en la Figura 4-b se aprecia que el alargamiento, δ , de la matriz porosa presenta un incremento de manera exponencial cuando el tamaño del poro aumenta. Por su parte, a medida que se incrementa el tamaño de la partícula de refuerzo, el alargamiento, δ , de la matriz reforzada presenta cierta estabilidad.

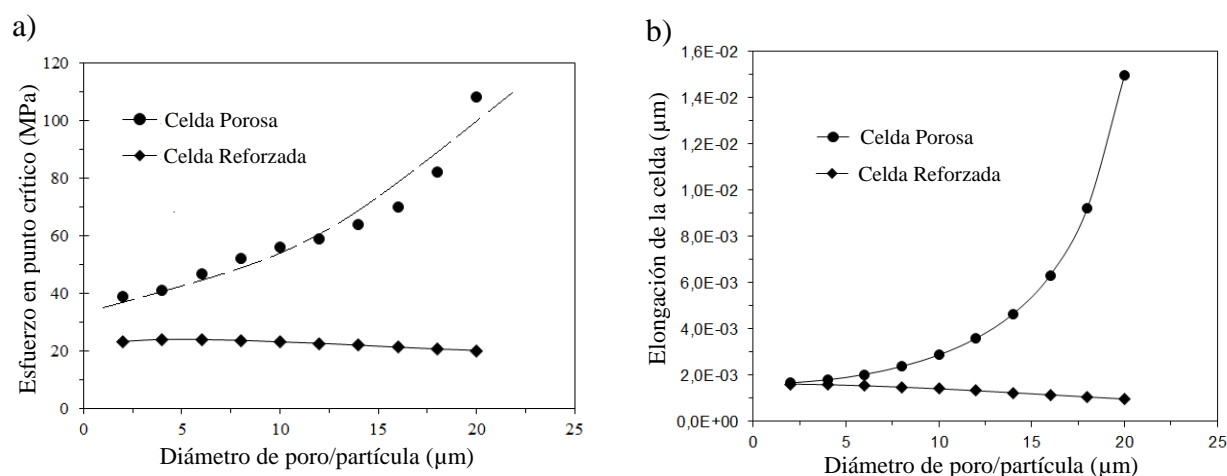


Figura 4- . Efecto del tamaño de poro/partícula en una celda: a) esfuerzo en punto crítico; b) elongación de la celda.

2.4 Microestructura Real

En la Figura 5-a se muestra la microestructura de un material bifásico real constituido por una matriz martensítica y carburos con módulos de elasticidad, E , de aproximadamente 280 GPa y 600 GPa, respectivamente.

El análisis de esfuerzos de una celda dimensionada convenientemente suponiendo que no presenta partículas de refuerzo se muestra en la Figura 5-b. Se puede apreciar que las concentraciones de esfuerzo se localizan en las entallas producidas por las porosidades, con orientación preferencial del gradiente de esfuerzo en sentido perpendicular a la aplicación de la carga, análogamente con el punto 2 de la Figura 3-b. De la misma manera, en la Figura 5-c se muestra el análisis de esfuerzos para la celda con partículas de refuerzo, donde se observa que

las concentraciones de esfuerzo se localizan en las entallas producidas por las partículas, y particularmente dentro de ellas. En las figuras 5-d y 5-e se muestran detalles ampliados del análisis tensional de la microestructura de interés (contraste modificado con fines demostrativos), pudiéndose observar los lugares donde ocurren el esfuerzo máximo, MX y el esfuerzo mínimo, MN. En la Figura 5-e se indican zonas de la matriz donde se aprecian áreas de mayor esfuerzo en la misma, las cuales se presentan en orientación preferencial en la puntas de las partículas de refuerzo en dirección a la carga aplicada, de manera análoga a la Figura 3-c; en este caso, el mayor esfuerzo se localiza en una zona de la partícula más voluminosa con un gran efecto de entalla y escasa sección transversal, MX en la Figura 5-e.

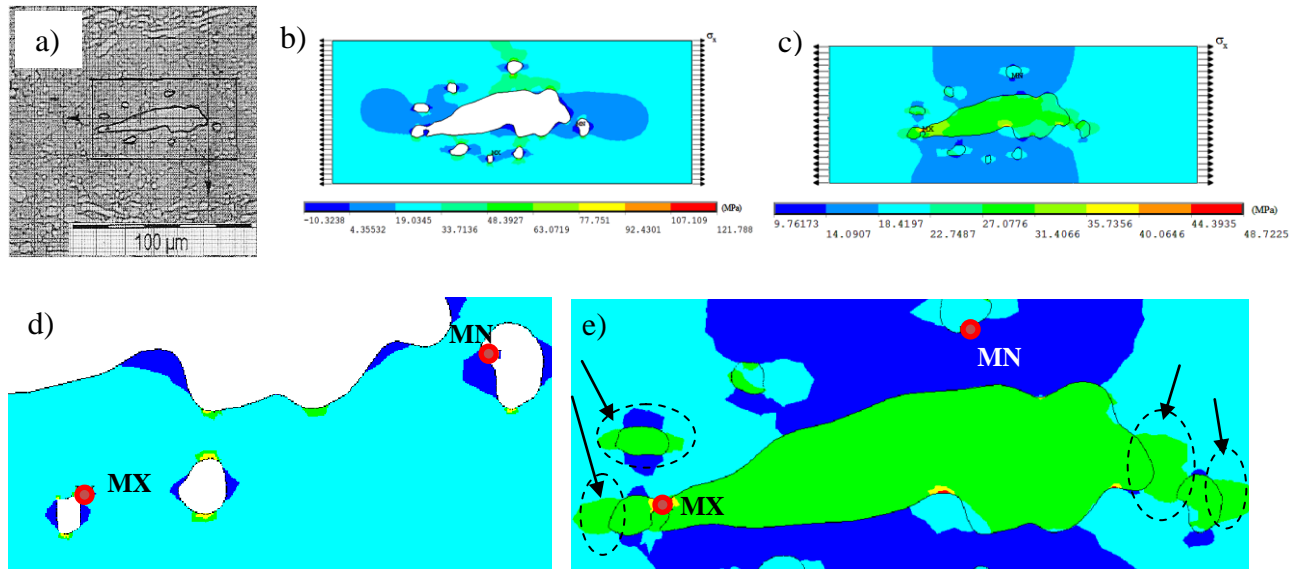


Figura 5- . Distribución de esfuerzos en celda de material real evaluada numéricamente: a) imagen proveniente de microestructura real; b) celda porosa; c) celda con partículas de refuerzo; d) ampliación del material poroso; e) ampliación del material bifásico.

3. CONSIDERACIONES FINALES

Se ha podido corroborar que las concentraciones de esfuerzos en una matriz porosa se producen por un efecto de entalla generado por la geometría de los poros. Sin embargo, cabe agregar que tal concentración se efectúa con un gradiente de esfuerzos preferencialmente en una dirección perpendicular a la dirección de aplicación de la carga. En el caso de cargas cíclicas y sabiendo que la generación de grietas por fatiga puede ocurrir a valores de esfuerzos nominalmente inferiores a la resistencia a la fluencia de la matriz, se puede decir que tales concentraciones son posibles inicios de grietas por fatiga y, por supuesto, de microplasticidad ante cargas estáticas, lo que concuerda con Chawla y Deng [2].

Por otra parte, en la matriz del material bifásico se observa la generación de un campo tensional de mayor intensidad en la zona frontal a la segunda fase, en dirección de la carga aplicada, considerando una carga uniaxial, lo cual es un hecho que no es ampliamente conocido. Haciendo analogía con lo expresado en el epígrafe anterior con respecto a cargas estáticas y fluctuantes, se puede decir que existe la posibilidad de que se produzcan

microplasticidades (concordancia con Chawla y Shen [6]) y hasta la generación de grietas por fatiga en dicho campo tensional con mayores solicitaciones en la matriz. En cuanto a las partículas de refuerzo o de segundas fases, se observa que las mismas hacen que los esfuerzos en la sección de la matriz donde se ubican disminuyan, a costa de un incremento del esfuerzo actuando sobre ellas. Esto trae como consecuencia que exista posibilidad de su fractura, en función de secciones transversales de menor magnitud y concentraciones de esfuerzos. La microplasticidad y la generación de microgrietas por fatiga en la matriz son hechos que han sido observados por Picas *et al.* [7] en un acero de herramienta para trabajo en frío, los cuales pueden ser justificados mediante los conceptos discutidos en el presente trabajo.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se puede concluir que mediante la utilización de un modelo de Eudier modificado, se ha ahondado en el conocimiento de los mecanismos de daño en la matriz de los materiales bifásicos. Así, se ha podido conceptualizar la localización de concentraciones de esfuerzo en la matriz que pueden dar lugar a la ocurrencia de microplasticidad y fatiga en una matriz metálica o rotura, en caso de una matriz frágil, hechos que no son ampliamente conocidos. Ello, además de la posible rotura de partículas y decohesiones de las mismas en la matriz, lo cual concuerda con observaciones experimentales presentadas en la literatura.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la valiosa colaboración prestada por el personal del “Centro de Integridad Estructural, Micromecánica y Fiabilidad de Materiales” de la Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España) y del “Laboratorio de Mecánica Computacional” de la Universidad Simón Bolívar (Caracas, Venezuela).

REFERENCIAS

- [1].Eudier, M., The Mechanical Properties of Sintered Low-alloy Steels. *Powder Metallurgy*, vol. 5, n. 9, pp. 278–286, 1962.
- [2].Chawla, N., & Deng, X., Microstructure and Mechanical Behavior of Porous Sintered Steels, *Materials Science and Engineering A 390*, pp. 98–112, 2005.
- [3].Molinari, A., Menapace, E., Santuliana, G., & Straffelini, G., A Simplified Model for the Impact Resistance of Porous Sintered Steels, *Powder Metallurgy Progress*, vol.11, n.1-2, pp.12-20 63–89, 2011.
- [4].Saritas, S., Causton, R., James, B & Lawley, A., Effect of Microstructural Inhomogeneities on the Fatigue Crack Growth Response of a Prealloyed and two Hybrid P/M Steels, *PM²TEC2002/World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Material Orlando, Florida*, 2002.

- [5].DeHoff, R., & Aigeltinger, E., Experimental Quantitative Microscopy with Special Application to Sintering, *Perspectives in Powder Metallurgy-Advanced Experimental Techniques in Powder Metallurgy*, vol.5, pp.81-137, Plenum Press, New York, 1970.
- [6].Chawla, N., & Shen, Y., Mechanical Behavior of Particle Reinforced Metal Matrix, *Advanced Engineering Materials*, n.6, pp. 357–370, 2001.
- [7].Picas, I., Cuadrado, N., Casellas, D. Goetz, A. y Llanes, L., Efecto de la Microestructura en la Nucleación de Fisuras en Aceros de Herramienta de Trabajo en Frío, *Anales de Mecánica de la Fractura*, vol. 1, n. 28, XXVII Encuentro del Grupo Español de Fractura, Gijón, España, 2011.

EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN “COLUMNA FUERTE VIGA DÉBIL” EN PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO MEDIANTE ANÁLISIS ESTÁTICOS NO LINEALES

Angelo Marinilli

angelo.marinilli@ucv.ve

angelomarinilli@gmail.com

Instituto de Materiales y Modelos Estructurales - IMME, Facultad de Ingeniería,
Universidad Central de Venezuela

Abstract. *En este trabajo se evalúan los procedimientos de la Norma Venezolana Fondonorma 1753:2006 para generar la condición columna fuerte viga débil. Para ello se diseñó una estructura, se ajustó según los procedimientos y se evaluó su comportamiento sismorresistente mediante análisis estáticos no lineales (pushover). Se identificaron los valores de la relación de resistencias para generar mecanismos plásticos de colapso ideales y se evaluó su confiabilidad.*

Keywords: pórticos, concreto reforzado, columna fuerte viga débil, *pushover*, análisis probabilístico

1. INTRODUCCIÓN

Las normas sismorresistentes para estructuras de concreto reforzado presentan estrategias para favorecer la formación de rótulas plásticas en los extremos de las vigas y prevenir la formación de rótulas plásticas en las columnas, lo que se conoce como condición “columna fuerte viga débil”. Particularmente, la Norma Venezolana Fondonorma 1753:2006 (NVF 1753) [1] establece dos procedimientos para lograr esta condición. El Procedimiento 1 compara las resistencias a flexión de vigas y columnas en todos los nodos de una estructura y el Procedimiento 2 compara las resistencias de todas las vigas y todas las columnas en cada nivel.

La efectividad de ambos procedimientos para generar la condición columna fuerte viga débil se puede evaluar mediante análisis estáticos no lineales, usualmente conocidos como *pushover*, bajo la acción de diversos patrones de cargas laterales. Por otra parte, la aplicación de cualquiera de estos procedimientos depende de las propiedades mecánicas de los materiales estructurales, particularmente de la resistencia a compresión del concreto (f'_c) y la tensión de cedencia del acero de refuerzo (f_y), cuyo efecto se puede evaluar mediante análisis probabilísticos.

El objeto de este trabajo es evaluar los procedimientos de la NVF 1753 para generar la condición columna fuerte viga débil, considerando el efecto de la variabilidad de las propiedades mecánicas de los materiales estructurales y constatando su eficacia mediante análisis estáticos no lineales.

2. LA CONDICIÓN COLUMNA FUERTE VIGA DÉBIL

La estrategia normativa para generar la condición columna fuerte viga débil consiste en asegurar que la sumatoria de las resistencias de las columnas (ΣMc) sea mayor que la sumatoria de las resistencias de las vigas (ΣMv), mediante la aplicación de la Ec. (1).

$$\Sigma Mc \geq \alpha \Sigma Mv \quad (1)$$

De acuerdo con la NVF 1753, el Procedimiento 1 consiste en aplicar la Ec. 1 en cada nodo de la estructura y el Procedimiento 2 en aplicarla en cada nivel de la estructura. En ambos casos la relación de resistencias es $\alpha = 6/5$. Es interesante aclarar que ambos procedimientos tienen como objeto tan sólo evitar la formación de mecanismos de piso y no necesariamente favorecen la formación de rótulas plásticas en los extremos de las vigas y en la base de las columnas de planta baja, lo que se identifica como mecanismo plástico de colapso ideal. La Fig. 1 muestra los mecanismos de piso y el mecanismo ideal para un pórtico de dos pisos.

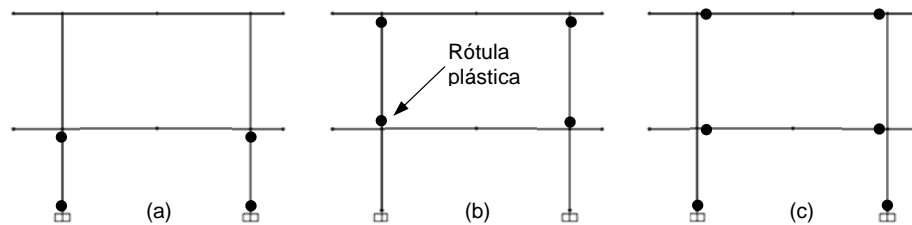


Figura 1. Mecanismos plásticos de colapso para un pórtico de dos pisos y un vano: (a) mecanismo de primer piso, (b) mecanismo de segundo piso y (c) mecanismo ideal

3. METODOLOGÍA

A continuación se presentan los detalles de la metodología empleada para cumplir con el objetivo propuesto. En primer lugar se diseñó una estructura de acuerdo con la normativa vigente en el país [1, 2 y 3] con la ayuda del programa comercial *ETABS Nonlinear Version 9.7.3*. Luego se ajustó el diseño mediante la aplicación de cada uno de los procedimientos establecidos en la NVF 1753. Posteriormente se verificó si la aplicación del Procedimiento 1, o del Procedimiento 2 según fuese el caso, favorece el comportamiento sismorresistente esperado mediante la ejecución de análisis estáticos no lineales usando dos patrones de cargas laterales. En cada caso se verificó si el procedimiento usado, además de evitar la formación de mecanismos de piso, favorece el desarrollo del mecanismo ideal. Luego se realizaron ajustes sucesivos con diferentes valores de la relación de resistencias (α) para cada procedimiento hasta lograr que se formara el mecanismo plástico de colapso ideal. Una vez identificados estos valores se realizaron análisis probabilísticos, considerando la variabilidad de las propiedades mecánicas de los materiales, con

el fin de establecer la garantía que ofrecen para evitar la formación de mecanismos de piso y favorecer la formación del mecanismo de colapso ideal mostrados en la Fig. 1.

3.1 Caso de estudio

La estructura analizada es un pórtico plano de concreto reforzado de dos niveles y un vano, cuya geometría pueden observarse en la Fig. 2. Las dimensiones de los elementos estructurales son las siguientes: las columnas de la planta baja (C-PB) y de la planta alta (C-PA) son de $40 \times 40 \text{ cm}^2$, la viga del entrepiso (V-EP) es de $30 \times 60 \text{ cm}^2$ y la viga del techo (V-TE) es de $30 \times 50 \text{ cm}^2$. Para fines de análisis de supuso que la edificación está ubicada en Caracas sobre un terreno firme y que en ella se puede generar concentraciones públicas.

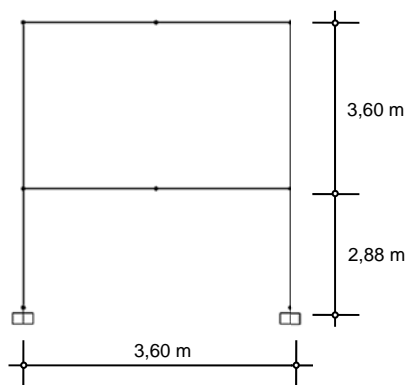


Figura 2. Geometría de la estructura analizada

La Tabla 1 muestra los valores nominales, las distribuciones probabilísticas, las medias y los coeficientes de variación (CV) de la resistencia a compresión del concreto (f'_c) y la tensión de cedencia del acero de refuerzo (f_y). Estas características fueron seleccionadas de acuerdo con las referencias [4, 5 y 6]. Los valores nominales fueron utilizados para el diseño de la estructura y los ajustes sucesivos mediante los Procedimientos 1 y 2 de la NVF 1753. Los análisis estáticos no lineales fueron realizados con los valores medios o valores esperados de las variables según se recomienda en la referencia [7]. Las distribuciones fueron utilizadas para los análisis probabilísticos considerando que las variables aleatorias son independientes.

Tabla 1. Variables aleatorias consideradas en los análisis

Variable aleatoria	Valor nominal (MPa)	Distribución	Media (MPa)	CV
f'_c	25	Normal	31.3	0.15
f_y	420	Normal	483	0.05

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 2 muestra las cuantías (relación entre el área del acero de refuerzo longitudinal colocado y el área de la sección transversal del elemento estructural) resultantes del diseño de las vigas de la estructura. Por simplicidad el refuerzo de las vigas se dispuso de manera simétrica.

Tabla 2. Cuantías del acero de refuerzo longitudinal colocado en las vigas

Viga	Cuantía acero inferior	Cuantía acero superior
V-TE	0.0063	0.0063
V-EP	0.0072	0.0072

Una vez diseñadas las vigas se procedió a seleccionar el acero de refuerzo de las columnas con la finalidad de satisfacer el Procedimiento 1 o el Procedimiento 2 de la NVF 1753. Los ajustes se realizaron para los siguientes valores de la relación de resistencias α : 1.00, 1.20 (valor normativo), 1.50 y 2.00. La Tabla 3 muestra las cuantías del acero de refuerzo longitudinal colocado en las columnas. Se puede observar que ambos procedimientos requieren el mismo refuerzo en las columnas de la planta alta, pero el Procedimiento 2 requiere más acero en las columnas de planta baja que el Procedimiento 1.

Tabla 3. Cuantías del acero de refuerzo longitudinal colocado en las columnas

Procedimiento	1		2	
	Cuantía C-PB	Cuantía C-PA	Cuantía C-PB	Cuantía C-PA
α				
1.00	0.010	0.013	0.023	0.013
1.20	0.010	0.016	0.027	0.016
1.50	0.013	0.021	0.036	0.021
2.00	0.018	0.029	0.048	0.029

4.1 Análisis estáticos no lineales

Se realizaron análisis estáticos no lineales de acuerdo con los lineamientos de las referencias [7 y 8] sobre todas las estructuras diseñadas, aplicando patrones de carga lateral triangular (L1) y uniforme (L2) mediante el programa *ETABS*. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos indicando el tipo de mecanismo de colapso desarrollado para cada patrón de carga. Se observa que al aplicar el Procedimiento 1 con $\alpha \geq 1.50$ ambos patrones de carga producen el mecanismo plástico de colapso ideal. Por otra parte, al aplicar el Procedimiento 2 con cualquier valor de α se evitan los mecanismos de piso, pero sólo al aplicarlo con $\alpha = 2.00$ ambos patrones de carga producen el mecanismo plástico de colapso ideal. Estos valores límite se identifican en lo sucesivo como α_{mi} .

Tabla 4. Resultados de los análisis estáticos no lineales

Procedimiento	1			2		
	Mecanismo de piso	Mecanismo mixto	Mecanismo ideal	Mecanismo de piso	Mecanismo mixto	Mecanismo ideal
α						
1.00	L2	-	L1	-	L1	L2
1.20	L2	-	L1	-	L1	L2
1.50	-	-	L1, L2	-	L1	L2
2.00	-	-	L1, L2	-	-	L1, L2

4.2 Análisis probabilísticos

Se realizaron análisis probabilísticos para evaluar si la variabilidad de f_c y f_y puede afectar la formación del mecanismo plástico de colapso ideal con los valores de α_{mi} identificados anteriormente. El primer análisis se realizó mediante el Método de los Estimadores Puntuales [9]. Puesto que se tienen dos variables aleatorias independientes, la aplicación del método requiere realizar la evaluación en los cuatro casos mostrados en la Tabla 5, donde $m[...]$ es la media y $s[...]$ es la desviación estándar de cada variable aleatoria. Los análisis estáticos no lineales mostraron la formación del mecanismo plástico de colapso ideal en todos los casos.

Tabla 5. Casos para la aplicación del Método de los Estimadores Puntuales

Caso	f_c [MPa]	f_y [MPa]
1	$m[f_c] + s[f_c] = 36.0$	$m[f_y] + s[f_y] = 507.2$
2	$m[f_c] + s[f_c] = 36.0$	$m[f_y] - s[f_y] = 458.8$
3	$m[f_c] - s[f_c] = 26.6$	$m[f_y] + s[f_y] = 507.2$
4	$m[f_c] - s[f_c] = 26.6$	$m[f_y] - s[f_y] = 458.8$

La aplicación del Método de Montecarlo [5] permitió determinar la probabilidad que las relaciones de resistencias fueran menores que aquellas que no garantizaron la generación del mecanismo ideal, calculado como $P[\alpha \leq \alpha_i]$. La Figura 3 muestra los histogramas de las relaciones de resistencias obtenidas mediante simulaciones realizadas con 100 pares de valores de f_c y f_y generados aleatoriamente. Las medias y los coeficientes de variación obtenidos se muestran en la Tabla 6. Las probabilidades evaluadas suponiendo distribuciones lognormales se muestran en la Tabla 7, observándose que la probabilidad que $\alpha \leq 1.20$ para el Procedimiento 1 y $\alpha \leq 1.50$ para el Procedimiento 2 son despreciables y, por lo tanto, la confiabilidad tiende a uno.

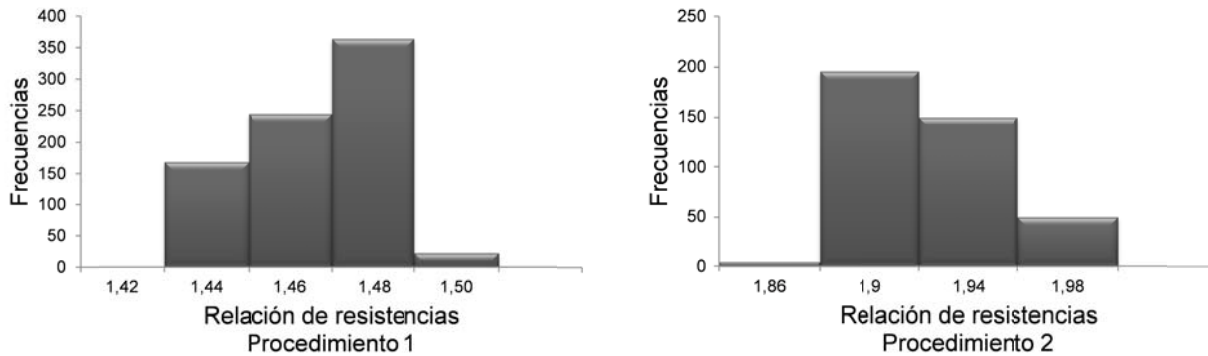


Figura 3. Histogramas de las relaciones de resistencias obtenidas mediante simulación

Tabla 6. Relaciones de resistencia obtenidas mediante simulación

Procedimiento	Relación de Resistencias (α)	
	Media	CV
1 ($\alpha_{mi} = 1.50$)	1.46	0.011
2 ($\alpha_{mi} = 2.00$)	1.91	0.016

Tabla 7. Probabilidades de no excedencia para las relaciones de resistencia

Relación de Resistencias (α_i)	P[$\alpha \leq \alpha_i$]	
	Procedimiento 1 ($\alpha_{mi} = 1.50$)	Procedimiento 2 ($\alpha_{mi} = 2.00$)
1.00	4.040E-269	0
1.20	5.135E-73	4.111E-194
1.50	0.9971	9.891E-54
2.00	1	0.9989

5. CONCLUSIONES

Se evaluaron los Procedimientos 1 y 2 de la NVF 1756 para generar la condición columna fuerte viga débil evaluando su eficacia mediante análisis estáticos no lineales. Los análisis probabilísticos realizados permiten afirmar que aplicar el Procedimiento 1 con $\alpha = 1.50$ y que aplicar el Procedimiento 2 con $\alpha = 2.00$ garantiza la formación del mecanismo plástico de colapso ideal para la estructura analizada. Sin embargo, para poder generalizar los resultados obtenidos es necesario realizar análisis sobre estructuras de características diversas al caso de estudio.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) y el financiamiento del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV) a través del proyecto PI 08-8161-2011 para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1]. Norma Venezolana Fondonorma 1753. *Proyecto y construcción de obras de concreto estructural*. Fondonorma, 2006.
- [2]. Norma Venezolana Covenin 2002. *Criterios y acciones mínimas para el proyecto de edificaciones*. Covenin, 1988.
- [3]. Norma Venezolana Covenin 1756. *Edificaciones sismorresistentes*. Covenin, 2001.
- [4]. Porrero, J., Salas, R., Ramos, C., Grases, J. y Velazco, G. *Manual del Concreto*. SIDETUR, 1996.
- [5]. Castilla, E. y Marinilli, A. Propiedades del acero de refuerzo para el diseño de estructuras sismorresistentes. *Boletín Técnico del IMME*, 39(1), pp. 14-25, 2001.
- [6]. Melchers, R. E. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. John Wiley & Sons, Chichester. 1999.
- [7]. FEMA 356. *Pre-standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [8]. FEMA 440. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Federal Emergency Management Agency, 2005.
- [9]. Rosenblueth, E., Second-order probabilities approximations, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 72(10), pp. 3.812-3.814, 1975.

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN TREN DE ATERRIZAJE TRICICLO PARA AVIÓN NO TRIPULADO UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS

Oscar E. González P.

Gabriela Martínez B.

o.gonzalezparra@gmail.com.

gabrielamb@usb.ve

Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar. Apdo. 89000, Caracas 1080A,
Caracas, Venezuela.

Carlos Graciano²

cagracionog@unal.edu.co

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín,
Facultad de Minas, Medellín, Colombia

Resumen. *En este trabajo se presenta el análisis y diseño de un tren de aterrizaje de avión no tripulado utilizando el método de los elementos finitos. En particular, se estudia un tren de aterrizaje de configuración triciclo, del tipo resorte sólido, y sección transversal rectangular. El tren de aterrizaje de un avión es uno de los sistemas más complejos y tediosos en las distintas etapas de diseño de aeronaves. En la literatura correspondiente, las investigaciones inherentes a este diseño no son abundantes, sin embargo, existen normas internacionales que regulan los diseños aeronáuticos en la aviación comercial y militar. Utilizando el modelo numérico, se estudió tanto la influencia de la geometría como del uso de materiales compuestos en la fabricación del tren de aterrizaje. Por razones de simplicidad en el modelo no se consideraron los efectos del neumático. De la evaluación de los parámetros geométricos, se desprende que la variación en el espesor de la sección transversal t , y en el ángulo Θ formado entre la pierna del tren de aterrizaje y la horizontal, son inversamente proporcionales a la deformación vertical durante el impacto. Por otra parte, la variación en longitud de la pierna del tren de aterrizaje l se comporta de manera opuesta a los parámetros anteriores. En lo referente a la evaluación de los materiales, del estudio se concluye la necesidad de utilizar materiales compuestos en el diseño.*

Palabras clave: Tren de aterrizaje, UAV, carrera, factor de carga, método del elemento finito.

1. INTRODUCCIÓN

Un vehículo aéreo no tripulado, UAV por sus siglas en inglés (Unmanned Aerial Vehicle), se define como un vehículo sin tripulación reutilizable, capaz de mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión o de reacción [1]. Actualmente son uno de los principales proyectos enmarcados en las investigaciones y desarrollos tecnológicos en Venezuela, sin embargo, uno de los principales obstáculos que dichas investigaciones presentan es el diseño del tren de aterrizaje, no solo por su natural característica de complejidad, sino por la limitada literatura. Es entonces ventajoso proponer un diseño y análisis de un tren de aterrizaje para un UAV que enfatice el cumplimiento de las normas de la Administración de Aviación Federal (Federal Aviation Regulations), en su parte 23, considerando variaciones geométricas y distintos materiales, empleando los métodos de cálculos comunes y avanzados como el método del elemento finito, conjuntamente con herramientas computacionales.

2. METODOLOGÍA

Los materiales seleccionados para este estudio se componen de dos isotrópicos y dos compuestos ortotrópico y se resumen en la tabla 1

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales empleados en el diseño.

Material Isotrópico	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia última			Fluencia			E (Gpa)	G (Gpa)			
		Tensión (Mpa)			Tensión (Mpa)							
ASTM-A709 ^[2]	7860	760			690			200	77,2			
7075-T6 ^[2]	2800	570			500			72	28			
Material Ortotrópico	E ₁ (Gpa)	E ₂ (Gpa)	E ₃ (Gpa)	G ₁₂ (Gpa)	G ₁₃ (Gpa)	G ₂₃ (Gpa)	v ₂₁	v ₃₁	v ₃₂	X (Mpa)	Y (Mpa)	ρ (Kg/m ³)
T-300 resina Epóxica ^[3]	138	8,96	8,96	7,10	7,17	3,45	0,3	0,3	0,3	1447	52	1600
Kevlar49 resina Epóxica ^[4]	80	5,10	5,10	1,9	1,9	1,9	0,31	0,02	0,02	1800	7,9	1400

Los datos característicos de un UAV fueron obtenidos como un promedio de las aeronaves más comunes y semejantes que componen este tipo de avión [5] y se muestran en la tabla 2

Tabla 2. Datos promedios de un UAV.

LONGITUD (m)	ENVERGADURA (m)	PESO (kg)	CUERDA (m)
4	5,2	182	0,615

Con los datos anteriores y siguiendo el procedimiento mostrado por Currey [6], se considera la pierna del tren de aterrizaje como una viga en cantiléver empotrada al fuselaje (figura 1), sobre la cual se calcula la deflexión vertical máxima (carrera S del tren), el

esfuerzo máximo en el encastre (Fb), así como el factor de carga N , el cual para la condición de impacto establecida en la norma, no debe ser inferior a 2 ni superior a 3.

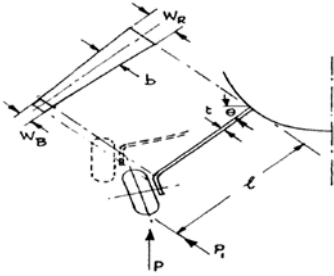


Figura 1. Pierna del tren de aterrizaje
($W_R=W_B=b$).

Las ecuaciones 1 y 2 responden al cálculo de la carrera y del esfuerzo máximo respectivamente.

$$S = \frac{4P_1l^3}{Ebt^3} \quad (1) \quad Fb = \frac{6P_1l}{bt^2} \quad (2)$$

Donde $P_1 = W \cos(\theta)$, W el peso del avión, l longitud de la pierna, E módulo de elasticidad del material, b ancho de pierna y t espesor de pierna.

Modelo de elementos finitos. Para aplicar el método del elemento finito se utilizó el software ANSYS WORKBENCH, empleando elementos triangulares SOLID164 de 8 nodos y 9 grados de libertad [7]. Todas las simulaciones con materiales compuestos son con orientación a cero grados $[0^\circ]$ de las capas del material (unidireccional), en la dirección de la longitud l .

Validación del modelo de elementos finitos. Los tres valores obtenidos anteriormente para ambos materiales isotrópicos, es decir, carrera del tren S , esfuerzo máximo en el encastre Fb y factor de carga N , son calculados nuevamente empleado el método del elemento finito y comparados entre sí para validar el modelo utilizado.

Estudio Paramétrico. Primeramente se procede a dimensionalizar y parametrizar las piezas con los materiales compuestos en un proceso iterativo igual al hecho con materiales isotrópicos, así mismo bajo una condición paramétrica se varía para cada uno de los casos el ángulo θ , y la longitud de la pierna l , pudiendo conocer la influencia que cada uno de estos parámetros tiene sobre la carrera S y consecuentemente sobre el factor de carga N . Con el fin de mejorar el diseño, se varió el radio de curvatura r para la pierna del tren de aterrizaje, manteniendo los valores θ , t y l constantes, por lo tanto, la pierna del tren se hace más curva a medida que el radio de curvatura es menor (figura 2). Por último se ejecutó una reducción de peso al disminuir progresivamente desde el encastre hasta la punta de la pierna del tren el ancho b , mientras se monitoreó las variaciones en la carrera del tren y el esfuerzo máximo.

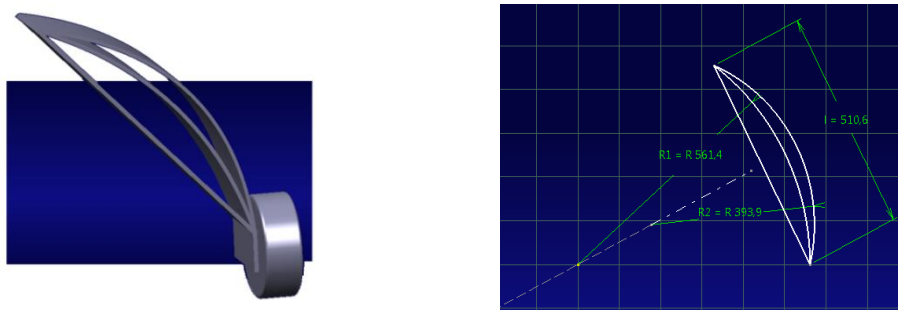


Figura 2. Variación del radio de curvatura r , manteniendo θ , t y l constantes.

3. RESULTADOS

En la tabla 3 se comparan los resultados numéricos con los analíticos, y se observa un relativo bajo error porcentual, lo que otorga validez al modelo numérico. Cabe destacar que los esfuerzos producidos con ambos materiales superan los de fluencia.

Tabla 3. Resultados para acero ASTM-A709 y Aluminio 7075T-6

Tipo de Análisis	Acero ASTM-A709			Aluminio 7075T-6		
	S(m)	Fb(Mpa)	N	S(m)	Fb(Mpa)	N
Analítico	0,1765	1582	2,1228	0,1263	895	2,8345
Numérico	0,1750	1667	2,1382	0,1310	843	2,7456
% Error	0,85	5,37	-----	3,72	5,81	-----

La iteración de dimensiones para ambos materiales compuestos se presenta en la tabla 4, es resaltante el menor espesor necesario con el compuesto de carbono para obtener un factor de carga N que se ubique entre 2 y 3, lo que implica menos material. Para cada caso el esfuerzo producido se encuentra por debajo del de fluencia.

Tabla 4. Iteración de dimensiones para materiales compuestos.

Fibra de carbono T-300 y resina				Fibra de Aramida y resina			
t(m)	S(m)	N	Fb(Mpa)	t(m)	S(m)	N	Fb(Mpa)
0,0070	0,2710	1,4977	1624	0,0090	0,2255	1,7333	971
0,0080	0,1820	2,0687	1245	0,0100	0,1650	2,2478	788
0,0090	0,1280	2,8022	984	0,0110	0,1243	2,8758	652

En las figuras 3 y 4 puede observarse que para el incremento del ángulo θ la carrera S disminuye y el factor de carga N aumenta, mientras que para el incremento de l ambos parámetros se comportan de manera opuesta. Es notorio que la fibra de aramida permite un mayor rango de variación de los parámetros θ y l manteniendo el factor de carga en un valor entre 2 y 3.

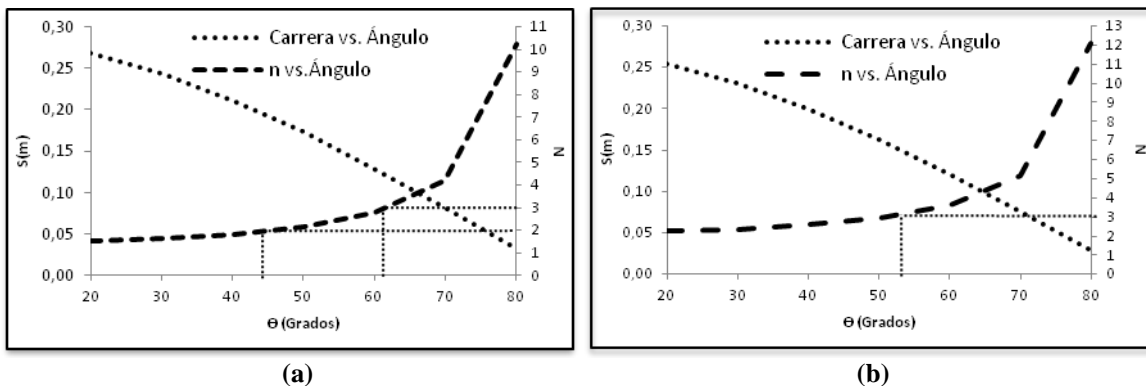


Figura 3. Variación de θ , (a) compuesto Fibra de Carbono T-300 y resina, (b) compuesto Fibra de Aramida y resina Epóxica.

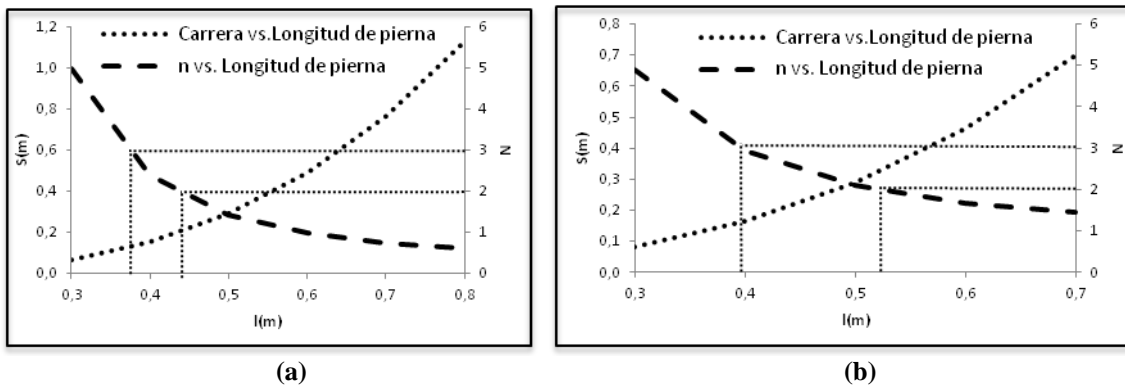


Figura 4. Variación de l , (a) compuesto Fibra de Carbono T-300 y resina, (b) compuesto Fibra de Aramida y resina Epóxica.

La figura 5 muestra los resultados al variar el radio de curvatura de la pierna, tanto en acero como en el compuesto de fibra de carbono y resina epóxica, se observa en ambos casos que incrementar la curvatura genera un aumento tanto en el esfuerzo como en la deformación vertical, haciendo menos viable el diseño con materiales isotrópicos.

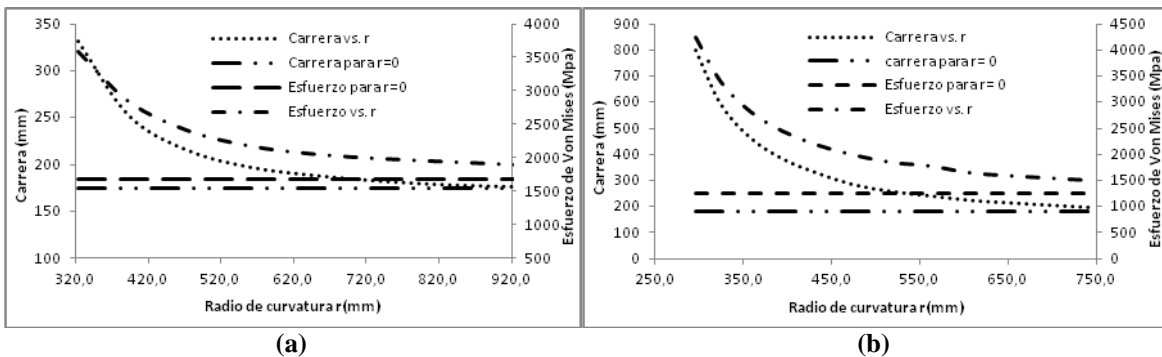
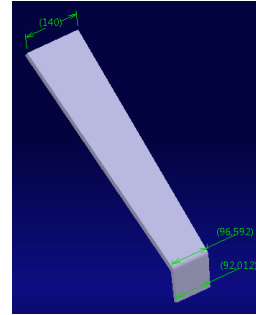


Figura 5. Carrera S (mm) y Esfuerzo de Von Mises(Mpa) en función del radio de curvatura, (a) Acero ASTM-A709, (b) Fibra de Carbono T-300 y resina Epóxica.

La reducción de peso para ambos materiales compuestos se resume en la tabla 5, y en la figura 6 se muestra el diseño definitivo para la pierna hecha con el compuesto de fibra de aramida y resina epóxica. El peso final obtenido en ambos casos es similar, pero la pieza de compuesto de aramida posee mayor cantidad de material debido al espesor necesario para satisfacer la norma.

Tabla 5. Modelos hechos con materiales compuestos y reducción de peso.

Material	Wini(Kg)	Wfin(Kg)	N
Carbono	1,0062	0,9264	2,0043
Aramida	1,1015	0,9135	2,0880

**Figura 6. Pierna de Fibra de Aramida con Resina Epóxica y reducción de peso de $a/b=0,65$.**

4. CONCLUSIONES

El diseño con acero y aluminio bajo las exigencias de las normas FAR excede el esfuerzo máximo a la fluencia de ambos materiales isotrópicos, sin embargo, desde un punto de vista mecánico, es posible diseñar el tren de aterrizaje con estos materiales de forma tal que soporte las condiciones de carga, si y solo si, no se considera el factor de carga N . Por otra parte, podría emplearse los materiales isotrópicos y cumplir con la norma si se anexa al diseño la utilización de materiales hiperelásticos para absorber energía del impacto por deformación. La variación en t y el ángulo θ , son inversamente proporcional a la deformación vertical al momento del impacto y por lo tanto directamente proporcional al factor de carga N . la variación en l se comporta de manera opuesta a los parámetros anteriores. Haciendo la pierna del tren una viga curva, con radio de curvatura r y manteniendo t , θ y l constantes, el esfuerzo y deformación producidos son inversamente proporcionales al radio, es decir, mientras más curva es la pieza, mayores son el esfuerzo y la deformación vertical. La fibra de aramida proporciona mejor desempeño para el diseño que la fibra de carbono, no obstante, la primera de estas es más costosa y muestra solo una leve diferencia en el peso final de la pieza, por lo que el compuesto de carbono y resina epóxica es el más indicado.

5. REFERENCIAS

- [1] García, J. (2003). Terminología Aeronáutica (1ª ed.). Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos S.A.
- [2] Beer, F., Johnston, E. y Dewolf, J. (2001). Mecánica de Materiales (3a ed.). Mexico, D.F: McGraw-Hill Companies, Inc.
- [3] Department of Defense. (1999). Composite Materials Handbook, Volume 2. Estados Unidos: Department of Defense.
- [4] Lee, S. (1993). Handbook of Composite Reinforcements. New York: VCH.
- [5] Directory of U.S. Military, Rockets and Missiles. (2013). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.designation-systems.net/dusrm/>.
- [6] Currey, N. (1988). Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices (1ª ed.). Washington, D.C., Estados Unidos: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- [7] ANSYS, Academic Research, Release 14.0, Help System, Ansys, Inc.

FORCE FABRIC AND MACROSCOPIC FRICTION IN THREE DIMENSIONAL GRANULAR MATERIALS

Urdaneta Vanessa

vurdaneta@usb.ve

Universidad Simón Bolívar (USB), Departamento de Ciencias de la Tierra

Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Departamento de Física

Petit Juan

jcpetit71@gmail.com

García Xavier

xavierbox@gmail.com

Medina Ernesto

ernestomed@gmail.com

Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Departamento de Física

Abstract. *In this work we analyzed the macroscopic physical response of three-dimensional granular media under load-unload cycling and acoustic propagation when the intergrain static friction coefficient (μ_m) is varied. We found that the microscopic scale influences the elastic macroscopic behaviors since the inter-grain friction controls permanent deformations of the final granular samples. The macroscopic internal friction varies rapidly for local friction values below a characteristic value of 0.3 for the microscopic internal friction, while it varies relatively slower beyond this value. The estimated acoustic propagation speeds seem not to be affected by the final force network stage obtained in the last load-unload cycle. This result is in accordance with the hypothesis that acoustic information probably propagates through the first force fabric formed at the beginning of the granular sample generation which was the same for all samples, so the mean acoustic propagation speed is 350 m/s no matter the microscopic friction coefficient. These results shed light on the importance of the microscopic scale physics and its significant influence on the resulting mechanical behavior and also the relevance of force networks, not only their final stage but also its complete evolution through time.*

Keywords: Granular Packing, Intergrain Friction, Macroscopic Friction, Force Fabric, Acoustic granular speed.

1. INTRODUCTION

The physical behavior of granular media had been found to be complex and difficult to predict, this kind of material is formed by many discrete bodies (particles) that interact with each other, giving rise to a variety of macroscopic behaviors [1]. For this reason it is of interest to study specific macroscopic responses, to see how these responses are influenced by grain characteristics and interaction force networks. The understanding of such phenomena is not only important in physics but also of great interest in the geosciences, allowing the physical characterization of sedimentation, compaction and elastic processes in sedimentary rocks. In this work we present the macroscopic behavior of granular samples when only a grain parameter is changed: the intergrain static friction coefficient. We performed a static probe numerical experiment of load-unload cycles and also the dynamic probe experiment of acoustic wave propagation. The physical granular response showed a relevant effect of the inter-grain level friction on the macroscopic internal friction coefficient. Surprisingly, the dynamic experiment is dominated by the first established interaction-force-fabric related to the sample generation, without an evident variation with respect to different inter-grain friction coefficients.

2. METHODOLOGY

The numerical approach was conducted using a discrete element method (DEM) based on the interaction forces between grains in contact, considering the Hertz-Mindlin contact model [1]. The software used was PFC3D by ITASCA Consulting Group. The samples consisted in 1500 quartz spherical grains, with Young modulus of 75 GPa, density 2.65 gr/cc and Poisson Ratio of 0.22, forming a monodisperse granular packing with grain radii fixed at 1.0×10^{-3} m. Then the grains were placed in a cylindrical container with 0.06 m in height and 0.0125 m in radius. The sample generation method was the grain radii expansion scheme. First, the grain positions are randomly placed inside the container, and then grain size is progressively increased until a specific package porosity is achieved, for each sample this value was set to 34%. Finally a process of relaxation is imposed to the packing to reach a stationary state. The three stages described can be seen in Fig. 1.

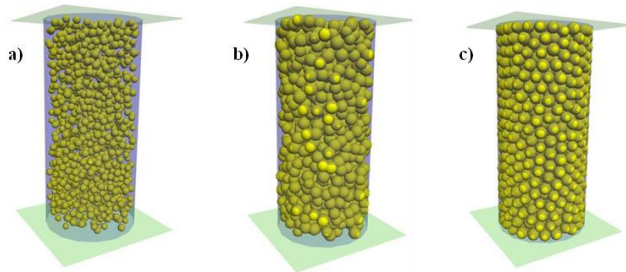


Figure 1- Left to right: a) Grains placed randomly in the cylindrical container, b) grain size is increased to achieve the specific package porosity, c) final sample after relaxation.

Since the main objective is to study the effect of microscopic or intergrain static friction coefficient on the macroscopic granular ensemble, once the initial granular sample is generated, part c) in Fig. 1, the inter-grain friction is turned on. Table 2 indicates the microscopic friction coefficients (μ_m) used in this work.

Table 2. Intergrain Static Friction Coefficients used in this work

Microscopic friction coefficients (μ_m)													
1	0.9	0.8	0.7	0.65	0.5	0.4	0.35	0.3	0.2	0.1	0.09	0.07	0.05

A granular sample was generated for each microscopic friction listed in Table 2, with the methodology specified above, thus the only difference between samples is this microscopic property. After intergrain friction is turned on, a relaxation process is imposed to the granular package. Finally, gravity is activated, whereby a third process of relaxation is needed so that internal forces can abate. Once the final ensemble is obtained a process of compaction-decompaction cycles is simulated [2], until the stress-strain curve for two consecutive cycles show negligible differences. The loading process consists in moving the top of the granular container towards the center of the sample, with 0.058 strain as the maximum deformation achieved for the packing, while the unload process is exactly the opposite. Figure 2 shows an example of uniaxial stress-strain curves for the compaction-decompaction cycles experienced by the granular pack with $\mu_m=0.3$.

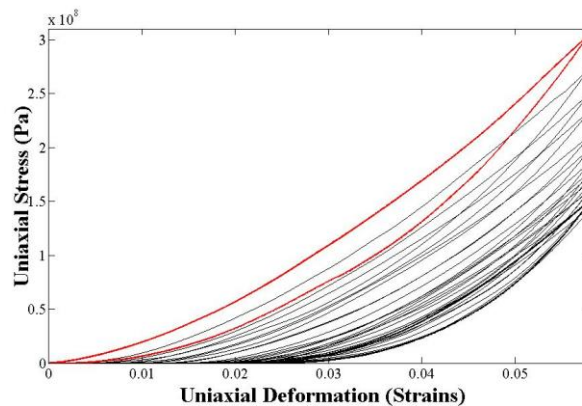


Figure 2-Uniaxial stress-strain curves for the granular pack with $\mu_m=0.3$. In red: first cycle, in bold black: final cycle.

The final granular sample, obtained once the load and unload cycles are completed, is used to estimate, through Mohr Circle Construction proposed in reference [3], the macroscopic static friction coefficient (μ_M) and is also used to perform an acoustic experiment. The acoustic experiment is described as follows: At the top of the granular cylinder a burst of mechanical energy is emitted, the mechanical source produces a positive displacement in half a period ($T/2$) and then a negative one by the same time span in the axial direction. The characteristic frequency of the source was 50 KHz. As the wave propagates to the other end of the pack, the acoustic speed is determined through position detectors located along the sample.

3. RESULTS AND ANALYSIS

Figure 3 shows the permanent deformation of each sample, characterized by its μ_m , versus the load-unload cycle number. The applied mechanical process implies a permanent shortening of the samples, given that part of the mechanical energy injected to the granular package is used to produce particle re-arrangements, this can be understood as an hysteretic process [4]. It is clear that if microscopic friction coefficient is of a high value, the grain

displacement is hampered [5] and then the final permanent deformation (shortening) of the sample is smaller as compared to a low value of μ_m . This can be seen in Fig. 3 in which the sample with $\mu_m=1.0$ shows a permanent deformation that is only $\approx 30\%$ of the permanent deformation reached in the case of $\mu_m = 0.2$.

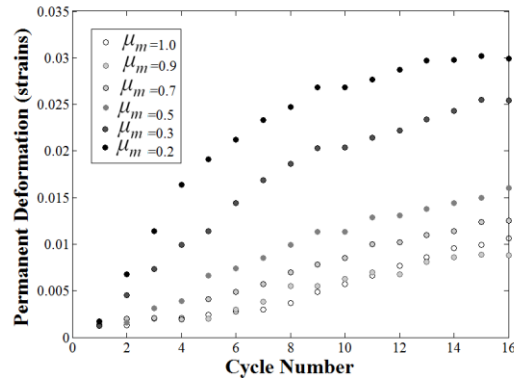


Figure 3- Permanent deformation (strains) versus Cycle Number, the legend indicates de microscopic friction that characterized the granular sample.

The physical observation made above implies that, although the samples were all identical except for the microscopic friction coefficient, their elastic behavior is different at the macroscopic scale in response to the static mechanical assay applied. In this case, the final granular sample characterized by a lower microscopic friction shows a more compact final form compared to the high intergrain friction samples. The macroscopic static friction coefficient (μ_M) was estimated for each granular ensemble obtained in the final load-unload cycle. Figure 4 exhibits that result.

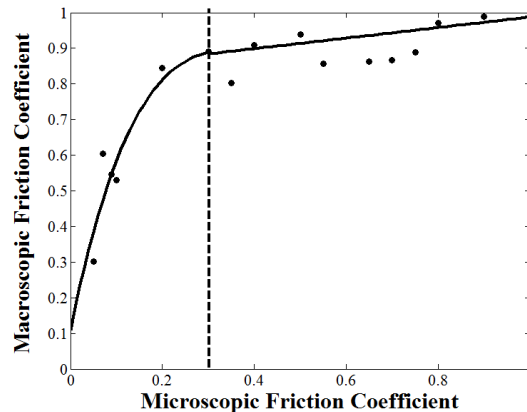


Figure 4- Macroscopic Friction Coefficient versus the Microscopic Friction Coefficient. The solid line is a curve fit and the dashed line indicates $\mu_m=0.3$ above which there is a qualitative change in the physical behavior.

Figure 4 shows, by extrapolation, that even a granular sample with very low inter-grain friction has a non-zero macroscopic friction response ($\mu_M=0.11$). This can be understood as the effect of the force fabric created by all the grains in contact, which functions as a skeleton providing some rigidity to the macroscopic sample [5, 6] inside a container. From the above figure, it is clear that given a μ_m the corresponding macroscopic friction coefficient grows fast until $\mu_m \sim 0.3$ is reached, which is actually the friction coefficient that characterizes the container walls and is also the actual static friction value for quartz grains [4]. We are

currently carrying out more tests in order to determine the physical reason behind this behavior, it is likely that this could be the response to a mechanical balance imposed by the roughness characteristic of the container.

As explained, from $\mu_m=0.0$ to $\mu_m=0.3$, the data shows a fast and incremental growth that can be fitted by a fourth degree polynomial equation:

$$f(x) = P_1x^4 + P_2x^3 + P_3x^2 + P_4x + P_5 \quad (1)$$

In Eq. (1): $P_1=-8.28$, $P_2=20.8$, $P_3=-17.96$, $P_4=6.33$ and $P_5=0.11$.

From $\mu_m=0.3$ to $\mu_m=1.0$, the data then grows more slowly until $\mu_M=1.0$ is reached, which is the maximum friction value physically possible. This behavior can be fitted by the following one-degree polynomial equation:

$$y(x) = C_1x + C_2 \quad (2)$$

With $C_1=0.14$, and $C_2=0.8397$.

A final result is related to the dynamic or acoustic experiment. In Fig. 5, the acoustic propagation speed is plotted versus the microscopic friction coefficient that characterizes the granular package.

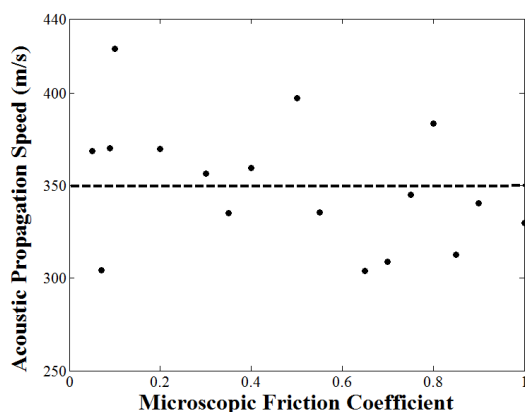


Figure 5- Acoustic propagation speed (m/s) versus the Microscopic Friction Coefficient. The dashed line indicates the mean speed for all the samples (350 m/s).

Surprisingly, for this dynamic/acoustic probe, there is not an evident difference in the macroscopic acoustic behavior between samples. This is in agreement with previous work [6, 7, 8] where it was shown that acoustic information probably propagates through the first force network formed at the beginning of sample generation, and as established in the methodology section, all samples have the same initial generation procedure, so for small compressions, as the one experienced in the acoustic propagation, the results should not vary greatly. The mean speed for all samples is 350 m/s. This low value is typical in these high porosity granular packs [9]. The variations obtained with respect to 350 m/s are expected because of the visual method used in order to estimate propagation speeds with a mean random error of ± 30 m/s.

4. CONCLUSIONS

Summarizing, we have analyzed the behavior of three-dimensional granular packs, under load-unload cycles and acoustic propagation, when the inter-grain friction coefficient is

varied. We showed that the microscopic scale affects the mechanical elastic behavior in the macroscopic scale, since the intergrain friction controls the permanent deformation of the final granular sample, so the resulting sample is sensitive to the change of this microscopic property. The estimated macroscopic internal friction coefficient can vary according to two regimes: from $\mu_m=0$ to $\mu_m=0.3$, the estimated value of μ_M increases rapidly with a four degree polynomial behavior, in which, the cutline at $\mu_m=0.3$ seems to be related to the roughness of the container walls, while from $\mu_m=0.3$ to $\mu_m=1.0$, the macroscopic friction slowly increases in comparison, with a first degree polynomial fit until the macro friction reaches its maximum value. Although the acoustic experiment was performed for each granular ensemble obtained in the final load-unload cycle, it seems that this final force network stage does not significantly affect the propagation speed. This result is in accordance with the idea that acoustic information probably propagates through the first force network formed at the beginning of sample generation which was the same for all samples, so mean acoustic propagation speed was found to be 350 m/s no matter the microscopic friction coefficient. The study of this static and dynamic behavior of heterogeneous media is not an easy task numerically. Different experiments are controlled for different physical properties in the macro and microscopic scale. With this work, it is clear that the resulting macroscopic property μ_M is controlled by the microscopic friction coefficient while resulting macroscopic acoustic propagation speed is not, and seems to be the consequence of the sample generation process.

REFERENCES

- [1] Johnson, K.L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1985.
- [2] Garcia, X., and Medina, E., Geophysics 71, 13, 2006.
- [3] Mavko, G., Mukerji, T. y Dvorkin, J., The Rock Physics Handbook, Second Edition, Cambridge University Press, 2009.
- [4] García, X, y Medina E., Cyclic loading-unloading of a realistic sand model: Hysteresis Effects, Geophysics, 71, 13, 2006.
- [5] Medina, E., García, X., y Urdaneta, V., Force fabric and macroscopic friction in two dimensional granular materials, Phys. Rev. E 81, 1, 2010.
- [6] Makse, H., Johnson, D., and Schwartz, L., Packing of Compressible Granular Materials, Physical Rev. Letters, vol. 84, vi, xii, 14, 15, 75, 2000.
- [7] Krapf, N., Force propagation in isostatic granular packs, Phys. Rev. E 86, 021302, 2012.
- [8] Santos, C., Urdaneta, V., Medina, E., and García, X., Dispersive behavior and acoustic scaling in granular rocks, AIP Proceedings 1542, pp. 559-562, 2013.
- [9] Bachrach, R., Dvorkin, J., and Nur, A., Seismic velocities and Poisson's ratio of shallow unconsolidated sands, Geophysics, Vol.65, N. 2, v,7, 8, 2000.

FINITE DIFFERENCE MODELING OF RUPTURE PROPAGATION UNDER VELOCITY-DEPENDENT AND THERMAL WEAKENING PROCESSES

Adelis Nieves

Otilio Rojas

adelis.nieves@ciens.ucv.ve

otilio.rojas@ciens.ucv.ve

Centro de Investigación de Operaciones y Modelos Matemáticos , Universidad Central de Venezuela, Caracas–Venezuela.

Steven Day

sday@mail.sdsu.edu

Department of Geological Sciences, San Diego State University, San Diego CA, USA.

Abstract. *Two significant weakening mechanisms of fault strength during earthquakes are the flash heating (fast rupturing) of asperity contacts and the decay of the compressive normal stress due to the thermally-induced increase of pore pressure. In this work, we conduct finite difference (FD) simulations of mode II dynamic ruptures along a straight fault where the friction resistance falls into the framework of rate and state (RS), and exhibits a strong weakening at high velocities in addition to the thermal pressurization (TP) of pore fluids. We use as a starting point the second-order Mimetic Operators at Split Nodes (MOSN) method for rupture simulations on RS interfaces and implement a semi-analytical integration of the coupled diffusion equations for temperature and pore pressure evolution to consider TP effects. A convergence analysis of the new TP-MOSN method is carried out using reference solutions from a spectral boundary integral equation method (BIEM). Numerical results follow a linear convergence under grid refinement in all computing fault variables, and TP-MOSN models slip, pressure, and temperature, with higher precision than traction and slip velocity.*

Keywords: Finite differences, Rupture propagation, Friction coefficient, Diffusion.

1. INTRODUCTION

A critical point on the simulation of earthquake rupture propagation is the constitutive model assumed for fault friction. Field observations on mature faults expose actual shear zone as very thin layers (~5 mm), where the lack of melting or any additional heat signature allows suggesting a significant drop of frictional resistance at high slip velocity (~ 0.1 m/s) [1]. Rice in [2] has explained this abrupt weakening to a local fusion of microscopic asperity contacts during rapid sliding known as flash heating (FH). Rice couples a steady state model of the FH mechanism to

the friction constitutive laws proposed by Dieterich and collaborators in which the friction coefficient is dependent on the sliding velocity and the surface state (rate-and-state RS laws in [3]). This RS-FH model might describe the transient evolution of fault friction during a typical earthquake. Rice in [2] also couples TP to the RS-FH constitutive framework as a way to model the decrease of normal compression due to the thermally induced increase of pore pressure. Numerical modeling of rupture propagation using FD in 2-D staggered grids (SG) was introduced by Madariaga in [4]. Dalguer and Day in [5] propose a 3-D FD-SG representation of a fault surface as a grid layer of double split nodes that allows implementing the complex frictional sliding boundary conditions. Under slip-dependent friction laws, these authors prove the high precision of the split-node technique compared to other available strategies. Rojas et al. in [6] develop split-node implementations of RS-FH frictional sliding using the mimetic operators on FD-SG, and called this method MOSN. In this work, we incorporate TP diffusion equations into the MOSN constitutive framework to make this method highly suitable for rupture simulations under these significant fault weakening mechanisms.

2. RUPTURE MODELING USING THE MOSN METHOD

MOSN models in-plane spontaneous ruptures under RS-FH dependent friction laws by assuming a fault plane embedded into an isotropic and linearly elastic 2-D medium ($x-z$ plane) parameterized by density ρ and Lamé constants λ and μ . Continuous particle velocities (v_x, v_z) and stress tensor components $(\tau_{xx}, \tau_{zz}, \tau_{xz})$ obey the elastodynamic wave equation and Hooke's law, respectively. For simplicity, the fault plane corresponds to $z=0$ and sliding across is measured as the discontinuity of the particle horizontal displacement referred as slip δ as we can see in Fig. 1.

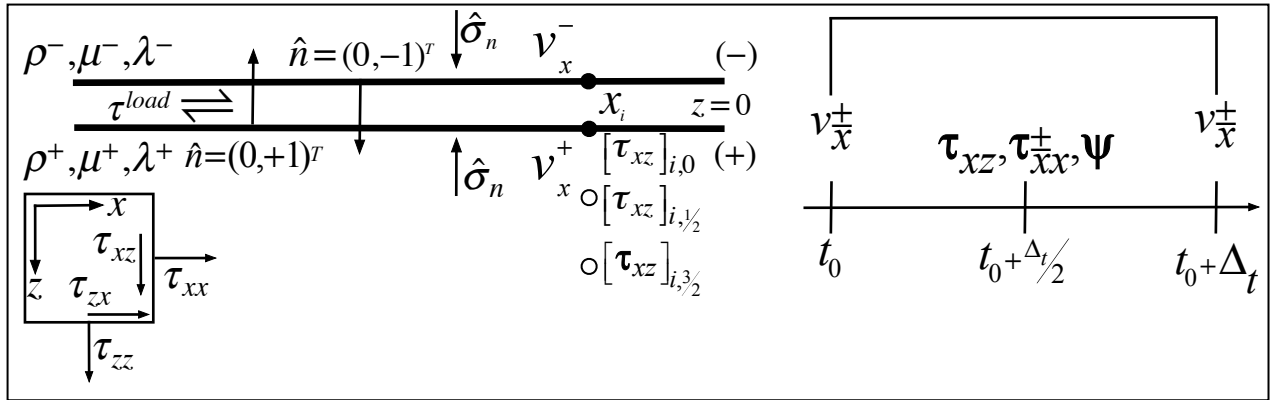


Figure 1 – Spatial and time staggered distribution of fault variables.

The slip rate $\hat{\delta}$ is the difference between the limiting values for v_x at $z=0$, $v_x^\pm(x, z=0, t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} v_x^\pm(x, \varepsilon, t)$, that is, $\hat{\delta} = v_x^+ - v_x^-$. The traction vector (τ_{xz}, τ_{zz}) is continuous at $z=0$, while τ_{xx} can be discontinuous having values $[\tau_{xx}^\pm]$ at each split node. The faulting boundary condition establishes the colinearity between the slip velocity and total shear traction once sliding commences,

$$\left(v_x^+ - v_x^- \right) / \left| v_x^+ - v_x^- \right| = (\tau_{xz} + \tau_0) / \tau_c \quad (2.1)$$

In Eq. (2.1) τ_c represents the fault resistance with dependency on V and on the surface state variable Ψ , while τ_0 is the initial shear load. In RS friction models, the fault is continuously sliding ($V \neq 0$), thus $|\tau_{xz} + \tau_0| = \tau_c(V, \Psi)$.

MOSN–discretization of these elastic and fault wavefields proceed on Madariaga’s SG augmented (see [4]) by the fault grid layer of split double nodes as shown by Fig. 1. Here, we only review the numerical update of split velocities v_x^\pm that reflects the direct friction contribution on sliding, and we refer the reader to [6] for additional MOSN implementation.

From elastodynamics, the tangential component of the particle acceleration of fault nodes x_i^\pm results $\rho^\pm \left[\dot{v}_x^\pm(t) \right]_{i,0} = \left[\partial / \partial_x \tau_{xx}^\pm \right]_{i,0} + \left[\partial / \partial_z \tau_{xz}(t) \right]_{i,0}$. The spatial discretization of this equation along z direction uses the one–sided staggered mimetic stencil $(g_{10}, g_{11}, g_{12}) = (1/h)(-8/3, 1/3, -3)$, and then $\left[\tau_{xz} \right]_{i,0}$ is replaced by Eq. (2.1) to write the semi-discrete acceleration term (time is still continuous):

$$\left[\dot{v}_x^\pm(t) \right]_{i,0} = \pm \frac{g_{10}}{\rho^\pm} \text{sign}(v_x^+ - v_x^-) \tau_c(V(t), \Psi(t)) + \frac{1}{\rho^\pm} \left\{ \mp g_{10} \tau_0(t) \pm \sum_{j=0}^1 g_{1j+1} \left[\tau_{xz}^\pm \right]_{i,j\pm 1/2} + \left[\frac{\partial}{\partial_x} \tau_{xx}^\pm \right]_{i,0} \right\}. \quad (2.2)$$

Fault strength τ_c is the product of the friction coefficient $f(V, \Psi)$ and the effective normal stress, i.e. $\tau_c = f(V, \Psi)(\sigma_n - p)$, where the latter equals the normal load σ_n diminishes by the pore pressure p . To couple RS-FH friction to Eq. (2.2), MOSN adopts the Dieterich–Rice definitions for f , the surface state variable Ψ , and for the steady state limit of friction f_{SS} under sustained sliding (at constant V)

$$f(V, \Psi) = a \ln(V/V^*) + \Psi, \text{ where } \dot{\Psi} = -\frac{V}{L} [f - f_{SS}(V)] \quad (2.3)$$

and

$$f_{SS}(V) = \begin{cases} f^* - (b-a) \ln(V/V^*); & V \leq V_w \\ f_w + \left[f^* - (b-a) \ln(V/V^*) \right] V_w / V; & V > V_w \end{cases}.$$

For all constitutive parameters in these equations, authors have proposed values assumed valid in the seismic regime. Time integration of Eqn. (2.2) is performed by the implicit Euler

method given the stiffness of the coupled system of Eqns. (2.2)-(2.3) during rupture initiation ($V < 10^{-6} m/s$). Figure 1 also depicts time staggering of fault variables in MOSN implementation. Once, split velocities are updated, the evolution state equation is analytically integrated by assuming constant new V value.

3. IMPLEMENTATION OF THERMAL PRESSURIZATION: THE TP-MOSN METHOD

Here, we mainly follow Green's function analysis and simplification considerations given in Rice [2]. Diffusion equation for frictional heat satisfies

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{th} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \text{ in } |z| > 0. \quad (3.1)$$

Initial and boundary conditions are given by $T|_{t=0^+} = T_{amb}$ and $[-\alpha_{th}\rho c \partial T / \partial z]_{0^-}^{0^+} = \tau_{xz}(t)V(t)$, where the product of traction and slip rate is the source of shear heating. Using the whole space Green's function, Rice proposes as the temperature solution for a distributed shear zone with Gaussian spread w the following convolutional form

$$T(y,t) - T_0 = [V(t)\tau(t)/\rho c] * \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{w^2 + 2\alpha_{th}t}} \exp\left[-\left(y^2/2w^2 + 4\alpha_{th}t\right)\right]. \quad (3.2)$$

The pore-fluid diffusion is similar to Eq. (3.1) with a α_{th} replaces by the hydraulic diffusivity α_{hy} and additional source term $\Lambda \partial T / \partial t$ for Λ the undrained thermal coefficient.

Pressure solution given by Rice is:

$$P(y,t) = \frac{\Lambda/\rho c}{(\alpha_{hy} - \alpha_{th})} [V(t)\tau(t)] * \left\{ \alpha_{hy} / \sqrt{2\pi}\sqrt{w^2 + 2\alpha_{hy}t} \cdot \exp\left[-\left(y^2/2w^2 + 4\alpha_{hy}t\right)\right] - \alpha_{th} / \sqrt{2\pi}\sqrt{w^2 + 2\alpha_{th}t} \exp\left[-\left(y^2/2w^2 + 4\alpha_{th}t\right)\right] \right\}. \quad (3.4)$$

Day proposes (in "Some results for shear heating". Unpublished notes, 2009) an efficient integration of convolution terms in above equations using the technique called *memory variables* introduced by this author in viscoelastic wave modeling. Here, we use this integration technique to incorporate TP effects into MOSN, and we omit implementation details in this paper for the sake of brevity.

4. NUMERICAL RESULTS

In this section, we assess the convergence of TP-MOSN solutions to a reference test problem with constitutive parameters given in Figs. 2 (a)-(b) (including $\sigma_n = 196$ MPa). These figures depict TP-MOSN waveforms at $x = 0.02$ m computed using grid spacing $h = 6$ mm and

compare them with highly accurate BIEM solutions. At $t=0$, one can see the ambient initial conditions of each fault variable where $V_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$. The traction curve τ shows the two expected signatures in this experiment, the S-wave arrival followed by the sudden increase and stress drop typical of the rupture process. As the point start sliding ($\delta > 0$), slip rate V increase abruptly and the shearing heat induces the pressurization of pore fluid ($T > 0, p > 0$).

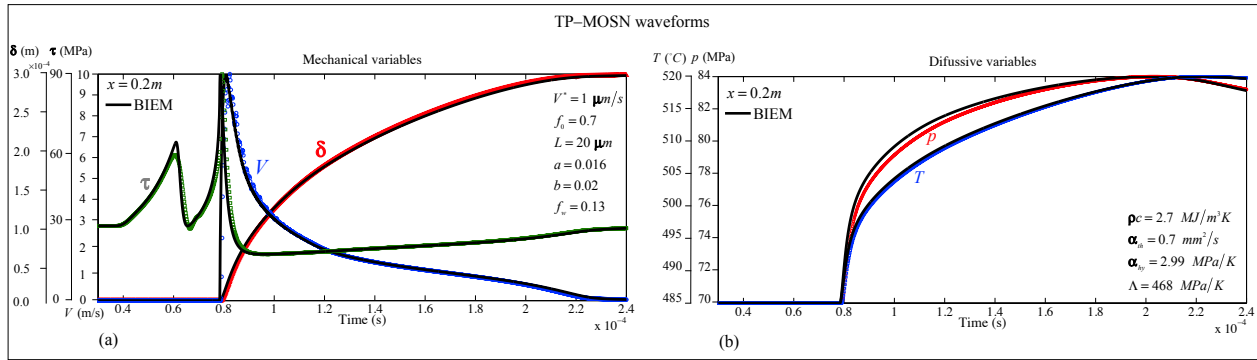


Figure 2 – Diffusive and mechanical variables.

After $t = 2.2 \mu\text{s}$ sliding ceases and the temperature and pressure gradient become negligible and negative, respectively. This behavior exposes that rupture propagates in the form of a slip pulse in response to the low background stress level assumed on this experiment ($\tau_0 = 2.8 \text{ MPa}$). Our results are in correspondence to the Zheng and Rice theory in [7] that proves the existence of a critical background shear stress level under which ruptures propagation only occurs as slip pulses. We next perform six additional simulations for $h = 3, 3.5, 4, 8, 16, 32 \text{ mm}$ and depict L_2 misfits in Fig. 3, including errors for referential solution with $h = 6 \text{ mm}$.

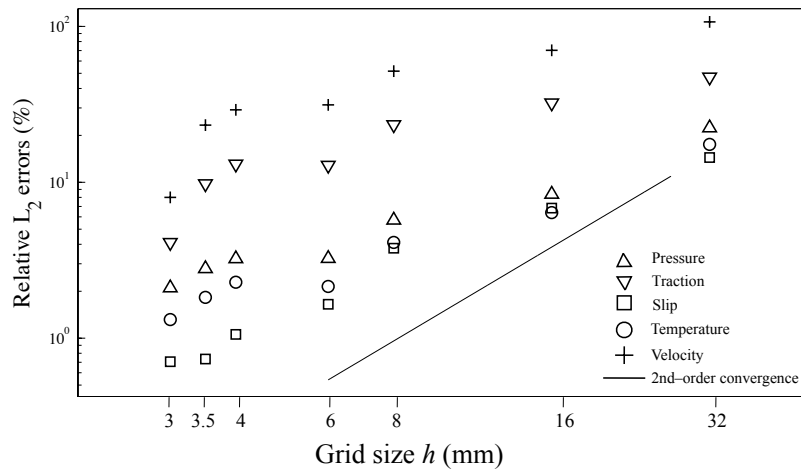


Figure 3 – L_2 misfits of computed numerical solutions.

Linear least-square fitting allows estimating convergence rates for all fault variables on a logarithmic scale. Pressure, slip and temperature show perfect linear convergence and higher

accuracy (convergence rates: 0.92, 1.33 and 1.00, respectively). Conversely, traction and slip velocity show poorer convergence (rates: 0.86 and 0.88, respectively) and a minor accuracy loss. We attribute the linear convergence of TP–MOSN solutions to the first-order implicit Euler integration of Eq. (2.2).

4. Conclusions

In this work, we incorporate a semi analytical integration of TP diffusion equations for temperature and pressure into a second-order MOSN method for rupture simulation on RS-FH interfaces. We use a reference test with constitutive parameters in the seismic regime and an accurate BIEM solution to assess TP-MOSN convergence. Solutions to all fault variables follow a linear convergence and accuracy in slip, temperature and pressure is higher than precision in traction and slip velocity. We attribute this accuracy difference to the inherent higher gradients of latter fault variables.

REFERENCES

- [1]. Chester, F. M., and J. S. Chester, Ultracataclasite structure and friction processes of the Punchbowl fault, *San Andreas system, California, Tectonics*, 295, 199–221, 1998.
- [2]. Rice, J.R., Heating and weakening of faults during earthquake slip, *J. Geophys. Res.*, **111**, B05311, doi:10.1029/2005JB004006, 2006.
- [3]. Dieterich J. H. and Kilgore B. D., Direct observation of frictional contacts: New insights for state-dependent properties. *Pure and Applied Geophysics* 143, 283, 1994.
- [4]. Madariaga, R., Dynamics of an expanding circular fault, *Bull. seism. Soc. Am.*, **66**, 639–666, 1976.
- [5]. Dalguer, L.A. & Day, S.M., Staggered split nodes fault model for spontaneous dynamic rupture simulation, *J. geophys. Res.*, **112**, B02302, doi:10.1029/2006JB004467., 2007.
- [6]. Rojas, O., E. Dunham, S.M. Day, L.A. Dalguer, and J.E. Castillo, Finite difference modeling of rupture propagation with strong velocity–weakening friction. *Geophys. J. Int.*, Vol. **179**, 1831–1858, doi: 10.1111/j.1365- 246X.2009.04387.x, 2009.
- [7]. Zheng, G. & Rice, J.R., Conditions under which velocity–weakening friction allows a self–healing versus a cracklike mode of rupture. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 1466–1483, 1998.

TESTING OPENFOAM CAPABILITIES FOR LAMINAR, TURBULENT AND TWO-PHASE FLOW MODELS

Carlos Montilla

Armando Blanco

carlosdmontilla@gmail.com

ajblanco@usb.ve

Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar

Sartenejas, Baruta, Venezuela

Luis Rojas-Solorzano

rrojas@usb.ve

Departamento de Conversión de Energía Mecánica, Universidad Simón Bolívar

Sartenejas, Baruta, Venezuela

Abstract. *The development in computational fluid dynamics has been impressive in the last years. Algorithms more and more accurate for laminar, turbulent and multi-phase flows, have been developed, validated and implanted in several commercial packages. However, the high cost of these packages makes difficult its use for users with low budget. Recently, the development of OpenFOAM, open-source software, has won more and more acceptance. OpenFOAM promises to solve many different kinds of flows, like the above mentioned. For this propose, this software counts with a groups of solvers that make possible to solve the equations associated to each kind of flow. Nonetheless, the low verification in OpenFOAM's solvers has made difficult its implementation in the industry. In this work, OpenFOAM 2.1.1 was verified in different kinds of flows. For make this possible, several benchmark cases, well documented in geometry, mesh and boundary conditions, were selected to compare numerical and/or experimental results with OpenFOAM's results. The first case was the lid-driven cavity flow in laminar regimen. Here, icoFoam module was selected and tested for different Reynolds numbers. Location of the vortexes was compared with the literature. To validate the steady-turbulent module, simpleFoam, the turbulent flow over a backward facing step was chosen. The standard $k-\epsilon$ and $k-\epsilon$ Launder-Sharma turbulence models were selected. The velocities profiles, turbulent kinetics energy, and vortex size made possible to compare OpenFOAM with others codes. Finally, Dam-break flow was considered to test interFoam module. The evolution of free-surface location was used to compare OpenFOAM with experimental and numerical results. The results obtained, in all three cases, show that these solvers are capable to model laminar flows, turbulent flows, and multi-phase flows. The maximum error in cavity was not greater than 7%. The results for simpleFoam*

solver were similar, the location of the vortexes only differed in 3% for standard $k-\epsilon$; however, for Launder-Sharma $k-\epsilon$ was about 8%. The evolution on the time, for the surface was accord with, both, numerical and experimental results.

Keywords: Validation, Computational Fluid Dynamics, OpenFOAM.

1. INTRODUCTION

OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) is a free and open-source software under GNU General Public License specialized on solving continuum mechanics problems, especially computational fluid dynamics (CFD) problems. Its first stable release was in 2004 with the 1.0 version; since then, 21 stable releases have been developed, making this software one of the most interesting choices to solve CFD problems with no costs.

OpenFOAM is a C++ toolbox which makes possible pre-processing, processing, and post-processing. OpenFOAM consist of different solvers specially designed to solve one particular type of flow, such as: transient laminar flow, steady and transient turbulent flow, transient compressible flow, etc. Despite the almost ten years that OpenFOAM has been available for its use, it is difficult to find in the literature works with validations of all those solvers for a single version and this has hampered its implementation in the industry.

In the present work three solvers were tested in OpenFOAM 2.1.1: *icoFoam* (transient laminar flow) in steady state, *simpleFoam* (steady turbulent flow), and *interFoam* (transient two-phase flow). Classic benchmark problems were studied and the results were compared against numerical and/or experimental data.

2. CASES OF STUDY

In this work, three different cases were considered: Laminar Lid-Driven cavity flow, Steady-turbulent flow over a backward facing step and Dam break flow. This section describes each case.

2.1 Lid-Driven cavity flow under steady-laminar regimen

The first case studied was the steady-laminar flow in the lid-driven cavity problem to verify the laminar solver, *icoFoam*. Ghia *et al.* [1] analyzed a 2D square cavity for different Reynolds number (Re_L). In this problem three vortexes are clearly distinguish: a primary vortex (PV) and two vortexes on the bottom, one on the right (BR_1) and the other one on the left (BL_1).

As the Reynolds number increases, the size of the vortexes grows; and, if the Reynolds number is high enough, then three new vortexes will appear, one on the top left of the cavity (TL) and two more on the corners of the geometry (BR_2 and BL_2). Figure 1 shows the position of these vortexes for $Re=10000$.

A uniformly hexahedral mesh was used with the same number of cell in both directions. Meshes with 40.000 cells (200x200), 160.000 cells (400x400) and 640.000 cells (800x800) were tested to guarantee the spatial convergence.

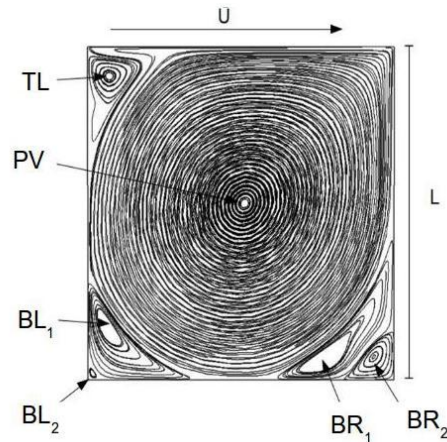


Figure 1. Streamlines in lid-driven cavity at $Re_L = 10000$

2.2 Steady-turbulent flow over a backward facing step

Flow over a backward facing step is a classic benchmark problem for turbulent flows, due its simplicity in the geometry and its complex dynamics because the presence of a recirculation zone as it is show in the figure 2. Steffen [2] made a full analysis of this problem, in a 9:1 expansion ratio (outlet height - step height ratio) and Reynolds number (Re_H) equal to 33.420, using a standard high Reynolds (HR) $k-\epsilon$ turbulence model and several low Reynolds (LR) $k-\epsilon$ turbulence models. Validation was made by comparison predictions of recirculation bubble length with experimental data.

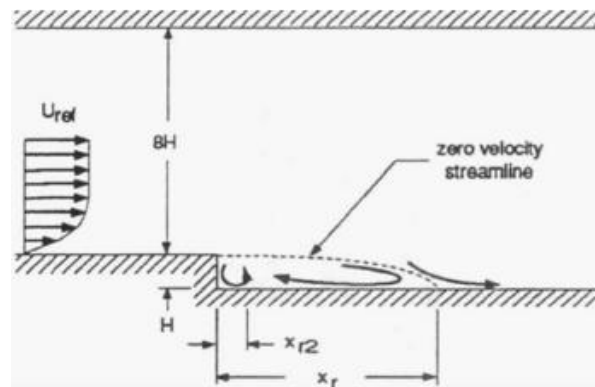


Figure 2. Tunnel configuration of Steffen [2]

The turbulence models evaluated in OpenFOAM were HR $k-\epsilon$ and LR $k-\epsilon$ Launder-Sharma. To guarantee a solution independent of spatial discretization, uniform meshes with hexahedral cells with (a) $0.050H$, (b) $0.033H$, and (c) $0.025H$ were simulated.

2.3 Dam break flow

Dam failure is a well studied problem for its implication in human life. For this reason many studies have been done in order to predict the evolution temporal and spatial of the water wave; WES [3] conducted a dam-break experiment in a rectangular channel with 1:200 slope, 122 meters long and surface roughness height of 0.0003 meters. Figure 3 depict the initial condition

for this case. Initially a water column was localized at the half channel and suddenly is allowed to fall; measurements of the water depth were made in different positions along the channel to see the progression of the stream. More recently in 2007 Pineda [4] modeled these experiments using the commercial software Ansys CFX® for validating this package in free-surface problems. Results obtained by [4] show that the commercial software is agreeing with experimental results.

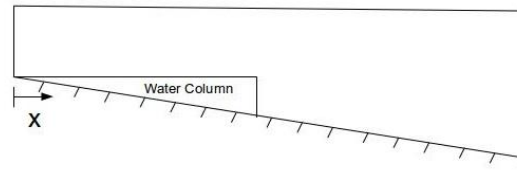


Figure 3. Initial condition for dam-break problem

Mesh with hexahedral cells was used because it is the best way to capture the free surface with the lowest error possible. Refinements were made in both spatial directions with the aim to ensure non-dependant results of the mesh. The final mesh used for this work had a 100.000 cells uniformly distributed along the x direction, but with a grow rate over the perpendicular direction for the purpose to having the smallest cells over the free surface.

3. RESULTS

3.1 Lid-Driven Cavity flow under steady-laminar regimen

Figure 4 shows center position obtained in OpenFOAM for the largest vortexes in the cavity. It was found a good correspondence with Ghia's [1] results for all Reynolds number evaluated. Table 1 shows that the location for the PV had an error not greater than 2% in comparison with [1], and for the BR₁ and BL₁ the differences encountered were about 7%. The vortexes TL₁, BR₂, and BL₂ apparition was observed at the same Reynolds number reported, as well the location for TL₁; however the position for secondary eddies presented a higher error due the cells were not small enough to capture their dynamics with precision especially for the BL₂ which is the smallest vortex.

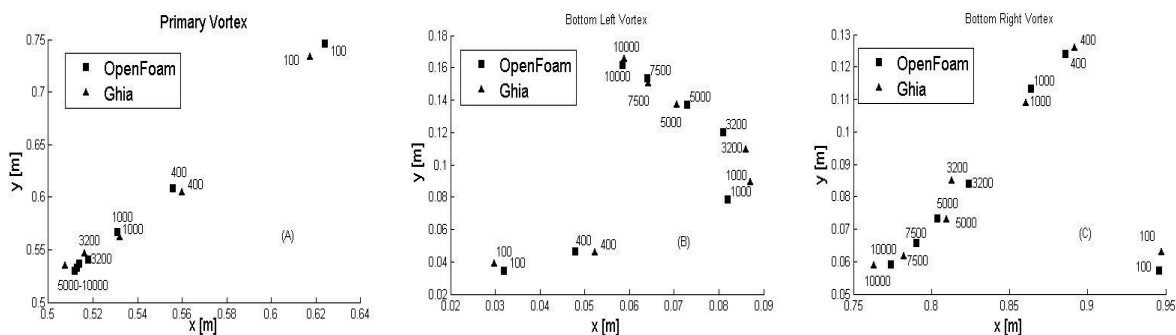


Figure 4. Vortex locations obtained in OpenFOAM for (a) PV, (b) BL₁, and (c) BR₁

3.2 Steady-turbulent flow over a backward facing step flow

Recirculation zone length using HR $k-\epsilon$ turbulence model was $5.33H$, this represents only a difference of 3% with the $5.5H$ reported by Steffen for this model, also velocity and turbulent kinetic energy profiles had a good matching along the channel, including recirculation zone where a strong peak is present in dimensionless turbulent kinetic energy. Results with LR $k-\epsilon$ Launder-Sharma turbulence model show a worse correspondence between OpenFOAM and what was described in literature; the bubble length obtained was $4.967H$, while Steffen [2] got a $5.4H$ in this turbulence model, a difference of 8%. Velocity profiles had a good agreement, however turbulent kinetic energy profiles were not according with results reported, especially near of the peaks due to recirculation zone.

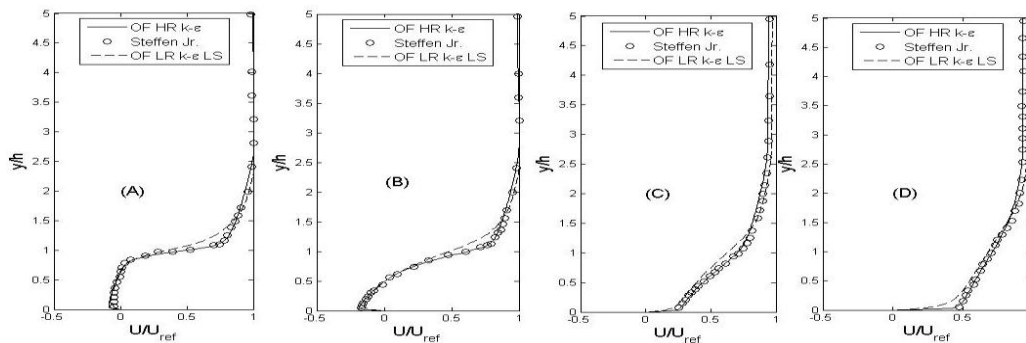


Figure 5. Velocity profiles along the channel for $x/H =$ (a) 1, (b) 2.5, (c) 8, and (d) 16

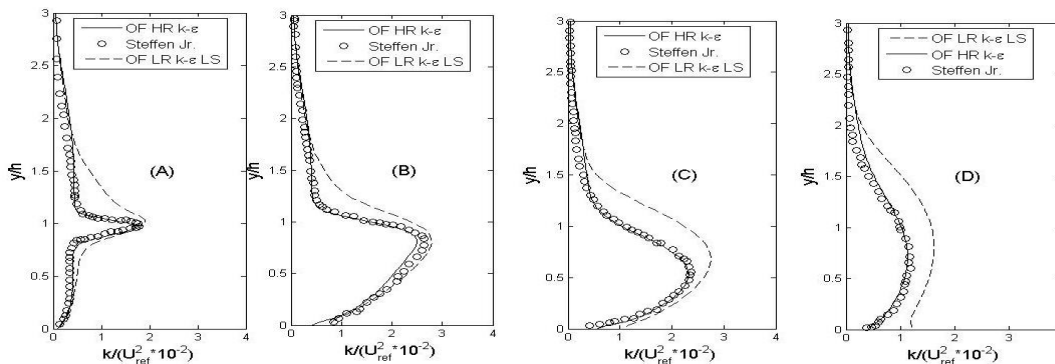


Figure 6. Turbulent kinetic energy profiles for $x/H =$ (A) 1, (B) 2.5, (C) 8, and (D) 16

3.2 Dam break

Figure 7 shows the results obtained in OpenFOAM in comparison with experimental data and another commercial package. The water depths predicted agree with results of WES [5] and Pineda [4] in both spatial and temporal dimensions. The maximum difference between OpenFOAM's results and experimental results is about 10%, which is the same error value that Pineda [4] obtained using the commercial software. The comparison made against Ansys CFX® showed a difference lower than 6%, which means that both software reached similar numerical results from a practical perspective.

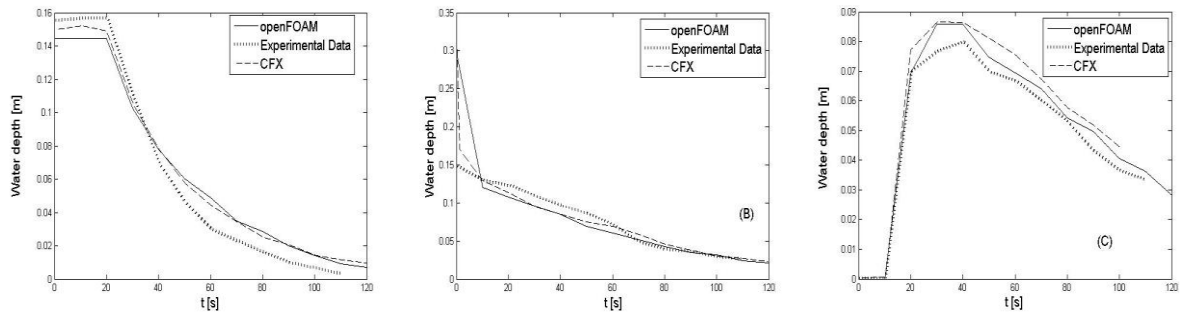


Figure 7. Water depth at $x =$ (A) 30.5m, (B) 61m, and (C) 81.4m

4. CONCLUDING REMARKS

Flows with complex dynamics, temporal and spatial, were modeled successfully using only tools provided by OpenFOAM. Results obtained in OpenFOAM show a good agreement between this software, others numerical packages, and experimental measures as well. The three solvers tested were able to get errors below what is accepted in engineering world.

REFERENCES

- [1].Ghia U, Ghia KN, Shin CT. High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method. *Journal of Computational Physics*. Vol. 48 pp. 387–41. 1982
- [2].Steffen C. A Critical Comparison of Several Low Reynolds Number k-c Turbulence Models for Flow Over a Backward-Facing Step. *29th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit*. 1993
- [3].Bellos, C., Sakkas, J. 1-D Dam Break Flood-Wave Propagation on Dry Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 113, No. 12 ASCE, 1510-1523. 1987.
- [4].Pineda, S. Validación del Simulador Comercial CFXTM en Flujo con Superficie Libre y Aplicaciones en flujo de Fluidos No Newtonianos. *B.S. Thesis, Universidad Simon Bolivar, Caracas*. 2007
- [5].WES (Waterways Experiment Station). Floods resulting from suddenly breached dams, Misc paper No. 2-374, Report No 1: Conditions of minimum resistance, 1960, Report No 2: Conditions of high resistance, 1961, US Army Corp of Engineers.

DESCRIPCIÓN COMPUTACIONAL DEL TRASPORTE DE SEDIMENTOS EN LA BAHÍA EL TABLAZO

Araujo Carlos

Rincón José

cdaraujo@fing.luz.edu.ve

jose.rincon@gmail.com

Laboratorio de Simulación Computacional, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia

Av. 16 con Cll. 67, Prolongación Cecilio Acosta, Maracaibo-Venezuela

Flores Janett

janettbfn@gmail.com

Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.

Resumen. *En este trabajo se presenta una descripción computacional del transporte de sedimento que tiene lugar en la bahía El Tablazo, un cuerpo de agua que forma parte del sistema lago de Maracaibo, ubicado en el estado Zulia- Venezuela. La bahía El Tablazo tiene forma trapezoidal, con un área de 640 km² y una profundidad promedio de 3 m, razón por la cual puede considerarse como poco profunda. En el extremo norte, la separación geográfica entre la bahía El Tablazo y el golfo de Venezuela ocurre debido a la presencia de tres canales naturales o bocas. La más ancha es conocida como boca San Carlos (1.5 km), seguida por boca Cañonera (0.9 km) y finalmente boca Cañonerita (0.5 km). Por el extremo sur, la bahía se conecta hidráulicamente con el saco del lago de Maracaibo mediante el estrecho y, en la costa noroccidental recibe la tributación del río Limón. La compleja hidrodinámica que tiene lugar en la bahía El Tablazo establece un patrón de transporte de los sedimentos cohesivos y no cohesivos que ha moldeado la morfología actual, la cual se encuentra continuamente perturbada por la presencia de un canal artificial de navegación que es mantenido con frecuentes actividades de dragado. El objetivo del presente trabajo es describir el patrón de movimiento de los sedimentos en la bahía El Tablazo, con el fin de identificar su impacto sobre el canal de navegación, es decir, localizar las zonas de mayor tasa de sedimentación sobre el canal y las razones que, desde el punto de vista de la dinámica del sistema, contribuye a dicho comportamiento. Para ello, se resuelve las ecuaciones de Navier Stokes acoplada al modelo de turbulencia de Smagorinsky a fin de obtener la hidrodinámica del sistema. Luego, se modela el transporte de los sedimentos cohesivos mediante una ecuación de transporte por convección y dispersión, que considera como términos fuentes los mecanismos de erosión y sedimentación, a*

partir de la velocidad, concentración y otros parámetros del lecho. Por último, el transporte de sedimentos no cohesivos se resuelve con el modelo de Engenlund y Hansen. Los resultados muestran que los sedimentos cohesivos suspendidos admitidos por el norte del sistema no parecen ser la principal causa de los problemas de sedimentación del canal, dado que estos tienden a precipitarse al este de la Bahía. Además, aunque se observa un frente de sedimentos suspendidos provenientes desde el río Limón y otro desde el estrecho de Maracaibo, los mismos tienden a depositarse al sur de isla de Toas y en la Bahía de Urubá. Los resultados obtenidos de la carga de fondo y suspendida no cohesiva revelan que entre la boca San Carlos y la isla Pescaderos existen los mayores aportes hacia el canal, debido al acarreo lateral que ocurre por la presencia del canal natural Larrazabal. En consecuencia, para reducir los niveles de sedimentación sobre el canal se debe bloquear dicho acarreo lateral e incrementar la capacidad autolimpiante del canal en el tramo ubicado entre las islas Pescaderos y San Carlos.

Palabras Clave: Lago de Maracaibo, Transporte de sedimentos, Bahía El Tablazo

1. INTRODUCCIÓN

Hasta el año 1938, la navegación hacia el Lago de Maracaibo a través de la bahía El Tablazo se efectuaba mediante canales naturales de unos 3,5 m de profundidad. No obstante, con el auge de la industria petrolera a mediados del siglo XX, esta vía lacustre fue sustituida por el canal de navegación del Lago de Maracaibo, cuya construcción culminó en el año 1957. Ahora bien, el nuevo canal rompió la morfología natural de la bahía El Tablazo, dando lugar a procesos de sedimentación y erosión que depositan a lo largo de la vía unos 8,0 millones de m³/año de material que deben ser dragados. Sin embargo, las operaciones de dragado y descarga de estos sedimentos “tienen el potencial para generar impactos negativos puntuales en las características físicas, químicas y biológicas del ecosistema de las áreas de dragado y de bote” [1]. Por esta razón, es deseable encontrar soluciones que permitan reducir los niveles de sedimentación sobre el canal de navegación.

En vista de lo anterior, el Instituto Nacional de Canalizaciones ha patrocinado estudios para comprender la dinámica de los sedimentos en la Bahía. En el año 1999, se efectuó una campaña de aforos en el canal de acceso al Lago de Maracaibo [2], y dicho estudio fue replicado en el año 2009, para seis de la diez secciones estudiadas previamente [3]. Sin embargo, a partir de estas mediciones es difícil inferir el comportamiento global de la dinámica de los sedimentos en el sistema estudiado. Por tal motivo, el presente artículo muestra una descripción del transporte de los sedimentos en la bahía El Tablazo, empleando para ello un modelo de simulación computacional.

2. METODOLOGÍA

El modelo computacional, basado en volumen finito, resuelve las ecuaciones de Navier Stokes acoplada al modelo de turbulencia de Smagorinsky a fin de obtener la hidrodinámica del sistema [4]. Luego, se modela el transporte de los sedimentos cohesivos mediante una ecuación de transporte por convección y dispersión, que considera como términos fuentes los mecanismos de erosión y sedimentación, a partir de la velocidad, concentración y otros parámetros del lecho. Por último, el transporte de sedimentos no cohesivos se resuelve con el modelo de Engenlund y Hansen. Cabe destacar que la hidrodinámica y el modelaje del transporte de sedimentos

cohesivos y no cohesivos, fue calibrado con datos de campos disponibles de las campañas de aforos [5, 6].

A fin de obtener indicadores que permitan describir la dinámica de los sedimentos cohesivos, se definen regiones o volúmenes de control (VC) para calcular un balance de masa neto durante el periodo de tiempo evaluado, a fin de cuantificar cambios en la concentración de los sedimentos cohesivos. La Figura 1 muestra la ubicación aproximada de los volúmenes de control en líneas segmentadas. El VC1 se localiza entre las islas San Carlos, Zapara, Pájaros y Pescaderos. EL VC2 en la boca Cañonera-Cañonerita. El VC3 en la zona de Punta de Palmas y abarca el primer cruce del canal. Finalmente, el VC4 se define para toda la bahía El Tablazo.

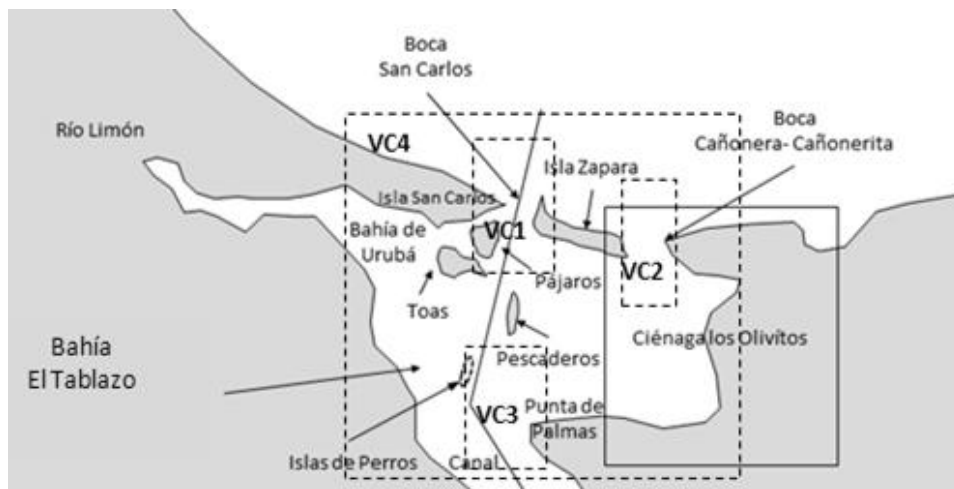


Figura 1- Bahía El Tablazo: ubicaciones aproximadas de los volúmenes de control.

Por su parte, en el caso del modelo de transporte de los sedimentos no cohesivos, arenas finas y gruesas, en el modelo computacional se monitorean los cambios del nivel del lecho para puntos localizados sobre el canal de navegación, específicamente en las zonas donde el INC registra altas tasa de sedimentación. La ubicación de estos puntos se muestra en la Figura 2.

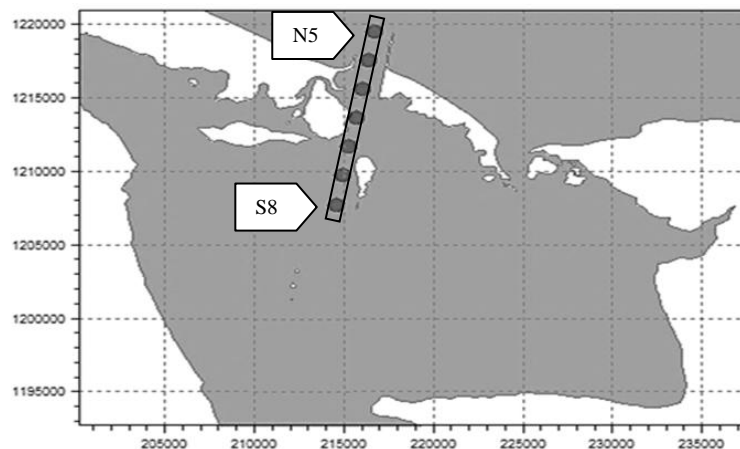


Figura 2- Puntos de muestreo sobre el canal de navegación.

Nótese la presencia de un primer tramo que comprende la zona delimitada por los kilómetros N5-S8 al norte de la bahía. El segundo tramo abarca los kilómetros S17-S21 los cuales se ubican en la zona del primer cruce del canal de navegación. Los cambios en el nivel del lecho (m/día) son cuantificados en los puntos antes señalados y luego se integran numéricamente a lo largo del canal para tramos de 2 km, a fin de estimar la cantidad de sedimento acumulado en m³/año.

3. RESULTADOS

La Tabla 1 presenta los balances de masa de sedimentos suspendidos en los cuatro volúmenes de control definidos previamente. Las estimaciones que se muestran corresponden a una simulación para la estación seca que abarca desde el 01/01 al 01/03 de un año típico, los cuales resultaron ser de mayor cuantía respecto a la estación lluviosa, lo que permite prever que no existe un acarreo importante por el río Limón, ni por el estrecho de Maracaibo, sino por las bocas al norte del sistema.

Tabla 1. Sedimentos cohesivos: balance de masa en los volúmenes de control

Sedimentos Cohesivos (TON)	VC1	VC2	VC3	VC4
	7589	8776	5674	64457

Las magnitudes confirman que la acumulación de material es mayor en las bocas que conectan a la bahía con el golfo de Venezuela (VC1 y VC2), respecto al estrecho en el sur del sistema (VC3) y que la tendencia general es de acumulación de material cohesivo para toda la bahía El Tablazo (VC4).

La Figura 3 muestra que en las bocas norteñas el frente de sedimentos cohesivos es hacia la bahía en marea descendente y baja, y aunque la situación se invierte en marea ascendente y alta, el comportamiento neto es a admitir material fino procedente del golfo de Venezuela.

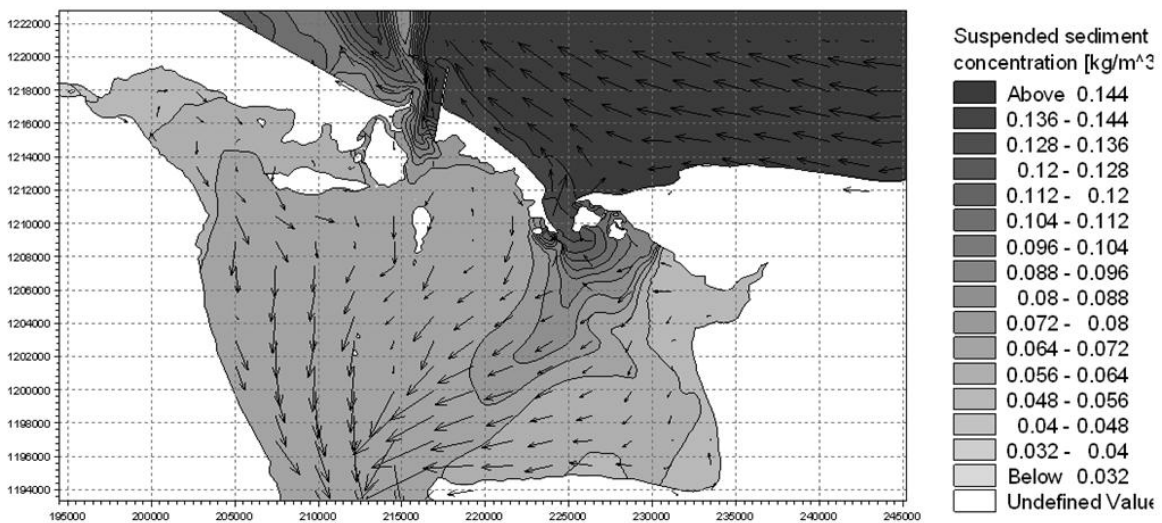


Figura 3- Sedimentos cohesivos: distribución en periodo seco con marea descendente y baja

Ahora bien, los sedimentos cohesivos suspendidos que ingresan por el norte del sistema no parecen ser la principal causa de los problemas de sedimentación del canal, dado que estos tienden a precipitarse al este de la Bahía. Esto refleja la capacidad auto limpiante que tiene el canal de navegación, que resulta de las velocidades de las corrientes alcanzada a lo largo de la vía, pero debe vigilarse los problemas de erosión de los taludes, particularmente en la costa oeste de la isla de Pescaderos. Además, aunque existe un frente de sedimentos suspendidos provenientes desde el río Limón y otro desde el estrecho de Maracaibo (en marea ascendente y alta), los mismos tienden a depositarse al sur de isla de Toas y en la Bahía de Urubá.

En el caso de los sedimentos no cohesivos, éstos tienden a moverse cerca del fondo produciendo cambios en el lecho. Los valores de tasa de sedimentación, estimados en los puntos previamente definidos sobre el canal de navegación, se muestran en la Figura 4. Como se puede observar, los cambios más importantes en el nivel del lecho ocurren entre los kilómetros N5-S5, tramo que comprende la zona entre la boca San Carlos y el norte de la isla Pescaderos.

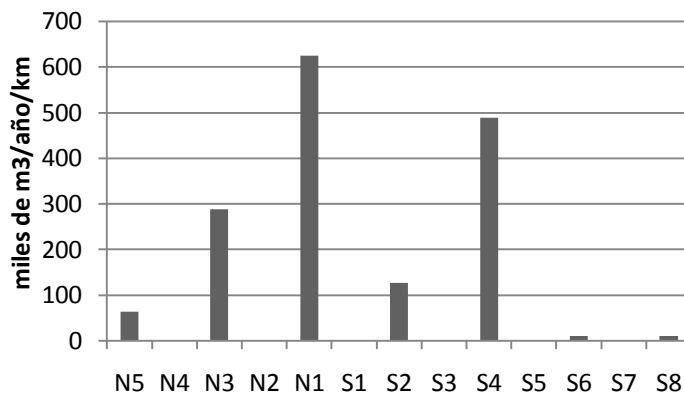


Figura 4- Tasa de sedimentación estimada entre los kilómetros N5 y S8

Es importante señalar que durante el cambio entre marea ascendente y marea alta, la corriente procedente del Golfo por la boca San Carlos, choca con la corriente en sentido sur-norte que circula por el canal de navegación. En este momento, las aguas se mezclan y encuentran una especie de desvío, en primer lugar por la costa este de la isla Pescadero y luego por el canal de navegación cuando la marea alta se impone.

El proceso antes descrito parece explicar la presencia natural de un canal al este de isla Pescaderos, conocido como canal Larrazabal, así como, el acarreo lateral de carga de fondo y suspendida hacia las zonas críticas del canal de navegación, lo cual confirma los estudios granulométricos realizados en la zona (Laboratorio Nacional de Hidráulica, 1999). Finalmente, una integración de los valores obtenidos a lo largo del tramo N5-S8 y proyectados para todo un año, permiten estimar una acumulación de material de 3.226.822,36 m³/año.

4. CONCLUSIONES

La concentración de sedimentos cohesivos permite prever que el acarreo más importante no proviene ni por el río Limón, ni por el Estrecho, sino más bien, por las bocas San Carlos, Cañonera y Cañonerita, las cuales en periodo seco tiende a admitir una mayor cantidad de sedimentos al sistema.

Las simulaciones del transporte de sedimento cohesivo muestran que una vez dentro del sistema este material tiende a precipitarse en las zonas poco profundas y de baja velocidad, principalmente al este de la Bahía El Tablazo, en la desembocadura del río Limón, y al sur de la isla de Toas.

Las simulaciones del transporte de sedimento no cohesivo muestran que, existe un importante transporte como carga de fondo y carga suspendida mediante el canal Larrazabal, el cual contribuye significativamente al aporte lateral de sedimentos sobre el canal de navegación, en especial al noroeste de la isla de Pescaderos. La integración de los valores de tasa de sedimentaciones obtenidas a lo largo del tramo N5-S8 y proyectadas para todo un año, permiten estimar una acumulación de material de 3.226.822,36 m³/año en la barra de Maracaibo.

5. AGRADECIMENTOS

Convenio Específico de Cooperación ICLAM-LUZ, suscrito entre el Instituto para el Control y la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM) y la Universidad del Zulia (LUZ), por medio del cual se obtuvo acceso a información indispensable para el desarrollo de la presente investigación.

6. REFERENCIAS

- [1]. Landaeta, C. Potenciales impactos ambientales generados por el dragado y material dragado. *Instituto Nacional de Canalizaciones*, Maracaibo, Venezuela, 2001.
- [2]. Laboratorio Nacional de Hidráulica. 1ra Campaña de aforos en el canal de acceso al Lago de Maracaibo. *Reporte de Medición*, Caracas, Venezuela, 1999.
- [3]. GPS. Levantamiento de información básica adicional (aforo) del proyecto INC1-AE-020-09, *Reporte de medición*, Maracaibo, Venezuela, 2010.
- [4]. Araujo, C; Rincón, J y Flores, J. Simulación computacional de la hidrodinámica en la bahía El Tablazo del sistema hidráulico lago de Maracaibo, *Congreso internacional de métodos numéricos en ingeniería y ciencias aplicadas XI CIMENICS*, Porlamar, Venezuela, 2012.
- [5]. Flores, J. Influencia del aumento del nivel medio del mar sobre el sistema Lago de Maracaibo. *Tesis Doctoral en Ingeniería Ambiental*, Departamento de Hidráulica, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 2008.
- [6]. Pacheco, C. Transporte de sedimentos en la Bahía del Tablazo, *Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Civil*, Departamento de Hidráulica, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 2012.
- [7]. Araujo, C. Dinámica sedimentológica de la bahía El Tablazo del sistema hidráulico Lago de Maracaibo, *Tesis Doctoral en Ingeniería*, Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, División de estudios para graduados, Maracaibo, Venezuela, 2012.

MODELO TERMODINAMICO DE COMBUSTION EMPLEANDO EGR

Carlos G. Villamar Linares

villamar@ula.ve

Grupo de Motores Térmicos (GRUMOTE), Departamento de Ciencias Térmicas, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

Rafael J. Santos Luque

José Ricardo Bermúdez Santaella

rsantosl@ula.ve

jbermu@ula.ve

Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Mérida, Venezuela.

Resumen. *Se presenta un programa que permite determinar las propiedades termodinámicas, la energía liberada y la temperatura de llama adiabática en los procesos de combustión a presión y volumen constante al implementar recirculación de gases de escape (EGR: Exhaust Gas Recirculation), el modelo permite emplear mezclas de diversos combustibles, seleccionándolos de la base de datos que cuenta con 23 combustibles, se considera en los cálculos la humedad del aire presente en el ambiente. Adicionalmente el modelo permite determinar la composición de los productos, poderes caloríficos, temperatura de condensación del vapor de agua presente en los productos, irreversibilidades, eficiencia de combustión, entre otras propiedades y parámetros de interés, para lograr esto se emplean las ecuaciones de la Primera y Segunda ley de la termodinámica aplicada a sistemas reactivos, gases ideales, balance de masa, relaciones Tds, así como las ecuaciones de equilibrio químico.*

Para el desarrollo de este trabajo se emplea un modelo de combustión de seis especies químicas y se desarrolla un programa que puede ser empleado por los estudiantes que cursan los primeros niveles de estudios sobre combustión, de manera que puedan corroborar los resultados obtenidos en los problemas realizados durante sus estudios.

Palabras Claves: Combustión, EGR, Termodinámica, Modelo, Especies químicas.

1. INTRODUCCION

El estudio del proceso de combustión es de suma importancia, ya que dependiendo de qué tan eficiente sea llevado a cabo este proceso, se liberará una mayor o menor cantidad de energía, para algún proceso específico, ya sea para calefacción u obtención de potencia, también se verá afectado por esta eficiencia la composición y cantidad de los gases contaminantes formados, obteniéndose mayor energía útil y menor grado de contaminación al llevarse a cabo el proceso de combustión lo más completo posible. La combustión es un proceso físico-químico complejo, su surgimiento, desarrollo y plenitud quedan definidos por las velocidades de las reacciones químicas, las condiciones de transferencia de calor y masa en la zona de la llama, así como por la transferencia de calor a las paredes del sistema en donde se realiza. [1]

Por otro lado existe una técnica que muy empleada y efectiva para reducir las emisiones de gases contaminantes específicamente óxidos nitrosos mediante el uso de recirculación de gases de escape esta técnica es conocida como EGR (Exhaust Gas Recirculation). [2], el método consiste en reemplazar una parte del aire de alimentación por gases de escape durante el proceso de admisión, esto reduce el aire disponible para la combustión, de esta manera se reduce la temperatura del proceso de combustión, y por ende baja la producción de emisiones de óxidos nitrosos, el porcentaje de gases residuales se tomara a la salida del motor y se introducirá dentro del cilindro de este a una temperatura mayor que la del aire de alimentación. [3].

Es importante resaltar que en el presente trabajo, por tratarse del desarrollo de una herramienta para ser empleada por los estudiantes que cursan sus primeros estudios sobre combustión, se emplea un modelo de combustión de 6 especies químicas, por lo tanto no se calcula los óxidos nitrosos formados, más bien, el objetivo principal es de que los estudiantes cuenten con una herramienta que sea fácil de usar y que proporcione resultados confiables que permita verificar los resultados obtenidos y compararlos con los ejercicios realizados manualmente, así mismo el programa permite observar el efecto que tiene el empleo de EGR sobre la temperatura de llama adiabática y la cantidad de energía liberada, adicionalmente se puede estudiar el efecto que tiene el vapor del agua presente en el ambiente sobre los parámetros del proceso de combustión.

2. DESARROLLO DEL MODELO

En este trabajo se emplea un modelo simple de combustión de 6 especies químicas, se considera que el aire está formado por 20.95% de O_2 y 79.05% de N_2 , donde se asume que los demás compuestos del aire que aparecen en pequeñas cantidades están agrupadas dentro del nitrógeno, adicionalmente se considera la humedad presente en el aire. Un esquema del proceso de combustión empleando EGR, se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

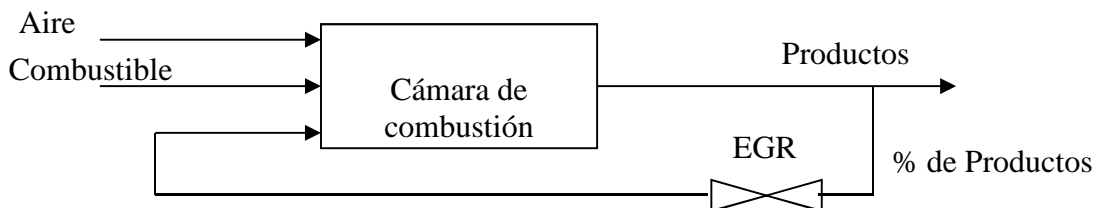
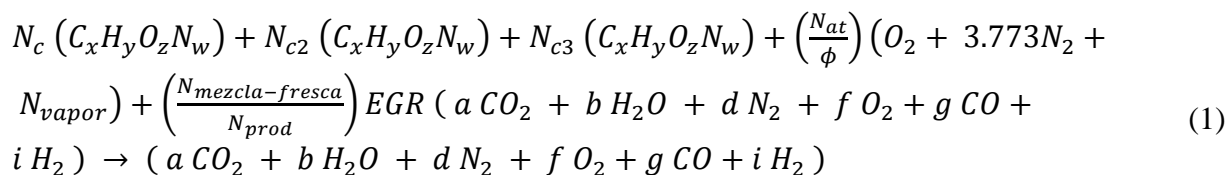


Figura 1. Esquema de la cámara de combustión.

La Ecuación (1); **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la reacción de combustión considerada.



Donde N_c, N_{c2} y N_{c3} indican el número de moles del combustible que lo precede; x, y, z, w son los átomos del elemento presente, el modelo permite introducir mezclas de hasta tres combustibles; N_{at} es la cantidad de aire teórica o estiquiométrica; ϕ representa la riqueza, parámetro adimensional que es el cociente entre la masa combustible y la masa de aire real entre la masa de combustible y aire estiquiométrica; $N_{mezcla-fresca}$ representa el número de moles de mezcla fresca, combustible y aire; N_{prod} es el número de moles de productos; EGR es la fracción de gases recirculados empleado; N_{vapor} es el número de moles de vapor presentes en el aire ambiente, calculado por medio de la humedad relativa y condiciones ambientales, esta cantidad no reacciona con nada pero si aparece en los productos; a, b, d, f g, i son el número de moles de la especie química que precede, se asume que la combustión es teoría, por lo tanto si la riqueza empleada es la estiquiométrica, solo aparecen en los productos, especies de combustión completa (CO_2 , H_2O) más el nitrógeno presente en el aire, si la riqueza es menor que uno, se considera una mezcla pobre, por lo tanto aparecerá en los productos el oxígeno sobrante, mientras que si la mezcla es rica, es decir, mayor a uno, aparecerán los productos de combustión completa, el nitrógeno además de CO y H_2 , en este último caso no aparecerá oxígeno.

Para determinar la energía liberada en procesos a volumen y presión constante se emplean las ecuaciones (2) y (3) respectivamente y para hallar la temperatura de llama adiabática se igualan a cero dichas ecuaciones [4] [5] [6] [3].

$$Q_v = U_p - U_r \quad (2)$$

$$Q_p = H_p - H_r = \sum_p N_i (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}) - \sum_r N_i (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h}) \quad (3)$$

Dónde: H y U son la entalpía y energía interna respectivamente; N: número de moles de la especie considerada; \bar{h}_f^0 : entalpía de formación; $\Delta \bar{h}$: cambio de entalpía entre cualquier estado dado y la entalpía del gas ideal a 298K y 100 kPa; Los subíndices p y r representan los productos y reactantes respectivamente; para calcular U, se emplea la ecuación de gases ideales de forma molar [7].

Para determinar las propiedades termodinámicas de los combustibles, así como del aire y productos de combustión se emplearon las ecuaciones y bases de datos propuestas por: [8], [9], [10], [4], [6], [11]. Para determina la entropía se emplea la siguiente expresión:

$$\Delta S = S_p - S_r = \sum_p N_i \left(\bar{s}_{T0}^0 + \int_{T0}^T \frac{\bar{C}_{p0}}{T} - \bar{R} \ln \frac{y_i P}{P^0} \right) - \sum_r N_i \left(\bar{s}_{T0}^0 + \int_{T0}^T \frac{\bar{C}_{p0}}{T} - \bar{R} \ln \frac{y_i P}{P^0} \right) \quad (4)$$

Dónde: S es la entropía; $\overline{s_{T_0}^0}$: entropía a $T_0 = 298\text{K}$ y 100 kPa , T : temperatura a la que se encuentra la especie; $\overline{C_{p0}}$: Calor específico; \overline{R} : Constante universal de los gases; P : presión a la que se encuentra la especie; $P^0 = 100\text{ kPa}$; y_i : Fracción molar de la especie [7]. Mientras que la eficiencia de combustión se determina mediante la Ec. (5)

$$\eta_{comb} = \frac{H_p - H_r}{m_c PCI} \quad (5)$$

Dónde: m_c es la masa de combustible empleada y PCI el poder calorífico inferior de dicho combustible.

Las ecuaciones mostradas junto con los modelos y base de datos de los autores citados anteriormente se introdujeron en un programa de computación, el cual permite realizar estudios paramétricos de un combustible o mezclas de estos y así obtener diversos parámetros de interés, en la siguiente sección se muestra a manera de ejemplo algunos de los resultados obtenidos al correr el programa bajo diferentes condiciones.

3. RESULTADOS

La

Figura 2 muestra el calor liberado y la temperatura de llama adiabática para procesos a presión y volumen constante, en función de la temperatura de EGR, empleando para ello un 20% de gases recirculados, cuando se quema Octano como combustible con una riqueza de 0.9, las condiciones de los reactantes son 298K y 100 kPa , para el cálculo de los calores se tomó que los productos son expulsados a 1700K

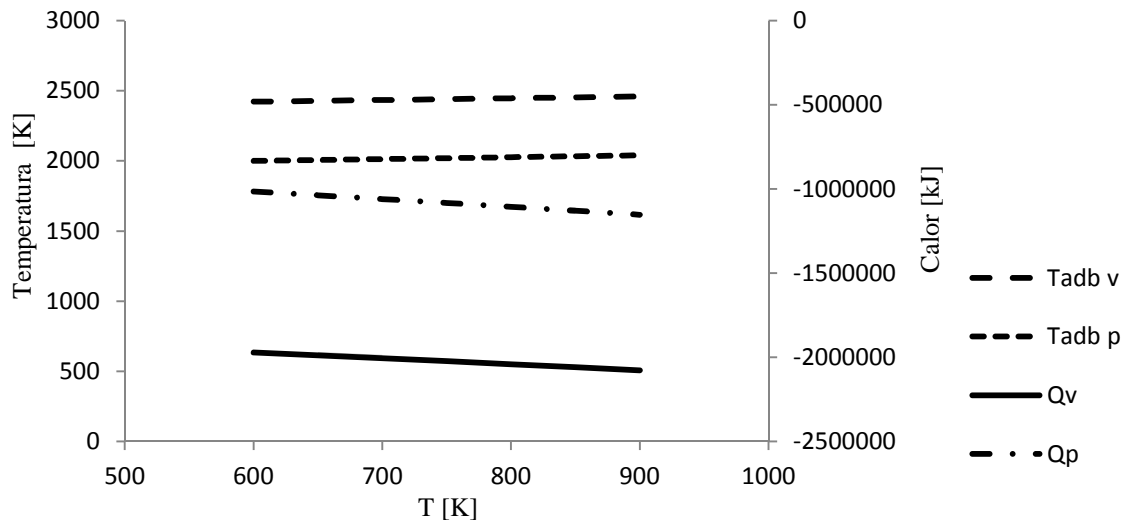


Figura 2. Calor liberado y temperatura de llama adiabática al quemar C_8H_{18} en función de la temperatura de EGR.

En la Figura 3 se puede observar el calor liberado y la temperatura de llama adiabática en función de la fracción de EGR empleado, en este caso se mantuvo constante el valor de los parámetros descritos en la

Figura 2, y se mantuvo constante la temperatura de EGR en 800K.

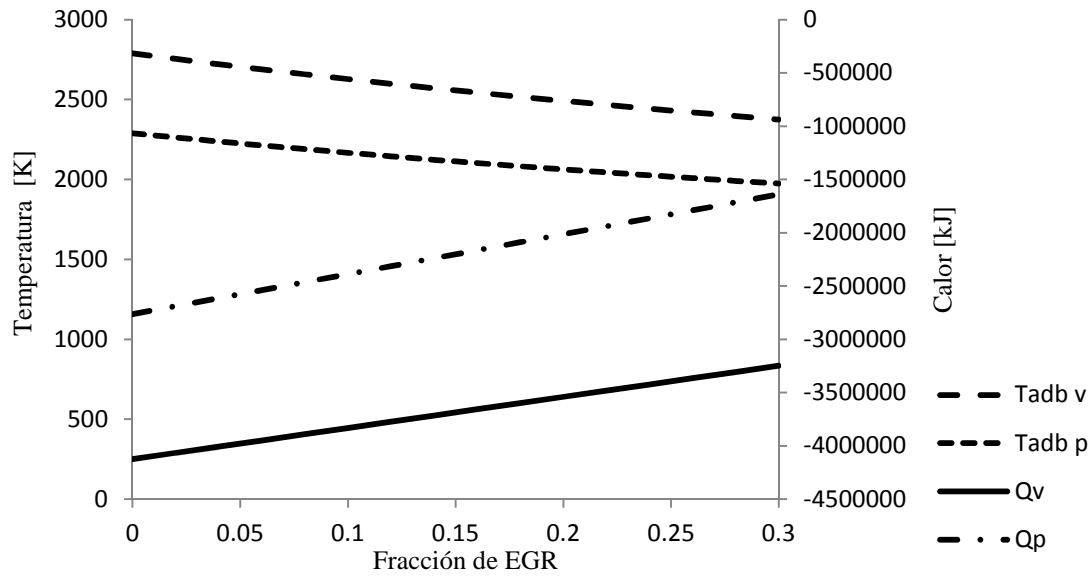


Figura 3. Calor liberado y temperatura de llama adiabática al quemar C_8H_{18} en función de la fracción EGR empleado.

La

Figura 4 muestra la variación de la eficiencia de la combustión en función de la fracción de EGR empleado para dos combustibles, C_8H_{18} y una mezcla formada por 0.4 C_4H_{10} 0.4 C_2H_6 0.2 CH_4 , las demás condiciones de operación son las mismas que las de la Figura 3

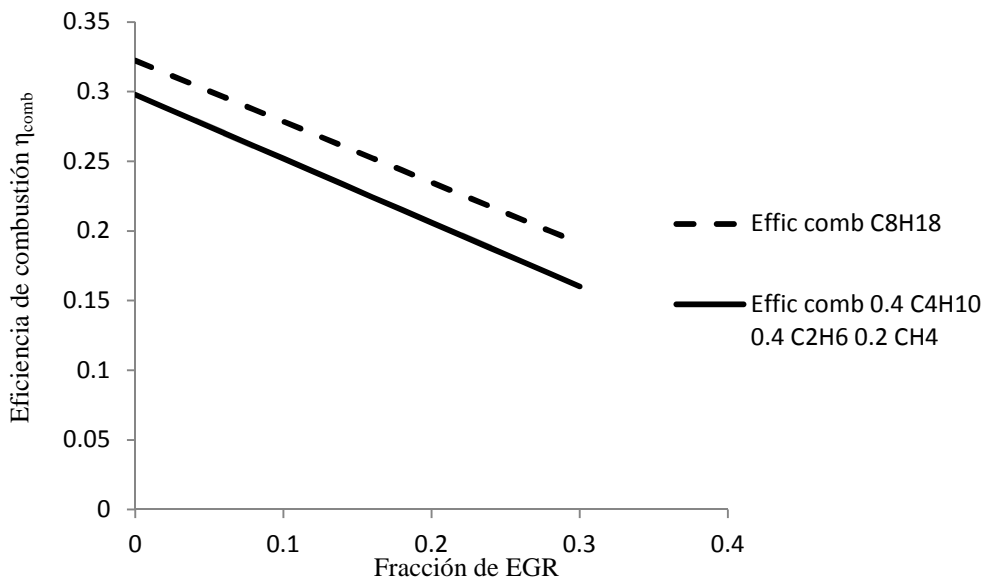


Figura 4. Eficiencia de la combustión en función de la fracción de EGR empleado para dos combustibles, C_8H_{18} y una mezcla formada por 0.4 C_4H_{10} 0.4 C_2H_6 0.2 CH_4

Las figura mostradas como ejemplo son los resultados de algunas corridas realizadas y que se pueden hacer con el programa COMBUST-EGR, adicionalmente se puede trabajar con 23

combustibles o mezclas de ellos, variar la temperatura del aire y combustible, riqueza, humedad relativa del aire, presión atmosférica, presión de entrada de los reactantes, temperatura ambiente, fracción de EGR empleado así como su temperatura de entrada a la cámara de combustión, presión y temperatura de salida de los productos.

Los parámetros de salida arrojados por el programa son: composición de los productos y EGR, entalpía, energía interna y entropía de los reactantes y productos, relación combustible-aire, calor a volumen y presión constante, eficiencia de combustión, irreversibilidades, temperatura de llama adiabática a presión y volumen constante, poder calorífico inferior y superior a volumen y presión constante, temperatura de condensación del vapor de agua formado en los productos, masa de productos formados por unidad másica de combustible empleado.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos concuerdan con la bibliografía sobre el tema y permite realizar de forma fácil y sencilla estudios paramétricos sobre las variables de interés del usuario.

El programa desarrollado es una herramienta que puede servir de ayuda a los estudiantes que inician sus estudios sobre el proceso de combustión, con ella pueden corroborar rápida y fácilmente los resultados obtenidos al resolver diversos problemas planteados en clases, otra ventaja es la forma clara y didáctica como se presentan de los resultados.

REFERENCIAS

- [1] M. S. Jovaj, Motores de Automóvil, Moscú: MIR, 1982.
- [2] M. Lapuerta, O. Armas y J. Hernandez, Diagnosis of DI Diesel Combustión from In Cylinder Pressure Signal by Estimation of Mean Thernodynamic Properties of the Gas, Pergamon, Applied Thermal Engineering, 1997.
- [3] F. Payri y J. Desantes, Motores de Combustión Interna Alternativos, Valencia: Reverté, 2011.
- [4] S. Turner, An Introduction to Combustion, 2 ed., Pennsylvania: Mc Graw Hill, 2000.
- [5] F. El-Mahallawy y S. E.-D. Habik, Fundamental and Technology of Combustion, Egypt: Elsevier, 2002.
- [6] J. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York: Mc Graw Hill, 1988.
- [7] G. Van Wylen, R. E. Sonntag y C. Borgnakke, Fundamentos de Termodinámica, 2 ed., México: Limusa Wiley, 2003.
- [8] Y. Cengel y M. Boles, Termodinamica, 7 ed., México: McGraw-Hill, 2012.
- [9] C. R. Ferguson y A. T. Kirkpatrick, Internal Combustion Engines, 2 ed., New York: Jhon Wiley & Sons, 2000.
- [10] R. Stone, Introduction to Internal Combustion Engines, 3 ed., Oxford: SAE International, 1999.
- [11] D. R. Buttsworth, Spark Ignition Internal Combustion Engine, Modelling using Matlab, Australia: Faculty of Engineering & Surveying Technical Reports, 2002.

A 2D BEM APPROACH TO THE MODELLING OF NOISE PROPAGATION

Paulo Teixeira

Boris Bossio

paulovzla@yahoo.es

bossiob@usb.ve

Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica, Caracas 1080- A, Venezuela.

Abstract. *In recent years, due to industrial development and global growth of commercial activities, noise pollution, being not 'visible', has become a frequently unnoticed problem that affects both urban and sub-urban areas. In the industrial fields, the noise pollution problem is more serious since in those areas there are plenty of machinery and equipment that generate great noise problems which develop into occupational-related and environmental-related noise pollution problems. Nowadays, design engineers in industries are becoming aware of the importance of decreasing noise pollution, hence, it is useful for them to be able to predict the sound distribution in an area of interest during the design stage, prior to setting up and installing the equipment that would produce an impact on global sound levels.*

This study focuses on a two-dimensional (2D) approach to the modeling of noise propagation in enclosed areas using the Helmholtz equation for the time harmonic pressure field. A direct Boundary-Element Method (BEM) formulation with constant elements is used to solve the problem. The proposed 2D model was implemented in Matlab® and validated through comparison with the free field cylindrical wave propagation model (analytical) where good agreement between results was found. A region of study (domain) was set and boundary conditions were particularly defined in order to compare the numerical model's solution with a reference solution for an L-shaped room.

Keywords: Sound Pressure Level (SPL), Boundary-Element Method (BEM), Acoustics, Noise Propagation.

1. INTRODUCTION

Noise is a phenomenon sensed and evaluated by almost everybody. Exposure to noise is one of the frequent complaints of populations living in large cities. In these areas and their surroundings, traffic is the most frequently cited noise source, followed by neighborhood noises and aircraft noises[1]. All around us there are plenty of noise sources, some much of them with the potential to interfere negatively with human-related activities efficiency. To solve this problem, scientists all over the world have been creating and improving noise

control strategies and solutions, such as barriers, confinements, silencers and mufflers. On the other hand, scientists have been trying a different approach on “solving” the noise problem before it shows. Nowadays, design engineers in industries are able to predict the sound distribution in an area of interest during the design stage, prior to setting up and installing the equipment that would produce an impact on global sound levels. López-Pacheco et al have studied noise-related problems from an environmental perspective [2].

There are plenty of strategies to solve mathematical models that represent those noise problems, being the boundary element method (BEM) a numerical computational method of solving linear partial differential equations which have been formulated with integral equations. This method is often more efficient than other methods, including finite elements (FE), in terms of computational resources for problems where there is a small surface/volume ratio [3].

Many scientists have been studying the acoustic intensity field in enclosed regions. Based on theoretical results, Meissner et al. [4] developed a computer program to simulate the acoustic intensity vector field inside an irregular shaped room. In the same order of ideas, the present study focuses on the creation and development of a two-dimensional (2D) sound propagation model to solve the Helmholtz equation using the BEM. In this study, a region of study (domain) was set and boundary conditions were particularly defined in order to consider the effect of walls on the solution. Sound propagation in an enclosed region was described by the variation of local pressure values, and so, the intensity field.

This paper is organized as follows: After a brief presentation of the noise problem in Section 2, the BEM formulation to solve the Helmholtz equation will follow in Section 3. The numerical model and methodology are presented in Sections 4 and 5. Results are shown in section 6 and, in Section 7, this article concludes with its final remarks.

2. THE NOISE PROBLEM

The study of noise problem is associated to the propagation of acoustic waves. The main variable used to describe the acoustic field is the pressure p since it can be easily measured in the practice. The acoustic field can be approximated by the linear wave equation given in Eq. (1), where φ is the time-dependent acoustic pressure and c is the wave propagation velocity in the media. [1]

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

To simplify the problem, the pressure is considered to be a harmonic function like $\varphi(r, t) = p(r)e^{-i\omega t}$, where ω is the angular frequency of sound source. If this definition is substituted in Eq. (1), the Helmholtz wave equation is retrieved, where p is the time independent pressure field, and $k = \omega/c$ is the wave number. [5]

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (2)$$

The acoustic particle velocity can be retrieved using Eq. (3):

$$-\nabla p = \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad \vec{u} = \frac{-\nabla p}{i\omega\rho} \quad \vec{u} = \frac{i\nabla p}{\omega\rho} \quad (3)$$

The boundary condition formulation is given in Eq. (4), where $\partial/\partial n$ means the normal derivative. [6]

$$a \frac{\partial p}{\partial n} + ik\beta p = g \quad (4)$$

The parameter β is defined in Eq. (5) where Z_0 is the impedance of the propagating media (ρ its density), and Z_s the boundary surface impedance. [6]

$$\beta = \frac{Z_0}{Z_s} = \frac{\rho c}{\frac{p}{\vec{u} \cdot \hat{n}}} \quad (5)$$

The definition given in Eq. (4) can handle the different kinds of boundary conditions in the following way: the Dirichlet boundary condition $a = 0$ represents the pressure value in the boundary, and can be used to model a soft surface (change of media) $g \neq 0$. The Neumann boundary condition $a = 1$ and $\beta = 0$ represents the normal acoustic particle velocity in the boundary, if $g \neq 0$. The Robin condition $a = 1$ and $g = 0$ is used to model penetrable surfaces, when $Z_s \rightarrow \infty$ the surface is perfectly reflecting $\beta = 0$ and when $Z_s \rightarrow Z_0$ the surface is perfectly absorbing $\beta = 1$. Accordingly, the parameter β is bounded between 0 and 1 and this boundary condition can be used to represent walls and obstacles [6].

Once that has been established the mathematical model, the noise problem can be represented by a boundary value problem solving the Helmholtz equation to obtain the RMS pressure field.

3. BOUNDARY ELEMENT FORMULATION

The BEM formulation to solve the Helmholtz equation is similar to the potential scheme (Laplace Equation), where Eq. (6) is used to obtain the pressure field at a point x from known pressure p and known normal derivative (velocity) $\partial P/\partial n$ at domain boundary (Q), for the particular case of 2D geometry [6].

$$c_{ij}p(x) = G(x_0, x) + \int_{\partial D} \left[G(Q, x) \frac{\partial p(Q)}{\partial n(Q)} - \frac{\partial G(Q, x)}{\partial n(Q)} p(Q) \right] ds(Q) \quad (6)$$

In Eq. (6), the coefficient c is equal to unity if the point x lies out of the boundary, and is equal to 1/2 if it is on the boundary. The kernels are given in Eq. (7) and Eq. (8), where $H_1(n, z)$ is the Hankel function of the first kind of order n valued at z . " r " is the distance between points Q and x [4].

$$G(Q, x) = -\frac{i}{4} H_1(0, kr) \quad (7)$$

$$\frac{\partial G(Q, x)}{\partial n(Q)} = D(Q, x) = \frac{i}{4} k H_1(1, kr) \left(\frac{\vec{Q} - \vec{p}}{r} \right) \hat{n}(Q) \quad (8)$$

4. NUMERICAL MODEL

The boundary element method was implemented in Matlab® using constant elements for field variables (pressure p and derivative) where geometry nodes were interpolated with linear elements and the collocation nodes were set at the element midpoint. The normal to the boundary was defined to be directed into the domain as shown in Fig. 1.

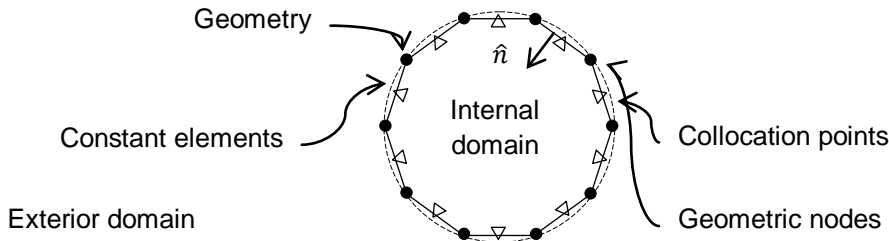


Figure 1-Boundary element formulation.

The discretized form of Eq. (6) is given in Eq. (9). Gauss quadrature was used to evaluate the integrands, and the boundary condition written in Eq. (4) was incorporated to the equation, leaving the pressure to be the only unknown variable. [6]

$$\frac{p(x_i)}{2} = G(x_0, x_i) + \sum_{j=1}^{ne} \left[\int_{-1}^1 [ik\beta_j G(Q(z), x_i) J(z) dz] + \int_{-1}^1 [D(Q(z), x_i) J(z) dz] \right] p_j \quad (9)$$

5. METHODOLOGY

To validate the developed algorithm, a circular domain of radius $r = 10m$ with a point source at center of amplitude 1Pa was solved in order to compare the free field analytical solution against the numerical solution, which is retrieved setting the boundary condition to $\beta = 1$. The wave number is set to $k = 5$ (i.e. 275 Hz with $c = 346.1 m/s$).

On the other hand, an L-Shaped room solved by Meissner [4] with the dimensions shown in Fig. 2 was solved for two source frequencies of 70Hz and 144Hz with uniform reflective walls of $\beta = 0.181$ in order to calculate the pressure field and the intensity in the domain. In this work, the model was solved in a 2D approach.

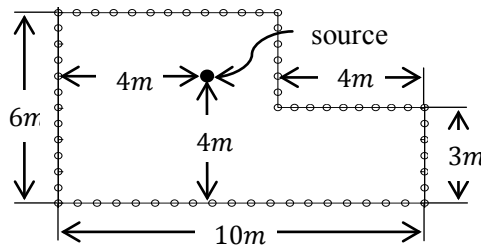


Figure 2- Free field solution for $k = 5$.

6. RESULTS

Comparing the analytical free field solution against the obtained solution, a good agreement was retrieved as can be seen in Fig. 3. There is also noticeable the harmonic solution of pressure whose RMS value is smooth and not harmonic.

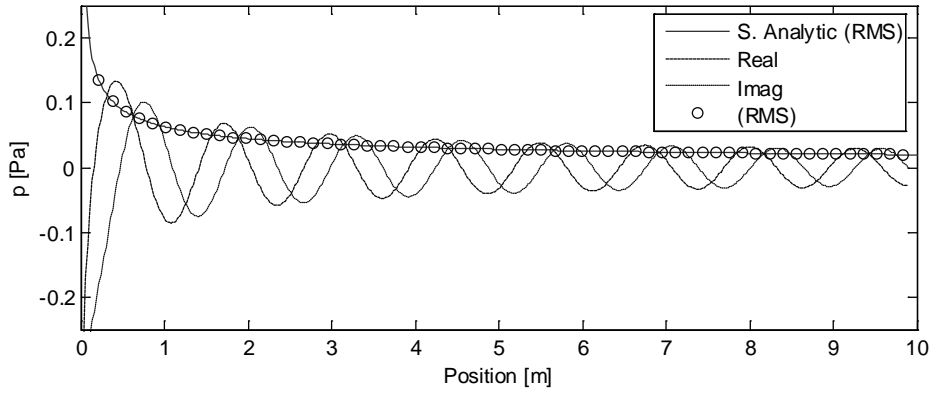


Figure 3- Free field solution for $k = 5$.

Accordingly, Fig.4 shows the L-Shaped room solution for a source emitting at 70Hz and Fig. 5 for 144Hz.

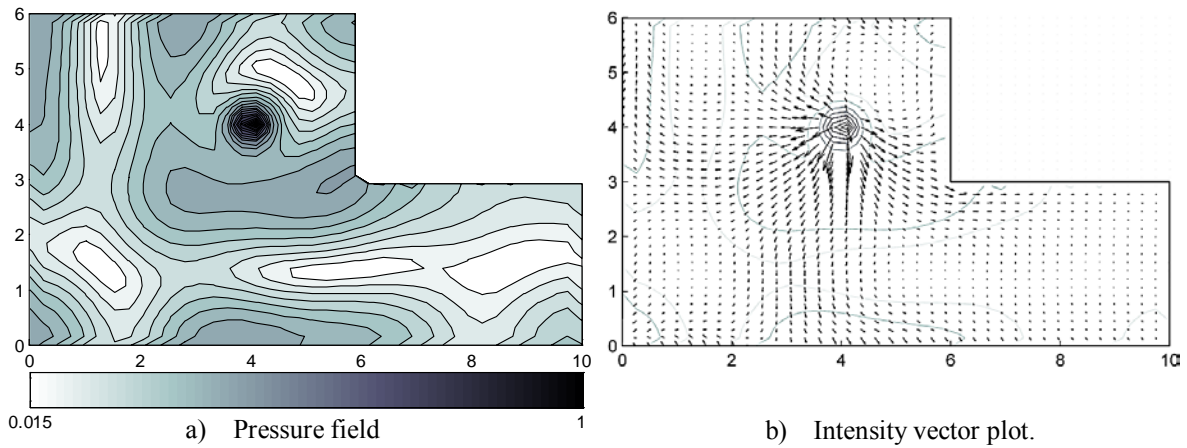


Figure 4- L-Shaped room solution for 70Hz and $\beta = 0.18$.

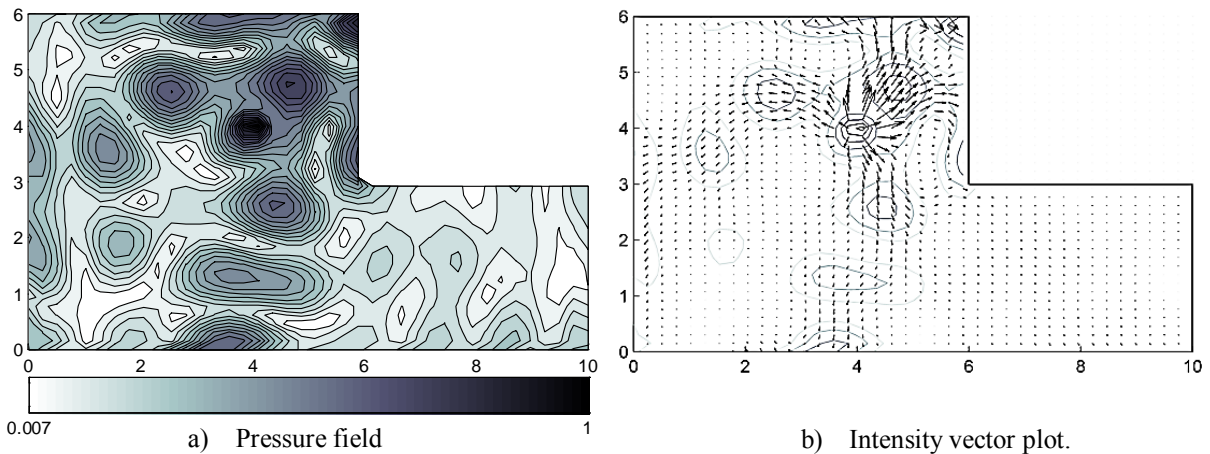


Figure 5- L Shaped room solution for 144Hz and $\beta = 0.18$.

Comparing both solutions, the obtained pressure field is different from 70Hz to 144Hz. For the high frequency the pressure field is more complex, and has many interference zones where high amplitude is found. However, the intensity vector plot gives a better description of the acoustic energy flux in the domain. In both cases the energy is emitted from the source

and scattered within the domain, but the presence of the walls (boundaries) generates complex streamlines due to reflectance effects. For both frequencies a vortex is found at the upper right corner of the room, where similar results were obtained by Meissner [4], with some differences associated to the 3D model.

Finally, when the pressure field is compared against the intensity vector plot, the high intensity zones are associated with high pressure amplitude, while the vortices and saddle points (described by Meissner [4]) are related with low pressure amplitude.

7. CONCLUSIONS

In this study, a direct 2D BEM formulation was used to solve the Helmholtz equation for the time-harmonic pressure field in an enclosed area. The geometry was discretized with constant elements and boundary conditions were particularly defined in order to consider the absorption effect of walls in the solution.

The “pressure” propagation problems were represented by a boundary value problem, where the Helmholtz equation numerical solution allowed to obtain the approximated RMS pressure fields. In a first attempt to validate the developed model, a circular domain with perfectly absorbing boundaries and a point source in the center was solved and compared against the analytical free field solution, retrieving a very good agreement. In a second attempt, an L-shaped room was solved for two different source frequencies with absorbing walls and results were compared against published results for a 3D domain, obtaining a good agreement in the general behavior of the pressure and the intensity field, since similar vortex zones and streamlines are retrieved. The surface impedance formulation for the boundary condition was able to model wall absorption and reflection effects directly, as expected. The BEM is a reliable and efficient tool for solving the noise propagation problem, since no domain discretization is needed. Finally, it could be stated that 2D noise propagation can be accurately modeled through solving Helmholtz Equation using BEM.

8. REFERENCES

- [1] Rossing, Thomas D. “Handbook of Acoustics” Springer Handbooks. 2007.
- [2] López-Pacheco, M.G. Sánchez-Fernández, L. Molina-Lozano, H. “A method for environmental acoustic analysis improvement based on individual evaluation of common sources in urban areas”. *Journal of Science of The Total Environment*, Volumes 468–469, (2014) Pages 724–737.
- [3] Katsikadelis, J. "Boundary Elements Theory and Applications", Elsevier, Oxford, 2002.
- [4] Meissner, M., “Analytical and numerical study of acoustic intensity field in irregularly shaped room”. *Applied Acoustics* 74 (2013). Pages 661–668.
- [5] Møser, M. “Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control”. Springer, Second Edition. 2009.
- [6] Wrobel, L.C., “The Boundary Element Method: Applications in Thermo-Fluids and Acoustics”. Wiley. 2002.

UNDERSTANDING CIRCULATION IN LAKE VALENCIA, VENEZUELA BY A SHALLOW-WATER MODEL

Maira Valera-López

Juan Guevara-Jordan

José Rafael León

maira.valera@ciens.ucv.ve

juanguevarajordan@gmail.com

jose.leon@ciens.ucv.ve

Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela

Ciudad Universitaria, Av. Los Ilustres, Los Chaguaramos, Caracas-Venezuela

Reinaldo García, Iván Saavedra

rgarcia@fiu.edu

Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela,

Ciudad Universitaria.

Abstract. *The objective of this article is to describe circulation patterns in Lake Valencia. The hydrodynamics of episodic events are simulated with a shallow-water model, based on a version of the Saint-Venant equations. This model uses a MacCormack-TVD numerical scheme to solve the continuity and momentum equations simultaneously. Simulation results are analyzed for a variety of wind directions. An analysis of steady circulation distributions is completely developed for Lake Valencia and these results are consistent with the physics of the problem. Although the use of shallow-water models is a fairly standard tool in the study of lake circulation, its application to Lake Valencia is new. Therefore, the circulation patterns developed in this numerical study represent an original contribution.*

Keywords: Saint Venant equation, steady circulation, shallow-water model, Macormack-TVD, circulation patterns.

1. INTRODUCTION

Hydrodynamic modeling in closed water bodies requires a detailed knowledge of the transport processes existing within the body. The geometry of closed water bodies, such as Lake Valencia, reveals that the horizontal length scale is several orders of magnitude greater than the vertical length scale which justifies a two-dimensional simulation using the shallow-water model.

In this paper we develop a hydrodynamic model to define the circulation on Lake Valencia induced by wind. Lake Valencia is endorheic, and covers 350 km². It has a length of 30 km, width of 20 km and a maximum depth of 40 m, which partially justified the two-dimensional simulation using a numerical model based on the Saint Venant equations, [1]. There are several studies on Lake Valencia, particularly on the biological, physical and chemical properties of its waters from observations at different stations. The most representative of these studies are conducted by William Lewis Jr. in the 1970's and 1980's, ([2], [4], [5], [6]), and the extensive report conducted by [3], which states the need for numerical modeling studies in order to better understand the complex processes occurring in the lake. The absence of information and data to feed the numerical models has greatly limited the use of three dimensional simulations. Recently there has been a unique three-dimensional numerical simulation reported by [7]. In this paper they analyze some configurations of movement, dispersal tracers and stratification effects, but their results are not conclusive. Circulation models of Lake Valencia obtained by two-dimensional simulations using shallow-water equations have not been reported.

2. GOVERNING EQUATIONS

The Saint Venant equations model the propagation of disturbances in water and other incompressible fluids. The equations are derived from the principles of conservation of mass and conservation of momentum. The independent variables are the time, t , and two spatial coordinates, x and y . The dependent variables are the fluid height or depth, \mathbf{H} , and the two-dimensional fluid velocity field, u and v . The partial differential equations are:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{H}u}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{H}v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}u}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{H}u^2}{\partial x} + \frac{g}{2} \frac{\partial \mathbf{H}^2}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{H}uv}{\partial y} = g\mathbf{H} \left(-\frac{\partial Z_f}{\partial x} - S_{fx} \right) - \frac{\tau_{sx}}{\rho} + fv + \varepsilon \Delta(\mathbf{H}u) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}v}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{H}uv}{\partial x} + \frac{g}{2} \frac{\partial \mathbf{H}^2}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}v}{\partial y} = g\mathbf{H} \left(-\frac{\partial Z_f}{\partial y} - S_{fy} \right) - \frac{\tau_{sy}}{\rho} + fu + \varepsilon \Delta(\mathbf{H}v) \quad (3)$$

The depth $\mathbf{H} = \mathbf{H}(x, y, t)$ is defined as $\mathbf{H} = \eta + \mathbf{b}$, where $\mathbf{b} = \mathbf{b}(x, y)$ is measured bathymetry positive downward from the geoid and $\eta = \eta(x, y, t)$ is the elevation of the free surface relative to the geoid. The source terms in turn contain the following expressions: where g is gravity, f is the Coriolis parameter, Z_f is the bottom elevation, $\tau_{(.,.)}$ is the wind shear stresses on the surface of the lake, ρ is the density, ε is a viscosity parameter, Δ is the Laplacian and $S_{(f.,.)}$ are the slopes of the power lines dependent Manning roughness coefficient. The Saint Venant equations constitute a nonlinear system whose analytical solution is only possible for very simple cases, so we need to use numerical methods to approximate solutions. The differential equations presented should be treated with an appropriate set of initial and boundary conditions. The initial conditions are the speeds u and v , and the depth \mathbf{H} , throughout the calculation field for the initial time point ($t = 0$): $u(x, y, 0) = u_0(x, y)$, $v(x, y, 0) = v_0(x, y)$, $\mathbf{H}(x, y, 0) = \mathbf{H}_0(x, y)$. The boundary conditions, in this paper, are closed and define the calculation field where the water surface is in contact with the ground. However, in this research, the viscosity parameter is not null, which makes our formulation of the Saint Venant equations slightly parabolic. Consequently, the boundary conditions are $(u, v) = 0$, and $(u, v) \cdot \mathbf{n} = 0$. The combination of the equations, initial and boundary

conditions described produce a mathematically well-posed problem, which was discretized using the finite difference method [1].

3. FINITE DIFFERENCE NUMERICAL SCHEME

The two-dimensional mathematical model used in this paper numerically solves the Saint Venant equations, which is an adaptation of the finite difference scheme for fractional steps developed by Robert W. MacCormack in the early 70's. This algorithm is based on an algorithm type fractional step which allows subdividing a finite difference operator into a series of simple operators. This reduces the volume of the calculation, whilst reaching second order accuracy in time and space. The resulting numerical scheme is explicit, which avoids the cost of evaluating the Jacobian, but imposes constraints on the time step to ensure stability. The stability condition is given by the relationship $dt < \min \left((1/dx^2 + 1/dy^2)^{-1/2} (gH)^{-1/2} \right)$, where dx , dy and dt are the blocks dimensions of the mesh and the simulation time step, respectively. The consistency and stability of the scheme guarantees convergence. The MacCormack explicit scheme (predictor/corrector), in particular, is a finite difference method not focused on problem resolution with moderate intensity shocks [1]. The implementation of the numerical scheme was conducted at the Institute of Fluid Mechanics at the Universidad Central de Venezuela (UCV), and has given rise to a hydrodynamic code which has been used in this research to study the static circulation of Lake Valencia.

4. WIND-INDUCED CIRCULATION IN LAKE VALENCIA

In the specific case of this investigation, several models were developed to generate interpolated bathymetry data associated with different mesh sizes. This information is available in a graphical form for digitization in several references [2]. Figure 1 (a) shows one form of the bathymetry used in this work. The Saint Venant equations require certain parameters which were compiled from average values reported in the literature, [7] except for the wind speeds and directions. We use records pertaining to the Base Mariscal Sucre. For simplicity, as a first approach to the simulation of the movement of Lake Valencia this paper took a weighted average of the collected information. In each simulation, a single constant speed and wind direction around the lake was assigned. These are critical parameters to determine the static circulation of Lake Valencia. A good distribution of these quantities is given by the wind rose shown in Figure 1 (b). The speed in this wind rose is given in km/h and the wind direction is given in terms of the cardinal coordinates. This graph indicates that the direction of the winds in Lake Valencia may vary from the north-west (NW) to the north-north-east (NE), and may take any of the values between in the range that contains the south (S). The wind speed falls between 0-15 km/h. The wind rose has no statistical information, but we can infer that the average magnitude of the wind speed should be approximately 10-11 km/h, which represents around 3 m/s. This speed has been used in the simulation discussed in the following section. A similar comment should be made regarding the wind speed. In addition, for purposes of the simulation, to be discussed below, it is assumed that the wind is south-south-west. This direction is similar to that reported by [7] who partly justify its use.

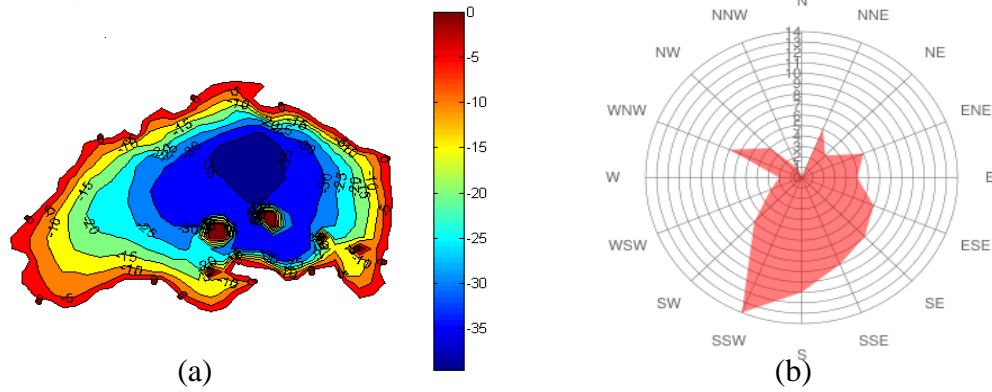


Figure 1. (a) Model bathymetry for Lake Valencia. (b) Wind rose of Lake Valencia.

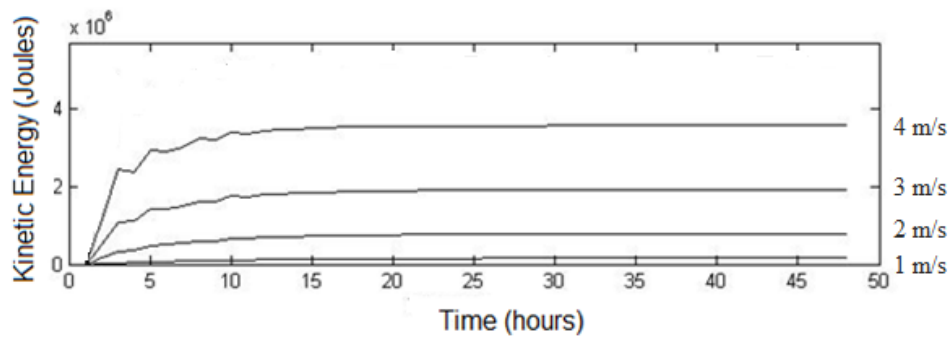


Figure 2. Kinetic energy curve versus time.

The simulations are stopped when the kinetic energy of the lake reaches a steady state and the velocity distribution associated with that state has called static circulation. Figure 2 shows kinetic energy curves versus time for different values of the wind speed. As shown in these graphs, the kinetic energy of the lake always reaches a steady state, assuming that the wind speed is constant. Each curve represents the kinetic energy of Lake Valencia for different constant values of the wind speed. The stability level of kinetic energy is proportional to the magnitude of the wind speed.

5. RESULTS AND DISCUSSION

Figures 3 (a) and (b) are a representation of the velocity field and static circulation figures for Lake Valencia obtained numerically by the shallow-water simulation. It is assumed that the wind speed and direction is 3 m/s south-south-west of the lake throughout the simulation. The analysis of this figure will be made taking into account the magnitude and direction of the currents. From the point of view of magnitude, it is observed that the scale values corresponding to high velocities are distributed almost throughout the coastal region of the lake, except the north-east and south-west. This behavior of the magnitudes of the current velocities is physically consistent with the wind direction. In shallow-water models for lakes, parallel or partially parallel to the wind direction, higher currents occur when there are no other sources of current, which is the case we are simulating. From the simulations, we found effects which could potentially produce tributaries to Lake Valencia. The magnitudes of low current velocities, associated with the colors at the bottom of the scale, are located inside the lake and coastal parts previously

excluding. This behavior is also physically consistent, since the wind must move a large water column due to a greater depth. Around the northeast coast, the low speeds are almost perpendicular to the wind direction. The low speeds around the south-west coast are determined by the current flowing in the opposite direction to the wind inside the lake, which is best shown in Figure 3(b). Standard speeds that are present in this figure are scaled (i.e., calculated from a coarser mesh), however, remain major vortexes.

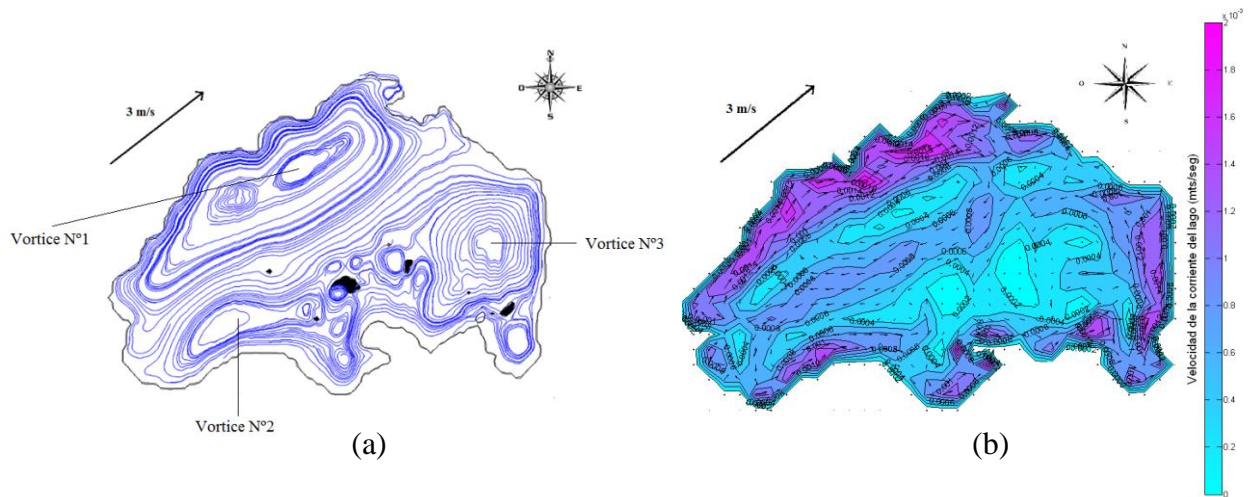


Figure 3. (a) Magnitude of the current velocity in the static circulation of Lake Valencia. (b) Magnitude and velocity field of the flow in the static circulation of Lake Valencia.

The formation of eddies or vortexes in endorheic lakes, whose streams are defined by the wind, is a normal phenomenon. However, it is not always easy to predict the number of vortexes that can be generated. In Figure 3 (a) you can see that there are three major vortexes, all adjacent to a transverse current, flowing north-east to south-west through the interior of the lake. Vortex No. 1 is the largest, and is determined by the current of the north-west and crosses the internal current inside the lake. Vortex No. 2 appears to be generated artificially by Tacarigua's island, which is a large island in Lake Valencia. Vortex No. 3 is generated naturally by currents to the coast east and south-east of the lake, along with the large current flowing transversely inside. This vortex encompasses a small island that, by its size, cannot generate vortexes in the environment. This observation seems to indicate that the inclusion of tiny islands, of which there are approximately twenty-two, would have more effect on static circulation configurations of Lake Valencia. In our research we have systematically determined the static circulations associated with different wind directions, and obtained currents and vortexes that are physically consistent and persistent low mesh refinements, as shown in Figure 4. Our results agree with those reported by [7], especially with regard to the strong currents generated along the coast, parallel or partially parallel to the wind direction. The result presented in [7] does not show the existence of vortexes, constituting the main discrepancy with our results.

6. CONCLUSIONS

This paper introduces a numerical study of the static circulation of Lake Valencia through shallow-water simulator based on the Saint Venant equations. This shows results associated with wind conditions used in other research. Our physical and numerical results are consistent, but do not totally agree with those reported in the three-dimensional simulations. Furthermore, this

raises the need for additional field measurements to validate the numerical results, and properly calibrated hydrodynamic codes could be used to model and predict complex phenomena taking place in the Lake Valencia.

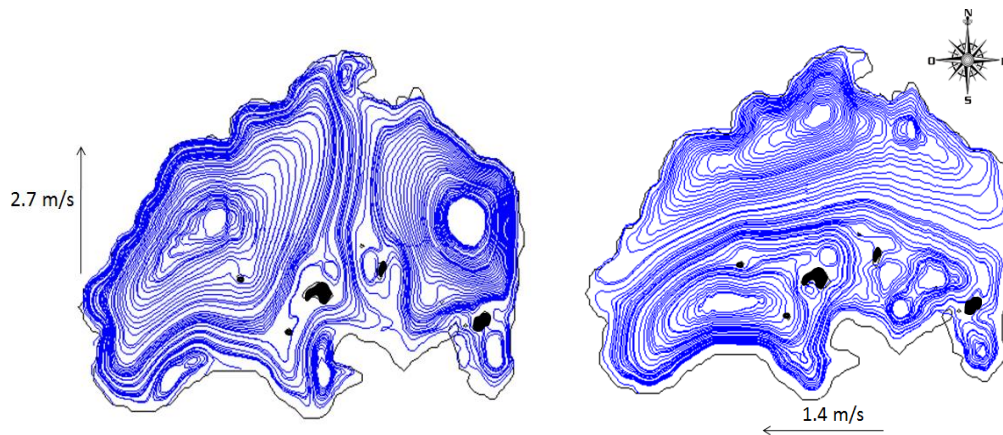


Figure 4. Magnitude of the current in the static circulation of Lake Valencia for different magnitudes and directions of wind.

REFERENCES

- [1].García, R., Kahawita, R.A. (1983), *Numerical solution of the St. Venant equations with the MacCormack finite difference scheme* , International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 6 (5).
- [2].Infante, A., Infante, O., Marquez, M., Lewis Jr., W.M., Weibezahn, F.H., (1979) *Conditions leading to mass mortality of fish and zooplankton in Lake Valencia Venezuela*, Acta Científica Venezolana, vol. 30.
- [3].Kwei Lin, C., (1982). *Limnology and pollution in Lake Valencia, Venezuela*, Report of Great Lakes and Marine Water Center, The University of Michigan.
- [4].Lewis Jr., W.M., (1983). *Temperature, heat, and mixing in Lake Valencia, Venezuela*, Limnology and Oceanography, vol. 28(2).
- [5].Lewis Jr., W.M., (1983). *Water budget of Lake Valencia, Venezuela*, Acta Científica Venezolana, vol. 34.
- [6].Levine, S., Lewis Jr., W.M., (1985). *The horizontal heterogeneity of nitrogen fixations in Lake Valencia, Venezuela*”, *Limnology and Oceanography*, vol. 30(6)
- [7].Torres,C., Larrazabal, G., Castillo, J.E., (2006). En: Simulación y Modelado en Ingeniería y Ciencias, *Understanding three-dimensional circulation in Lake Valencia, Venezuela: A numerical approach*. Cerrolaza M. (ed), Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería.

OBTENCIÓN DEL DIAGRAMA DEL COEFICIENTE DE FLUJO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO PARA UNA VÁLVULA DE GLOBO DE UNA PULGADA

Wilber Rosales

Fernando Gonzalez

Maria Torres

Francisco Caminos

wrosales@unet.edu.ve

fgtrejos@unet.edu.ve

mtorres@unet.edu.ve

lcaminos@unet.edu.ve

Programa de investigación computacional aplicada a termofluidos y estructuras, Universidad Nacional Experimental del Táchira

Av. Universidad, sector paramillo, Táchira-Venezuela

Resumen. *Este estudio se basa en la obtención del diagrama de coeficiente de flujo de forma experimental y numérica, el estudio se divide en dos fases, la primera consiste en el análisis experimental para lo cual se realizó el montaje de un equipo que permite tomar la pérdida de presión de un fluido al atravesar la válvula, y la segunda fase corresponde al modelado computación por medio de un programa CFD, en esta fase se hace necesario aplicar un proceso sistemático dentro del cual se realizó el modelo geométrico, posteriormente se generó el mallado, se establecieron las condiciones de frontera y las características de solución, para luego obtener los resultados, en dicho proceso se observó que el modelo de turbulencia que mejor predice el comportamiento analizado es el $k-\omega$ debido a que se encontró errores en un rango del 4,44 % a 0,34 % con respecto a los resultados experimentales en comparación a los obtenidos con el modelo $k-\varepsilon$ cuyos errores se encuentran entre 7,56 % a 1,75 %*

PALABRAS CLAVES: CFD, Válvula De Globo, Experimental.

1. INTRODUCCIÓN

En la ingeniería mecánica en especial en la rama de termofluidos es de gran importancia el estudio del transporte y regulación del caudal de los fluidos; las válvulas representan los principales dispositivos diseñados para controlar el flujo que circula por una instalación o sistema, pero éstas generan una degradación de la energía en el fluido cuando éste las atraviesa, por lo tanto es de gran relevancia evaluar la eficiencia que presentan las válvulas, el parámetro más significativo que existe para determinar la cantidad de caudal que pasa por una válvula en función de la caída de presión que se genera es el coeficiente de flujo C_v [1].

El presente trabajo consiste en un estudio experimental y numérico del flujo turbulento a través de una válvula de globo, para ello se realizará: el montaje experimental para la medición de pérdidas de carga en función del caudal que atraviesa la válvula y el modelado de la válvula por medio de un programa CFD, para realizar la comparación entre los datos experimental y los simulados.

2. ECUACIONES BÁSICAS

2.1 Ecuación de transporte de Reynolds

La ecuación general de transporte para la masa, cantidad de movimiento, energía, puede ser generalizada en una sola ecuación, la cual representará la conservación de una propiedad en particular. Si se generaliza para la propiedad ϕ , la ecuación general en su forma integral aplicada a cada celda o volumen de control y discretizada tomando en cuenta los diferentes términos que la conforman será [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho \phi dV \right) + \int_A n \cdot (\rho \phi u) dA = \int_A n \cdot (\Gamma \text{ grad } \phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (1)$$

2.2 Coeficiente de flujo

Es un parámetro adimensional que permite evaluar el rendimiento de una válvula ya que representa la relación existente entre el caudal que pasa por una válvula y la caída de presión que se genera [1]

$$C_v = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta P/S}} \quad (2)$$

3. METODOLOGÍA

El presente trabajo se encuentra dividido en dos fases las cuales se describen a continuación:

La primera parte se basa en la construcción de un montaje experimental [4] constituido por la válvula objeto de estudio así como unos piezómetros ubicados en la tubería aguas abajo y aguas arriba del dispositivo, para determinar la caída de presión que se genera al hacer pasar diferentes caudales regulando la apertura de la válvula.

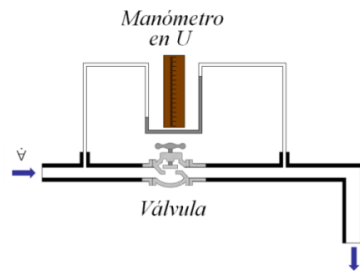


Figura 1 Esquema del montaje experimental

Con respecto al proceso de simulación este se divide en varias etapas dentro de las cuales se encuentran, la construcción de la geometría tridimensional, construcción del mallado, condiciones de frontera, análisis de sensibilidad de malla y resultados.

4. GEOMETRÍA Y MALLADO

La válvula de globo de 1 pulgada utilizada se presenta en la Figura 2 que se muestra a continuación donde se observa un corte longitudinal de la válvula evidenciando la posición del obturador con respecto al asiento de la misma.

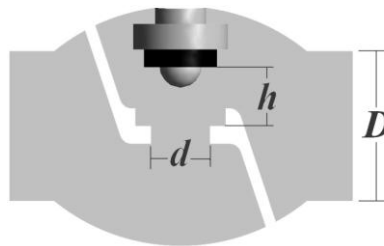


Figura 2. Corte longitudinal de la válvula de globo

Los niveles de apertura se encuentran relacionados a la altura “ h ” y a la relación “ h/d ” tomando como referencia lo planteado en [3] la siguiente tabla se muestra la codificación empleada en la investigación

Tabla 1- Altura “ h ” para cada nivel de apertura y relación “ h/d ”

Apertura	Altura “ h ” en [mm]	relación “ h/d ”
0	10	1,05263158
1	9,17	0,96526316
2	8,33	0,87684211
3	7,5	0,78947368
4	6,67	0,70210526
5	5,83	0,61368421
6	5	0,52631579
7	4,17	0,43894737
8	3,33	0,35052632
9	2,5	0,26315789
10	1,67	0,17578947

A continuación se presenta una tabla con las estadísticas de mallado correspondientes a cada una de las mallas utilizadas, y posteriormente en la Figura 2 se presenta un corte longitudinal del cuerpo de la válvula con el mallado correspondiente.

Tabla 2- Estadísticas de las mallas.

Malla	Estadísticas	Malla	Estadísticas	Malla	Estadísticas
0	Nodos	1	Nodos	2	Nodos
	121597		245318		505273
	elementos		elementos		elementos
	431602		913703		2007707

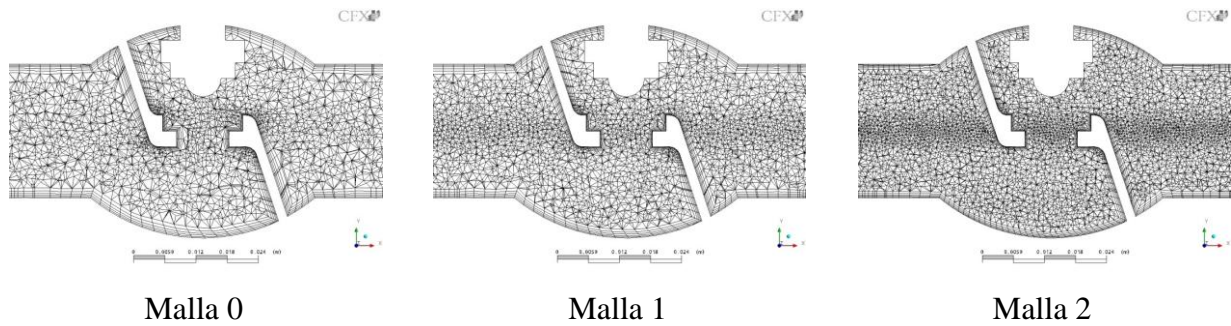


Figura 3. Corte longitudinal para cada una de las mallas

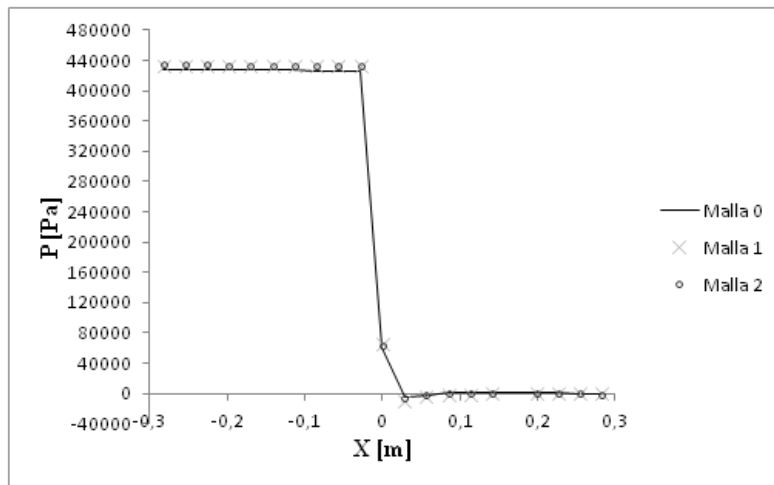


Figura 4. caída de presión a lo largo de la válvula.

La variable seleccionada para realizar el estudio de sensibilidad de malla es la presión debido a que las propiedades que intervienen en el cálculo del coeficiente de flujo son el caudal y la caída de presión, siendo el primero un valor de entrada fijo que se da en la simulación. En la Figura 3 se realiza en una línea que va desde una tubería a 10D antes de la válvula y termina en 10D después de la válvula, donde se puede observar que las mallas 1 y 2 se encuentran prácticamente solapadas, aun cuando la relación de refinamiento en función de la cantidad de elementos es de 2.20, debido a esto se puede considerar que los resultados obtenidos no dependen de la malla utilizada

5. RESULTADOS

Para la parte experimental se utilizaron los valores de caudal y la variación de alturas en los piezómetros con lo que se pudo obtener el coeficiente de resistencia “K” para cada nivel de apertura posteriormente utilizando la ecuación (2) se determinó el coeficiente de flujo de manera experimental.

En el proceso de simulación numérica computacional utilizando el post-procesador se determinó la caída de presión originada para cada nivel de apertura con lo cual se pudo determinar el coeficiente de flujo por medio de la ecuación (2)

A continuación en la tabla 3 se presenta el coeficiente de flujo para el análisis experimental y resultados de la simulación así como su porcentaje de error con respecto al experimental.

Tabla 3- Coeficiente de flujo C_v para análisis experimental y el análisis de simulación

Apertura	Experimental C_v [L/sKpa ^{0.5}]	Modelo k-ε C_v [L/sKpa ^{0.5}]	% de Error	Modelo k-ω C_v [L/sKpa ^{0.5}]	% de Error
0	0,081315553	0,07858055	7,08	0,08191904	1,47
1	0,0784486	0,07564062	7,56	0,07799654	1,17
2	0,07631968	0,07408052	6,14	0,07593733	1,01
3	0,07536402	0,07387945	4,06	0,07517303	0,51
4	0,07441529	0,0729926	3,93	0,07415187	0,60
5	0,07306086	0,07149501	4,42	0,07270276	0,99
6	0,07151281	0,06975975	5,09	0,07096368	1,55
7	0,06905012	0,06763318	4,23	0,06890313	0,43
8	0,05753213	0,05629909	4,43	0,0571521	1,33
9	0,05116691	0,05072531	1,75	0,05107975	0,34
10	0,04148674	0,04056062	4,62	0,04059575	4,44

En la Figura 5 se presenta el comportamiento del coeficiente de flujo C_v para cada nivel de apertura

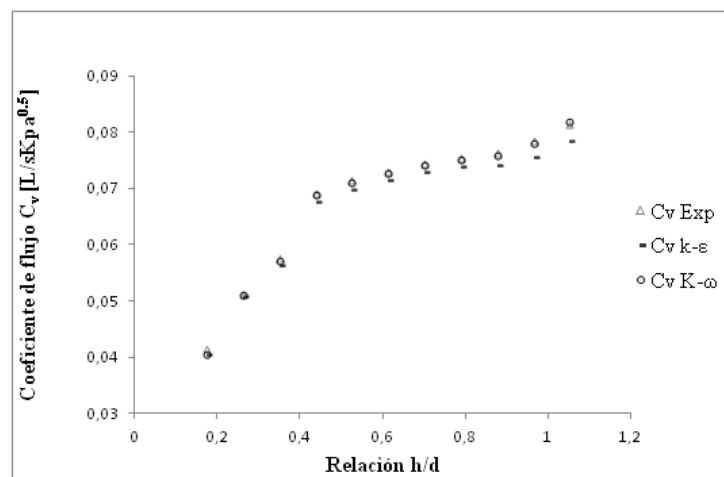


Figura 5. Coeficiente de flujo C_v vs relación h/d

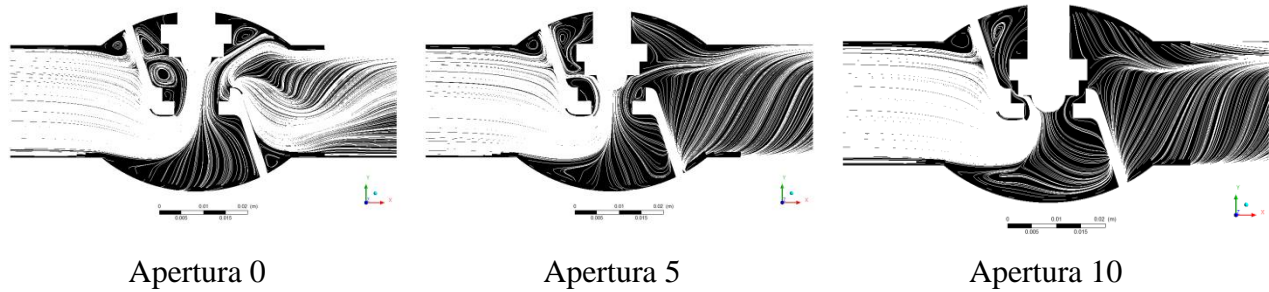


Figura 6. Líneas de corriente en un corte longitudinal para tres niveles de apertura

6. CONCLUSIONES

En la Figura 5 se visualiza que a medida que la válvula es cerrada el valor del coeficiente de flujo disminuye, encontrándose dos zonas la primera constituida por los niveles de aperturas desde la 0 a la 7, donde el coeficiente de flujo varía muy poco. La segunda zona conformada por los niveles de apertura de la 8 a 10, donde se puede apreciar de forma más rápida la disminución del coeficiente

De acuerdo a los resultados encontrados para el coeficiente de flujo según el análisis experimental y simulado, se puede constatar que el modelo que mejor predice el comportamiento para la situación estudiada es el $k-\omega$. Debido a que los errores encontrados son menores que los obtenidos mediante el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$

REFERENCIAS

- [1].Mott, Robert, L. *Mecánica de fluidos*, Sexta edición 2006
- [2].Versteeg, H.,K & Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics*, 1995
- [3].White, Frank, M. *Mecánica de fluidos*, Quinta edición 2004
- [4].Rosales, W. *Obtención del diagrama de coeficiente de flujo a través del análisis experimental y numérico para una válvula de globo de una pulgada*. Tesis de maestría, Universidad nacional experimental del Táchira/ Táchira, 2011.

VALIDACIÓN DE PREDICCIONES NUMÉRICAS DE FLUJO LAMINAR EN MICRO CANALES CON DESLIZAMIENTO EN LAS PAREDES

Nelson Loaiza

cosmeloiza@gmail.com

Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar
Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas-Venezuela.

Janneth García

jmgferrer@usb.ve

Departamento de Termodinámica, Universidad Simón Bolívar
Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas-Venezuela.

Armando Blanco

ajblanco@usb.ve

Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar
Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas-Venezuela.

Resumen. *El transporte de líquidos a bajo número de Reynolds es una situación que se presenta en dispositivos de pequeña escala, conocidos como MEMS (sistemas micro-electro-mecánicos), los cuales son usados en la práctica por industrias farmacéuticas, electrónicas y de petróleo. A la fecha poco se ha modelado la caída de presión alrededor de obstáculos con condición de deslizamiento en las paredes en un régimen laminar. Un estudio previo, considerando flujo en un microcanal con obstáculos, utilizando un paquete comercial, condujo a predicciones numéricas cuya tendencia global no está de acuerdo con lo esperado, y adicionalmente requiere de tiempos de cálculo muy grandes (del orden de días). Con la finalidad de analizar estos casos de obstáculos muy esbeltos, en este estudio se desarrolló un modelo numérico bidimensional para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible, monofásico, utilizando el método de las diferencias finitas, empleando un esquema semi-implícito para la discretización espacial. Un método no-iterativo fue desarrollado para la imposición de la condición de deslizamiento en la pared. Finalmente, se modeló el flujo en un canal con un obstáculo finito, al cual se le modificó el alto y el ancho; y se estudiaron diferentes condiciones de deslizamiento, considerando distintos valores del número de Knudsen ($Kn=0, 0.1, 0.01$ y 0.001), obteniendo caídas de presión en función del deslizamiento cuyas tendencias están en completo acorde con lo físicamente esperado y con lo obtenido utilizando el código comercial.*

Palabras Clave: Microfluídica, Diferencias Finitas, Deslizamiento, MEMS, DFC.

1. INTRODUCCIÓN

Según algunos estudios experimentales se ha determinado que en el flujo en microcanales es posible observar deslizamiento del fluido en la pared [1], p. e. recubriendo las paredes con sustancias hidrofóbicas en el caso de flujo de agua. Este deslizamiento, como en el caso de flujo de gases enrarecidos, se caracteriza por el número de Knudsen. Sin embargo, el uso y mantenimiento de los dispositivos experimentales utilizados con este fin tiene un costo asociado muy elevado, de allí que una alternativa para el análisis de estos sistemas es el uso de herramientas computacionales de DFC (Dinámica de Fluidos Computacional) las cuales permiten simular este fenómeno.

Son muchos los aspectos en los cuales el empleo del método de DFC ha brindado una contribución importante al conocimiento en algún área de la mecánica de fluidos al permitir extender las predicciones aportadas a partir de simulaciones. Por ejemplo, se ha modelado el flujo a bajo número de Reynolds alrededor en un canal bidimensional, con deslizamiento en la pared, utilizando un programa comercial, empleando alrededor de tres días por simulación, obteniendo resultados de caída de presión para diferentes números de Knudsen con tendencias que difieren de lo esperado [2]. Para validar esta tendencia, se desarrolló un programa de simulación de flujo a bajo número de Reynolds, colocando diferentes tipos de obstáculos de proyección ortogonal en el dominio, con deslizamiento en las paredes, usando para ello un método de resolución de segundo orden de precisión tanto temporal como espacial, buscando reducir los tiempos de cálculo e incrementar la precisión de los resultados.

2. MÓDELO NUMÉRICO

Para la evaluación de deslizamiento en las paredes de microcanales se resolvieron las ecuaciones de Navier Stokes para el movimiento de un fluido viscoso e incompresible, en régimen laminar, usando un esquema de diferencias finitas, para resolver el flujo alrededor de un obstáculo con deslizamiento.

2.1 Ecuaciones de Navier Stokes para un fluido incompresible y viscoso

Cuando se considera el flujo de un fluido viscoso, de densidad ρ y viscosidad μ constantes, sobre el cual no actúan ningún tipo de fuerzas externas, las ecuaciones que rigen el movimiento se escriben de la siguiente manera:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} \quad (1)$$

donde u y p representan el campo de velocidades y la presión, respectivamente, además de la ecuación de conservación para un fluido incompresible:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

2.2 Modelo Numérico

Para resolver las ecuaciones de movimiento se utilizó un método semi-implícito el cual consiste en aplicar una separación temporal del término de aceleración local, para un error de

segundo orden temporal [3], con el propósito de brindar una primera aproximación para la presión, calculando en el instante de tiempo t el término de aceleración convectiva, mientras que el término de esfuerzos viscosos se aproxima para un tiempo intermedio *

$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^t}{\Delta t} = \mathbf{u}^t \cdot \nabla \mathbf{u}^t - \nu \nabla^2 \mathbf{u}^* \quad (3)$$

Para resolver finalmente el campo de velocidades en el siguiente intervalo de tiempo $t+\Delta t$

$$\frac{\mathbf{u}^{t+\Delta t} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (4)$$

donde la aproximación de la presión se obtiene de tomar la divergencia en ambos lados de la ecuación (4), para obtener finalmente la ecuación de Poisson, imponiendo que la divergencia de la velocidad en el paso siguiente es cero ($\nabla \cdot \mathbf{u}^{t+\Delta t} = 0$):

$$\nabla^2 p = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}^* \quad (5)$$

2.3 Diferencias Finitas

Usando una malla de proyección ortogonal se resolvieron las ecuaciones de Navier Stokes empleando el método de diferencias finitas para un flujo bidimensional, con tamaño de elemento fijo en cada dirección (Δx y Δy). A continuación se presentan las ecuaciones discretas para la velocidad en cada dirección:

$$\begin{aligned} & -s_x u_{(i-1,j)}^* - s_x u_{(i+1,j)}^* + (1 - 2(s_x + s_y)) u_{(i,j)}^* - s_y u_{(i,j-1)}^* - s_y u_{(i,j+1)}^* \\ & = -\Delta t \left(u_{i,j}^t \left(\frac{u_{(i+1,j)}^t - u_{(i-1,j)}^t}{2\Delta x} - \frac{v_{(i,j+1)}^t - v_{(i,j-1)}^t}{2\Delta y} \right) \right) + u_{(i,j)}^t \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & -s_x v_{(i-1,j)}^* - s_x v_{(i+1,j)}^* + (1 - 2(s_x + s_y)) v_{(i,j)}^* - s_y v_{(i,j-1)}^* - s_y v_{(i,j+1)}^* \\ & = -\Delta t \left(v_{i,j}^t \left(\frac{u_{(i+1,j)}^t - u_{(i-1,j)}^t}{2\Delta x} - \frac{v_{(i,j+1)}^t - v_{(i,j-1)}^t}{2\Delta y} \right) \right) + v_{(i,j)}^t \end{aligned} \quad (7)$$

donde $s_x = \nu \Delta t / \Delta x^2$ y $s_y = \nu \Delta t / \Delta y^2$.

Discretizando la ecuación de Poisson para la presión empleando al igual que para las ecuaciones (6) y (7) diferencias finitas de segundo orden para los términos de presión y de primer orden para los de la divergencia:

$$\frac{p_{(i-1,j)} - 2p_{(i,j)} + p_{(i+1,j)}}{\Delta x^2} + \frac{p_{(i,j-1)} - 2p_{(i,j)} + p_{(i,j+1)}}{\Delta y^2} = \frac{\rho}{\Delta t} \left(\frac{u_{(i+1,j)} - u_{(i-1,j)}}{2\Delta x} - \frac{v_{(i,j+1)} - v_{(i,j-1)}}{2\Delta y} \right)^* \quad (8)$$

2.4 Mallado Escalonado

El mallado utilizado fue de proyección ortogonal y escalonado, donde los componentes escalares (presión) se encuentran en la posición central de la celda, mientras que las componentes vectoriales de la velocidad (u,v) se encuentran en las caras de la celda, tal como muestra la figura 1.

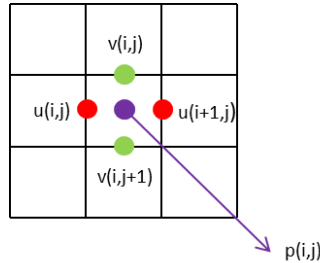


Figura 1- Detalle de la malla escalonada

Se empleó este método debido a la reducción de falsas oscilaciones de presión [4], que surgen cuando se usan diferencias centrales tanto para la divergencia de gradiente de velocidad y presión en un mismo punto.

2.5 Geometría y Condiciones de Borde

El análisis de flujo se realizó en un canal de dimensiones constantes de largo ($L=10$) y ancho ($w=0.5$); y constante de ancho ($a=0.1 w$) y largo variable ($b=0.1 w$ a $0.9 w$) del obstáculo, como se presenta en la figura 2.

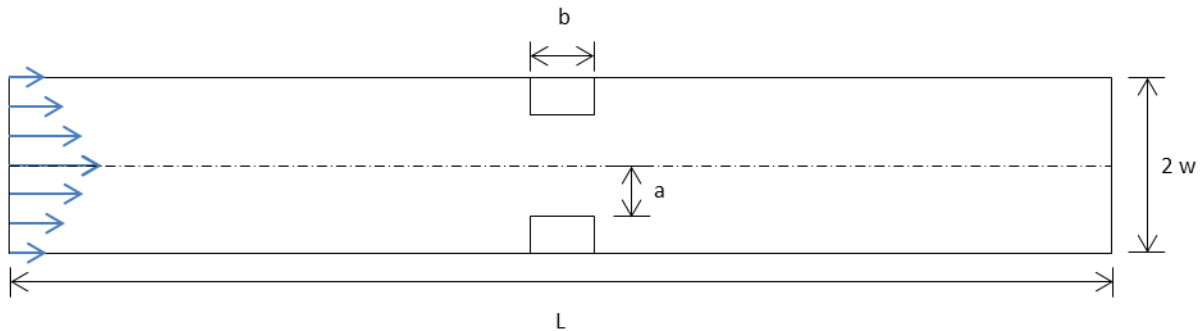


Figura 2- Geometría de un canal con obstáculos

Aprovechando la simetría en torno al eje central del canal, el dominio de cálculo se simplificó, como se muestra en la figura 3. Las condiciones de bordes impuestas al dominio consistieron en un perfil de velocidad parabólico a la entrada, correspondiente a la solución teórica de flujo en un canal con deslizamiento [5], simetría en el eje del canal, salida en el extremo derecho, y paredes con deslizamiento para las regiones restantes.

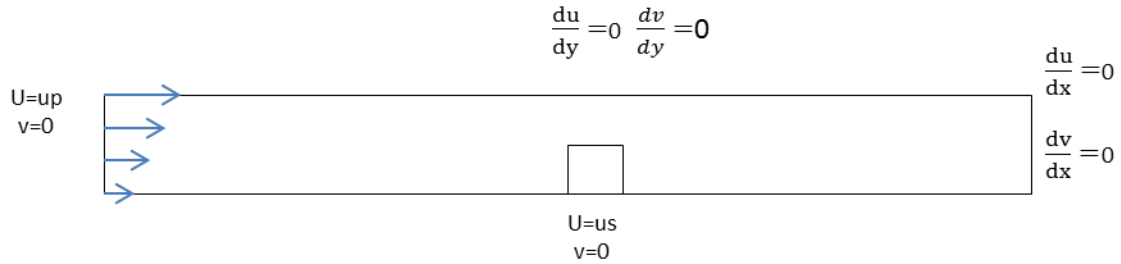


Figura 3- Geometría de las condiciones de borde del canal

La condición de deslizamiento se impuso a partir de la discretización de [6]

$$u = \left[\frac{2}{d} - 1 \right] Kn w \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=\pm h} \quad (9)$$

en la pared, donde d es el coeficiente de arreglo de las fuerzas tangenciales, y Kn el número de Knudsen que varía de 0 a 0.1. La discretización de esta ecuación se realizó utilizando un esquema no iterativo, descrito en Loaiza [6].

3 RESULTADOS

Para la evaluación de resultados se calculó y comparó la variable de Longitud Adicional (LA) la cual representa la longitud requerida para obtener la misma caída de presión en un canal sin obstáculo, para distintos valores del número de Knudsen. Las figuras 4 y 5 presentan la variación de LA con el ancho del obstáculo, para un alto del mismo fijo.

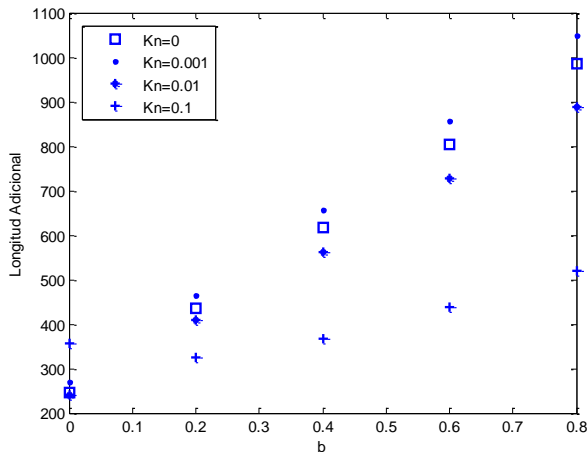


Figura 4- Longitud Adicional del para una Altura Fija $a=0.1 w$ (Programa Comercial)

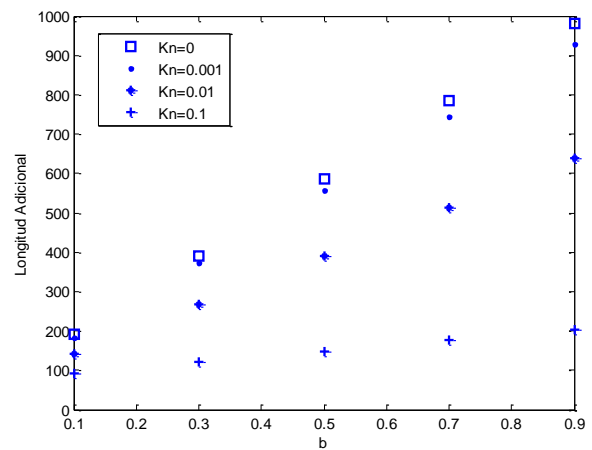


Figura 5- Longitud Adicional del para una Altura Fija $a=0.1 w$ (este modelo)

Como es de esperar, los resultados numéricos del modelo propuesto muestran que a medida que disminuye el número de Knudsen, disminuye LA, debido al incremento del deslizamiento.

Como se observa en los resultados obtenidos [2] utilizando un programa comercial, en los cuales no se observa la misma tendencia, son, en consecuencia, errores de tipo numérico, probablemente debido a imprecisiones en la implementación de la condición de no deslizamiento. El modelo aquí presentado, logra representar correctamente la tendencia de la caída de presión en un canal alrededor de un obstáculo. Adicionalmente se puede destacar que los tiempos de cálculos comparados entre las simulaciones realizadas con el programa comercial y las realizadas usando un código propio en esta investigación muestran una reducción de aproximadamente un 90%, pasando de días a horas en los tiempos de cálculo.

4 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que se logró la correcta construcción de un modelo numérico para modelar flujo monofásico a bajo número de Reynolds con deslizamiento en la pared.

La caída de presión de un flujo alrededor de obstáculos con deslizamiento, aumenta a medida que disminuye número de Knudsen. Existe una relación proporcional del incremento de la longitud adicional a medida que disminuye el deslizamiento, lo cual demuestra que existe una relación entre el incremento de la caída de presión y la longitud necesaria para lograrlo.

El uso de métodos directos para la resolución de ecuaciones elípticas en dominios de 2D, si bien resulta difícil de aplicar ofrece una gran ventaja en cuanto a tiempo de cálculo empleado, tomando en consideración la gran cantidad de iteraciones a realizar en un problema como este.

Sobre los tiempos estimados de cálculo se tiene que al ser comparados con los obtenidos por (Ferreira *et al.*, 2011), son menores en alrededor de un 90%.

REFERENCIAS

1. Tretheway, D. C., Liu, X., & Meinhart, C. D. Analysis of Slip Flow in Microchannels. *Department of Mechanical Engineering. University of California, 2001*
2. Ferreira, A., Campello, M., & Onsalo, B. *Simulación de Flujos en Microcanales*. Universidad Simón Bolívar, 2011
3. Li, J., & Renardy, Y. *Numerical Study of Flows of Two Immiscible Liquids at Low Reynolds Number*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000
4. Harlow, F. H., & Welch, J. E. *Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface*. *Phys. Fluids*, 1965
5. Oosthuizen, P. H. y Carscallen, W. E. *Compressible Fluid Flow*, Ed. McGrawHill, 1997.
6. Loaiza, N. *Estudio de flujo laminar en micro canales con deslizamiento en la pared mediante DFC*. Universidad Simón Bolívar, 2012.

Selfconsistent algorithm for the kinetic of the $A + B \xrightarrow{k_0} C$ reaction

Miguel Rodríguez

merodrig@gmail.com

Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas, Universidad de Oriente, Av. Universidad, Cerro del Medio, Cumaná-Venezuela

José Bastardo

elderbastardom@gmail.com

Departamento de Física, Universidad de Oriente, Av. Universidad, Cerro Colorado, Cumaná-Venezuela

Abstract.

Classical chemical kinetics is based on mass-action law, which is not good at describing heterogeneous media. To overcome such limitation it has been frequent, in the literature, to use Metropolis Monte Carlo. On one side Metropolis has been successful in simulating 2D and 3D heterogeneous mixtures, leading to the discovery of fractal like kinetics and anomalous diffusion. On the other side, Metropolis has its own drawbacks like long simulation times. Here we present a novel application of the Gillespie stochastic method to study the kinetic of a diffusion limited $A + B \xrightarrow{k_0} C$ reaction. Assuming a fractal type kinetic, and using a lattice gas spatial description, we implemented a selfconsistent algorithm capable of capturing the effect of molecular obstruction at, in principle, low computational cost.

Key words: Obstructed, Kinetics, Stochastic, Selfconsistent Algorithm, Selfsimilarity

1 INTRODUCTION

A common theme in the kinetic of reactions is to employ Metropolis Monte Carlo simulations on a lattice. This technique has the issue of frequently rejected trials resulting in extended simulation times. Another downside of Metropolis Monte Carlo is that time is not defined. This method is strictly appropriate to study equilibrium states, where time plays no role as global properties fluctuate about some macroscopic average. A frequent workaround is to associate some arbitrary time step to each trial, regardless of its success, allowing for some sort of time progression.

A physically correct method of accounting for time progression was formalized by Gillespie [1] in the so-called Stochastic Simulation Algorithm (SSA). SSA is based on the probability $P(\tau, j)d\tau$ that given $X(t) = x$, the next reaction in the system will occur in the infinitesimal time interval

$[t + \tau, t + \tau + d\tau)$, and will be a R_j reaction,

$$P(\tau, j)d\tau = a_j(x)e^{-\sum_j a_j(x)\tau} d\tau, \quad (1)$$

where a_j is known as the propensity of the reaction. When a_j is set to follow the assumption that every pair of molecules react with the same probability at a given time, the stochastic method reproduces mass action law. For instance, in a bi-molecular reaction $A + B \xrightarrow{k_0} C$ with $n_{A(B)}$ molecules A(B), the propensity a_{A+B} is proportional to the number of possible combinations of pairs of reactants, i.e, $a_{A+B} \propto n_A n_B$. In this case the stochastic method predicts n_A will follow mass action law formulation. This approximation works best in dilute, well stirred chemical mixtures. The description of heterogeneous mixtures requires to go beyond uniform propensities.

Metropolis Monte Carlos simulations were conducted by Kopelman et al. [2] [3] to describe the kinetic of heterogeneous media modeled as a lattice having a fractal-like distribution of accesible sites. Kopelman theory was called fractal kinetic and its central idea was that the rate constant k_0 , in the presence of heterogeneity becomes time dependent, i.e. $k \sim k_0 t^{-q}$. Such dependence states the fact that reactants spent a larger time in-between collisions, due to a more constricted diffusion space. A posterior paper by Berry [4], also using Metropolis simulations, reported a similar $k(t)$ in enzyme-substrate reactions common in cellular media. Berry inferred the dependence of q with the ratio of non accessible sites to the total system size for a $2D$ lattice with a varying degree of obstruction.

In this work we modify Gillespie formulation so it can be used to describe the kinetic of obstructed media. This is done by using the fractal-like propensity coupled with a fast local scanning for heterogeneity. The improved algorithm is expected to be faster than regular Metropolis based ones while reproducing the overall kinetic.

2 THEORY

If n_A and n_B are the number of molecules A and B respectively, mass action law states that the kinetic of reaction $A + B \xrightarrow{k_0} C$ is given by the deterministic equation

$$\frac{dn_A}{dt} = -k_0 n_A n_B = -k_0 n^2 \quad (2)$$

whose solution is $n = n_A = n_B = n_0 (1 + t/(1/k_0 n_0))^{-1}$ with $n_A(0) = n_B(0) = n_0$. From the works of Kopelman [2], Berry [4] it is known that in the presence of a fixed amount of obstacles Eq. (2) changes to

$$\frac{dn}{dt} = -k_q(t)n^2. \quad (3)$$

where the rate constant now decays with a power law dependence $k_q(t) \sim k_0 t^{-q}$, for large enough t . Following Schnell and Turner's suggestion [5] we use a more general form for $k_q(t)$ which does not diverge at $t = 0$,

$$k_q(t) = k_0 \left(1 + \frac{t}{\varepsilon_q}\right)^{-(1-q)} \quad (4)$$

Note that Eq. (4) is similar to Kopelman's $k(t)$, $\sim t^{-(1-q)}$, in the limit of $t/\varepsilon_q \gg 1$. It also recovers the homogeneous limit ($k \sim k_0 + O(1)$) when $t/\varepsilon_q \ll 1$. The time-scale ε_q is still unknown

at this point, however it can be said that ε_q separates the regime dominated by obstacles from the early, roughly homogeneous one. If the number of molecules depends on time as

$$n(t) = n_0 \left(1 + \frac{t}{\varepsilon_q}\right)^{-q}, \quad (5)$$

it is easy to verify Eq. 4. It is also possible to find the time scale demanding Eq. (3) to be valid, $\varepsilon_q \equiv q/k_0 n_0$. When $q = 1$ the kinetic of a classical homogeneous mixture is recovered.

2.1 Dependence on the global distribution of obstacles

When studying the physics of an obstructed mixture modeled as a lattice, the singular parameter affecting the overall kinetic is the fraction of obstacles Θ , defined as the number of non accessible sites over the total size of the system. The exponent q in Eq. (5) depends on Θ as was shown by Berry [4]. From percolation theory is known that there is a Θ_c , above which reactants are confined to isolated pockets and the kinetic slows down to negligible levels. Θ_c is then, a maximum value for the fraction of sites. For $2D$ square lattices such critical value is about 0.4.

3 MODEL

Let us graphically represent molecule A by a red colored square and molecule B by a blue one. Obstacles are black and empty spaces are available sites. In Fig. 1 is sketched a distribution of

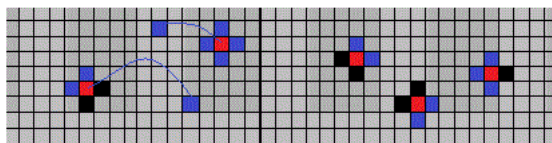


Figure 1: 2D representation of a heterogeneous $A + B \xrightarrow{k_0} C$ mixture. Note that red particles have their vicinity highlighted.

molecules in a heterogeneous mixture. It is possible to broadly separate reactions based on the distribution of obstacles around the reactants:

1. A red particle's neighborhood is populated by reaction partners. The reaction with a blue molecule occurs with propensity consistent with mass action law.
2. A red particle has obstacles around making the diffusion towards a blue particle effectively slower. The propensity should reflect the anomalous diffusion due to the current level of obstruction.

Our model is built around above considerations. The premise is simple: a molecule surrounded by other reactive ones is likely to react faster than another with nearby obstacles impeding its diffusion. Our aim is to map the global exponent q defined above onto individual reactions. We then assume there exists a mapping $q \rightarrow q_i$ such that Eq. (3)-(5) are valid for every single reaction

$A_i + B_i \xrightarrow{k_0} C_i$. In principle $q_i = q(\theta_i)$ for $0 < \theta_i < \theta_m$, where θ_i is the local fraction of obstacles seen from the i -th reactant. θ_m is the maximum fraction size in the locality. In this work, we assume a simple linear dependence on the normalized local fraction of obstacles, $q_i = \theta_i/\theta_m$. We show in the next section the actual application of this assumption.

3.1 Computational method

The system is set as a 2D squared lattice-gas with periodic boundary conditions. Initially, two arrays A and B, each with n_0 elements, are set to contain random positions over the lattice. A fraction Θ of the grid is made inaccessible. The system will follow Gillespie algorithm rules: a reaction occurs after an interval τ , and τ is drawn from Eq. (1). At an instant t the following algorithm determines time progression:

Algorithm 1 Selfconsistent Stochastic Algorithm

```

1:  $\nu \leftarrow 1$  ▷ Initializing selfconsistent loop
2: procedure OBSTRUCTEDSSA( $A, B$ )
3:    $n \leftarrow \text{GetLenght}(A)$ 
4:   while  $n \geq N_{\min}$  do ▷ Stay in the loop until number of particles is low enough
5:      $i \leftarrow \text{RandomInteger}()$  ▷ Choose a random couple of molecules  $A_i, B_i$ .
6:      $\varepsilon \leftarrow \nu/(k_0 n_0)$  ▷ Obtain the time scale
7:      $q_i \leftarrow q(\theta_i)$  ▷ Estimate the level of local obstruction  $\theta_i$  and calculate  $q_i$ 
8:      $a_0 \leftarrow k_0 n^2 (1 + t/\varepsilon)^{-q_i}$  ▷ Calculate the propensity
9:      $r \leftarrow \text{RandomFloat}()$  ▷ Get a random number  $0 < r < 1$ 
10:     $\tau \leftarrow -(\ln r)/a_0$  ▷ Calculate the time of reaction
11:     $t \leftarrow t + \tau; n \leftarrow n - 1$  ▷ Update time and number of molecules
12:     $\nu \leftarrow (\ln n_0 - \ln(n + 1)) / \ln(t/\varepsilon + 1)$  ▷ Update  $\nu$  to approach selfconsistency
13:  end while
14:  return  $\nu, t$  ▷  $\nu, t$  would be arrays
15: end procedure

```

4 RESULTS

To probe the effectiveness of the algorithm, we carried out three runs with different degrees of obstruction. Three cases were studied: the fraction of obstacles $\Theta = 0$ in order to simulate a homogeneous mixture, then $\Theta = 0.25$, or a quarter of the total available sites are made inaccessible, and finally $\Theta = 0.4$ which is approximately the value for the critical percolative Θ in a 2D square grid. The lattice is a square of size $L = 128$. Each specie occupies a quarter of the sites ($n_0 = 4096$). The rate constant k_0 was set to $10^{-3}[\text{time}]^{-1}$ for a convenient time interval. $\nu = 1$ was chosen as a reasonable value to initialize the selfconsistent loop.

Let us start examining the behavior of the local exponent q_i . The system's overall kinetic will depend on many reactions with different q_i , so the surge of a well defined time evolution law must correspond to an emergent complex process. In Fig. 2 we show a time series of q_i when $\Theta = 0.25$. Both time series are similar regardless the chosen interval. The q_i -Frequency plots show that reactions with the same q_i , occurring within the selected time crops are distributed in similar proportion. It is remarkable that the independence of scale found above, is just the expression of the fractal nature of the spatial distribution of obstacles, and so it does not depend on any model specific assumption. The question now is what is the effect of above results on the kinetic? To

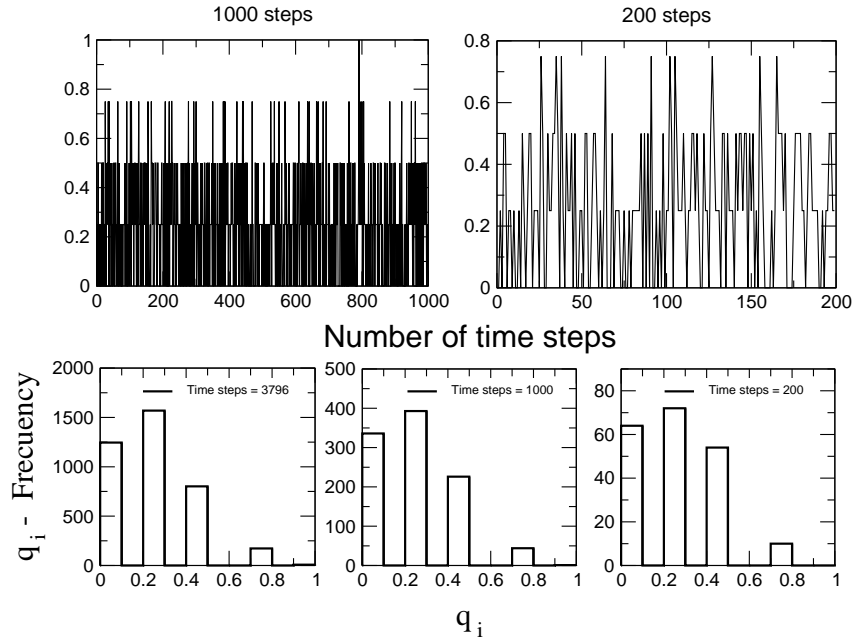


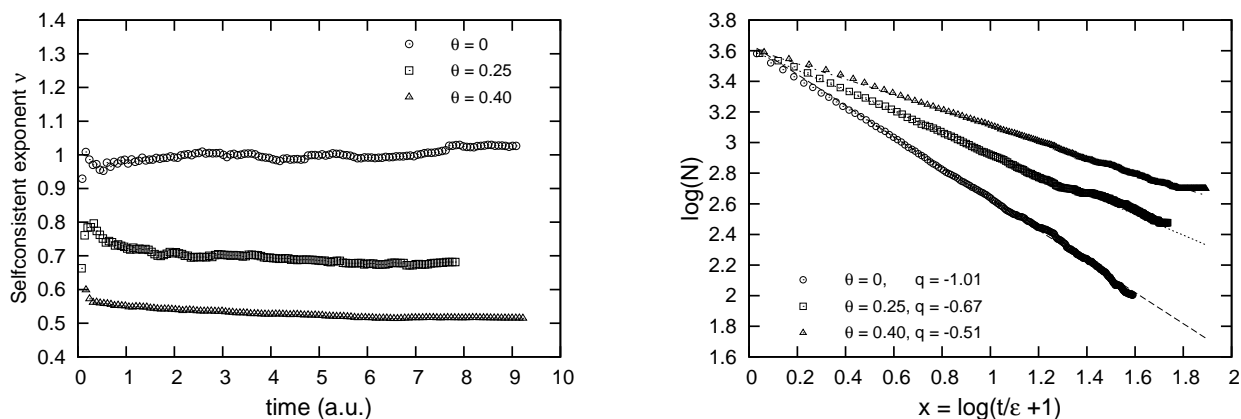
Figure 2: Top: Time series of q_i with $\Theta = 0.25$ for a single realization of $A + B \xrightarrow{k_0} C$. A single realization is needed in order to retrieve non averaged raw data. Bottom: Occurrence of q_i during the selected time interval.

answer this we need in first place to verify the method's selfconsistency and resulting time scales ε . It makes sense to expect that the algorithm is selfconsistent when ν sets itself roughly equal to the global exponent q defined in Eq. (5).

Figure 3a shows the time evolution of ν . Past rapid fluctuations, at early stages, ν converges to a clear value in all cases. For instance, the selfconsistent exponent when $\Theta = 0.25$ is close to 0.7. A similar value is found when fitting the corresponding data in Fig. 3b. Our method is then capable of predicting that increasing levels of obstruction translate in shorter times to transit towards an obstruction dominated diffusion.

The number of A (or B) as a function of time is shown in Fig. 3b. Each curve is plotted against $\log(1 + t/\varepsilon_\nu)$. Equation (5) was used to fit the data in Fig. 3b with q as unique free parameter. When $\Theta = 0$ the slope of the fitting curve is $q \approx 1.01$ which is a good approximation to the classical result ($q = 1$). This means that in situations where the system is not populated by obstacles the algorithm recovers mass action law. When $\Theta = 0.25$ there is a shift in the slope down to $q = 0.67$, evidencing the algorithm is capable of accounting for the presence of obstacles. The last curve ($\Theta = 0.4$) decays slower than the previous ones. This is expected as obstruction levels are larger.

It is known that scale-free phenomena generates power laws, Fig. 3b is an instance of this. Any time interval in our simulations (for a given Θ) is characterized by a similar ratio of occurrence of local exponents q_i . A physical variable depending on the occurrence of q_i in such interval will have the same behaviour through the whole simulation time. For instance, the number of molecules follows Eq. (5) with a well defined exponent q .



(a) Time evolution of ν . Every curve starts at $\nu = 1$ as the homogenous case. ν is related to the time scale by $\varepsilon_\nu = \nu/(k_0 n_0)$.

(b) Time evolution of number of A (B). Every curve have the power law dependence defined by Eq. (5) but with a different exponent.

Figure 3: Different curves correspond to different degrees of obstruction Θ . The selfconsistency condition is reached promptly so $\nu \approx q$ in each case.

5 CONCLUSIONS

We conclude this algorithm is a plausible way to account for heterogeneity in diffusion limited systems. It does so by using fractal - like kinetics, which is valid in a number of reactions as the one discussed here. Individual aspects worth being single out are the selfconsistent loop, which rapidly converges to the proper exponent. Also the scanning of the neighborhood in order to approximate the local level of obstruction, proved to be useful as a time saving computational technique. The main feature of our approach is that it provides a simple picture of the local kinetic. Within this picture the frequency of occurrence of a reaction, with a given propensity, correlates with the obstruction in the neighborhood of the reactants.

REFERENCES

- [1] GILLESPI, D. T., Exact Stochastic Simulation of Coupled Chemical Reactions. *The Journal of Physical Chemistry*, 81, pp. 2340 - 2361, 1977.
- [2] KOPELMAN, R., Fractal reaction kinetics. *Science*, 241, pp. 1620-1626, 1988.
- [3] ARGYRAKIS, P., KOPELMAN, R. & LINDENBERG, K., Diffusion-limited binary reactions: the hierarchy of nonclassical regimes for random initial conditions. *Chemical Physics*, 177, pp. 693-707, 1993.
- [4] BERRY, H., Monte carlo simulations of enzyme reactions in two dimension: fractal kinetics and spatial segregation. *Biophysical Journal*, 83, pp. 1891- 1901, 2002.
- [5] SCHNELL, S. & TURNER, T. E., Reaction kinetics in intracellular environments with macromolecular crowding: simulations and rate laws. *Progress in Biophysics & Molecular Biology*, 85, pp. 235 - 260, 2004.

DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE UNA VÁLVULA DE GLOBO MEDIANTE TÉCNICAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Jesús Ramírez

Juan Colmenares

Fernando González

Alberto Sarcos

jaramirez@unet.edu.ve

jccolmen@unet.edu.ve

fgtrejos@unet.edu.ve

asarcos@unet.edu.ve

Laboratorio de simulación computacional aplicada a termofluidos y estructuras, Universidad Nacional Experimental del Táchira.

Av. Universidad, Sector Paramillo, San Cristóbal-Venezuela

Resumen. *Para el estudio se hizo uso de una metodología descriptiva utilizando un diseño documental y de campo. Se utilizó la metodología de simulación numérica, por medio de un Software comercial de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD); el cual utiliza las ecuaciones de Navier Stokes promediadas con la definición del promedio de Reynolds (Ecuaciones RANS). En la interacción de las partículas sólidas con la fase de transporte y viceversa se utilizó un modelo de doble acople (two way coupled), y se utilizó el modelo de turbulencia $k-\omega$ estándar. La simulación se ejecutó en estado estacionario. El tamaño de partículas a utilizar se obtuvo a partir de los datos de una prueba experimental realizada previamente por los autores. Se realizó un análisis de sensibilidad de malla y una vez obtenida la malla idónea se realizó la simulación para obtener la tasa de erosión en kilogramos por segundo sobre la superficie de pared del cuerpo y obturador de la válvula, dicho valor fue comparado con el obtenido experimentalmente, obteniéndose resultados cercanos. Finalmente se calculó la vida útil de la válvula en base a algunos criterios de funcionamiento establecidos por los autores.*

Palabras claves: Simulación numérica, Malla, Tasa de erosión, Vida útil.

1. INTRODUCCION

Hoy en día en gran diversidad de procesos el transporte de partículas sólidas de un sitio a otro se ha hecho imprescindible para obtener procesos productivos de alta calidad y eficiencia. En la industria cementera, petrolera, alimenticia, química, se presenta este

fenómeno, el cual debe ser estudiado y analizado por los ingenieros a fin de garantizar un proceso eficiente y sin peligros a la seguridad industrial. Muchas son las técnicas que se han utilizado para estudiar y determinar cuáles son los efectos erosivos que genera este tipo de transporte de partículas sobre los elementos o equipos que las mueven. Desde estudios numéricos, pasando por análisis experimentales, hasta realizar análisis de fallas luego de algún reemplazo, han servido para conocer el fenómeno erosivo que genera el flujo turbulento de partículas sólidas. Diversos modelos de erosión se han planteado con el paso del tiempo, siendo unos más precisos que otros y algunos más complejos que otros. Con el desarrollo de dichos modelos se han generado nuevas técnicas que permiten predecir el comportamiento de las partículas dentro de los elementos que las transportan.

Desde el diseño de sistemas de transporte, hasta la planificación de actividades de mantenimiento, es de suma importancia conocer a profundidad el fenómeno en cuestión. Hoy en día los avances de la tecnología han permitido utilizar nuevas herramientas que permiten generar soluciones a los problemas que acarrea los efectos erosivos dentro de cada uno de los componentes. Específicamente en el área de dinámica de fluidos computacional, es posible resolver las ecuaciones de flujo dentro de una región de interés, con condiciones específicas en las fronteras [1].

En vista de lo anteriormente expuesto, el presente trabajo de investigación pretende utilizar las técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) por sus siglas en inglés, para estudiar el comportamiento de una válvula de globo de ½ pulgada, sometida a efectos erosivos debido al paso de un flujo turbulento cargado de partículas sólidas.

2. BASES TEORICAS

Movimiento de las partículas

Para modelar el movimiento de las partículas se integra el balance de fuerzas sobre la partícula escrito sobre un sistema de referencia Langragniano. El balance de fuerzas involucra la inercia de la partícula y las fuerzas que actúan sobre la misma, esto se puede escribir, por ejemplo para la dirección “x”, como muestra a continuación:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

Donde F_x es un término de aceleración adicional; $F_D(u - u_p)$ es la fuerza de arrastre por unidad de masa de partícula, y

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D Re}{24} \quad (2)$$

Donde u es la velocidad de la fase continua, u_p es la velocidad de la partícula, μ es la viscosidad del fluido, ρ es la densidad del fluido, ρ_p la densidad de la partícula, y d_p el diámetro de la partícula. Re es el número de Reynolds relativo definido como:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3)$$

El coeficiente de arrastre C_D se calcula según la ecuación:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (4)$$

Donde los valores de a_1 , a_2 y a_3 se toman de los trabajos de [2].

Modelo de erosión utilizado

Para el modelado del efecto de las partículas presentes en el fluido sobre la tubería, el software FLUENT presenta la siguiente ecuación:

$$R_{erosión} = \sum_{p=1}^{N_{particulas}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{cara}} \quad (5)$$

En donde $R_{erosión}$ corresponde a la tasa de erosión medida en kilogramos de material removido por cada unidad de área por unidad de tiempo; el cual es la variable a determinar. \dot{m}_p es el flujo másico de partículas en la tubería, $C(d_p)$ es una función del diámetro de las partículas, α es el ángulo de la trayectoria de la partícula a impactar con la pared, $f(\alpha)$ es una función del ángulo de impacto α , v es la velocidad relativa de la partícula, $b(v)$ es una función de la velocidad relativa de la partícula, y A_{cara} es el área de la cara de la celda en la pared. Se consideran en este mismo programa los siguientes valores por defecto: $C=0$, $f=0$ y $b=0$; sin embargo, [3], sugieren para el acero al carbono los siguientes: $C=1,8e-9$, $f=1$ y $b=0$.

3. GEOMETRIA A SIMULAR

La simulación numérica se va a realizar para una válvula de globo de ½" elaborada en acero al carbono A105N con 800 Libras de presión máxima. Para la elaboración del modelo se hizo uso de un software ACAD comercial, que permitió desarrollar la geometría con las características internas de la válvula en tamaño real en (mm), por lo que no fue necesario utilizar factor de escala. En las figuras (1,2 y 3), se muestra la geometría que se utiliza en la simulación.



Figura 1- Válvula de globo a simular.

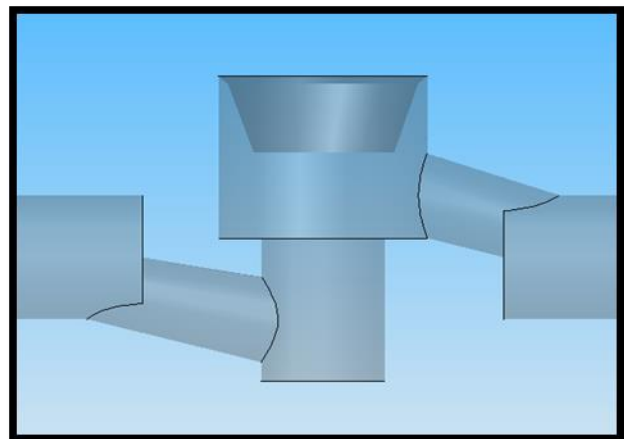


Figura 2- Posición interna del obturador.

4. CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA LA SIMULACIÓN

Para la resolución de la simulación del fenómeno planteado, se asumen como validas las siguientes consideraciones:

- Se omite la interacción partícula – partícula (Two Way coupling)
- Todas las partículas son esféricas e indestructibles
- No existen reacciones químicas dentro del dominio computacional
- No se considera la disminución del espesor del material debido a efectos erosivos
- Se consideran los cambios de velocidad y aceleración de las partículas sobre el fluido y viceversa
- No se consideran efectos de transferencia de calor
- Las partículas cambian su trayectoria debido al efecto de la fase continua sobre ellas.

5. CONDICIONES DE BORDE

Tabla 1. Condiciones de borde

Región Geométrica	Condición	Condición matemática o valor numérico
Pared interna de la válvula	Wall	
Entrada a la válvula	Velocity inlet (Uniforme)	
Salida del codo	Outflow	No aplica
Entrada del codo	Injections	Densidad = 2454 kg/m ³
		Flujo másico = 0,13 kg/s
		Velocidad = 5,269 m/s
Parámetros relacionados con el material de la pared de la válvula perteneciente al modelo de erosión utilizado por el Software.	Función de ángulo de impacto	[3]
	Función de diámetro de partículas	[3]
	Exponente de velocidad	[3]

6. SIMULACIÓN FINAL

Para realizar el proceso de simulación se realizó un análisis de sensibilidad de malla y un análisis de longitud de descarga, a fin de obtener un dominio computacional y una malla independiente. En este sentido se trabajó con una malla tetraédrica no estructurada de 2.139.903 elementos y una longitud de descarga de 130 mm. Una vez obtenido el tipo de malla a utilizar y habiendo optimizado la longitud de descarga, se procede a realizar la simulación final del fenómeno. Para esto se decide introducir las partículas al dominio computacional directamente desde la entrada de la válvula de globo, lo cual no afecta los resultados obtenidos según lo planteado por [4]. Esta modificación hace que el número de elementos de la malla disminuya considerablemente, por lo que se hace factible realizar una

refinación de malla en el cuerpo y obturador de la válvula a fin de lograr resultados más precisos.

Los datos finales de simulación son los siguientes:

- Ejecución en Fluent 13.0
- Modelo de viscosidad $k - \omega$ (Estándar)
- Diámetro de partículas: 0,52 mm
- Flujo másico de partículas: 0,0089 kg/s
- Velocidad de entrada del flujo continuo: 3 m/s
- Solución en paralelo en un ordenador con procesador Intel (R) Core (TM) i5 – 2410M, CPU @ 2.30 GHz, 4 GB de memoria RAM instalada y 483 GB de disco duro.
- Introducción de las propiedades de la fase discreta: Densidad de 2540 kg/m³
- Se considera la fase continua como agua en estado líquido a temperatura ambiente.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

Una vez culminado el proceso de simulación se obtuvo una tasa de erosión promedio de 2,21438E-09 kg/seg sobre el cuerpo y el obturador de la válvula. Si se compara este resultado con la masa removida a la válvula experimentalmente, mediante pruebas realizadas previamente por los autores en el Laboratorio de Mecánica de fluidos de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, se obtiene un error de 14,31 %. Con dicho valor se procede a calcular la vida útil de la misma, siguiendo tres enfoques diferentes.

De los resultados obtenidos se pueden obtener diversos indicadores para determinar la vida útil de la válvula de globo estudiada, entre ellos se tiene:

- Tiempo de funcionamiento hasta la pérdida de cierre completo
- Tiempo de funcionamiento hasta la fractura
- Tiempo de funcionamiento hasta la pérdida total de regulación.

En el presente artículo solo se calculará el tiempo de funcionamiento hasta la pérdida de cierre completo, el cual se define como el momento en el que el cierre de la válvula deja de ser estanco y permite el paso de fluidos indeseados hacia el otro lado de la válvula.

Para determinar el tiempo de funcionamiento hasta la pérdida de cierre completo, se realizan las siguientes consideraciones:

- Se utiliza la tasa de erosión total en toda la superficie para realizar los cálculos.
- Se asume que la pérdida de material se realiza de forma uniforme en todas las direcciones de las superficies analizadas, pero solo se considera en la base inferior del obturador, ya que en la parte lateral existe un estancamiento de las partículas con el tiempo tal como se muestra en la figura (4).
- Para que el cierre deje de ser estanco debe existir una disminución de la altura del obturador de por lo menos 2 mm. Esto según las dimensiones del obturador y el canal de descarga, donde al estar cerrado completamente la base inferior del obturador queda 2 mm por debajo del punto inferior del canal de descarga. Al disminuir esta longitud se puede asumir que la falla es inminente.
- Al ser una distancia tan pequeña se asume que el área de la base inferior del obturador siempre es la misma a medida que se desgasta.

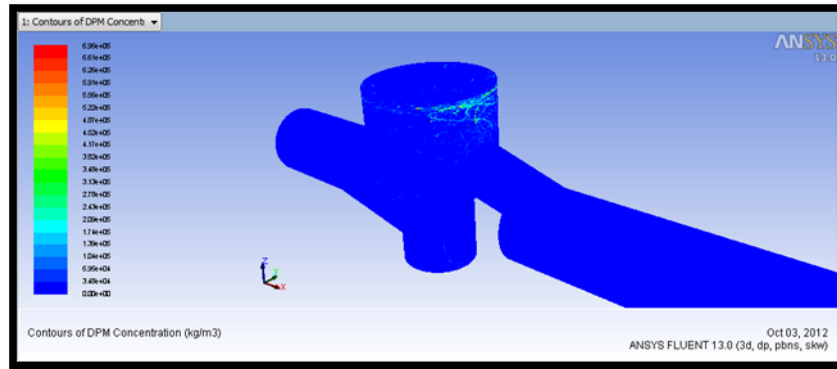


Figura 3- Concentración de partículas en el dominio computacional.

Según los resultados obtenidos para la simulación, se tiene una tasa de erosión para el obturador de 3.049617×10^{-10} kg/seg. El área transversal de la base inferior del obturador es de 1.74×10^{-4} m², por lo que la masa que se debe remover para alcanzar la disminución de altura planteada sería, teniendo en cuenta que para esta válvula el material del obturador es acero inoxidable:

$$M_r = A_{\text{base}} \cdot H \cdot \rho_{\text{a.inox}} = 1,74 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 0,002 \text{ m} \cdot 7850 \text{ kg/m}^3 = 0,00273 \text{ kg}$$

El tiempo de funcionamiento hasta la pérdida de cierre completo será:

$$T_{\text{fpcc}} = M_r / (T_{\text{erosión}}) = 0,00273 / (3,049617 \times 10^{-10})$$

$$T_{\text{fpcc}} = 9.106.000 \text{ seg} = 2529 \text{ horas} = 105 \text{ días}$$

Cabe destacar que este tiempo de funcionamiento en días corresponde a días de funcionamiento completo, lo que indica que el mismo pudiera variar en función del horario de trabajo al cual esté sometido la válvula.

REFERENCIAS

- [1]. Chen C & Wung T, 1989, Finite Analytic solution of convective heat transfer for tube arrays crossflow: Part II – Heat transfer analysis, ASME journal of Heat Transfer, 111, 641-648.
- [2]. Morsi, S. & Alexander, A. 1972, An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, Journal of fluid mechanic, vol 55, pp. 193-208.
- [3]. Edwards, J, McLaury, B.S & Shirazi, S.A. 2000, Evaluation of Alternative Pipe Bend Fittings in Erosive Service, ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Boston.
- [4]. Colmenares, J. C. (2011). Generación de actividades de mantenimiento en un central azucarero mediante la simulación computacional. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Experimental del Taachira.

MODELO DINÁMICO PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE OBSTRUCCIONES PARCIALES EN TUBERÍAS

Marcos L Guillén

Jean-F. Dulhoste

Rafael Santos

{marcosg, djean, rsantos}@ula.ve

Grupo Termofluidodinámica. Dpto. de Ciencias Térmicas. Escuela de Ing. Mecánica.

Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela.

Ignacio Rubio Scola

Gildas Besançon

Didier Georges

{ignacio.rubio-scola, gildas.besancon, didier.georges}@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Département Automatique, GIPSA-lab. Instituto Politécnico de Grenoble. Saint-Martin d'Herès, Francia.

Resumen. *Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo de tubería para detectar y localizar obstrucciones parciales en una tubería. El modelo está basado en las ecuaciones diferenciales parciales de Golpe de Ariete, las cuales se discretizan utilizando el método de diferencias finitas, este método permite hacer una representación de un flujo incompresible inestable para un número finito de posiciones. El modelado de la obstrucción, se realiza de dos formas. En la primera forma, se supone que la obstrucción se presenta en un punto de la tubería, es decir, una obstrucción puntual y no un tramo obstruido como es el caso de la segunda forma. En la segunda forma, se supone que se presenta una reducción de área en la sección transversal de la tubería; esta reducción, se puede presentar ya sea en un tramo corto o largo de tubería, dependiendo de qué tan grave sea la obstrucción que se quiere simular. Luego, se muestra el diseño de dos observadores de estado, uno que detecta la obstrucción en la tubería y un segundo observador que ubica la posición en la cual se está presentando dicha obstrucción.*

Keywords: Tubería, obstrucción, detección, localización, observador de estado.

1. INTRODUCCION

Las obstrucciones son un problema común en las redes de tuberías. Las obstrucciones, perturban el funcionamiento de las tuberías, pudiendo generar disminución de la calidad del

servicio e incluso una ruptura total por aumento de la presión. La investigación en este tema ha generado varios artículos, entre las cuales se pueden mencionar: [1], [2] y [3]. Por otra parte, los observadores de estado han sido utilizados con éxito para detectar y localizar fugas en tuberías [4], [5], [6]. En el presente trabajo se propone un modelo de tubería para ser usado en la Detección y Localización de Obstrucciones en una tubería. La detección y localización se hace por medio de observadores de estado.

2. MODELO MATEMATICO DE LA TUBERIA

2.1 Ecuaciones Básicas del Modelo de Tubería

El modelo de tubería se basa en las ecuaciones de golpe de ariete [7], que representan la generación propagación, reflexión y atenuación de ondas de presión cuando ocurren cambios en el sistema de tubería. Realizando un balance de masa y energía se llega al siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial z} ; \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = -Ag \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{fQ|Q|}{2DA} \quad (1)$$

Donde: t y z son coordenadas de tiempo y espacio, H presión, c velocidad del sonido, Q flujo, D diámetro tubería, A área, f coeficiente de fricción [8], [9].

2.2 Discretización espacial para Q y H:

El modelo se discretiza dividiendo la tubería en N secciones y considerando como condiciones de frontera al caudal de entrada Q_1 y la presión de salida H_n [4], [10].

2.3 Modelo de la Tubería

Con la finalidad de que el comportamiento del modelo sea más apegado a un sistema real, se agregó la ecuación de una bomba y la ecuación de dos restricciones (Fig. 1) [10].

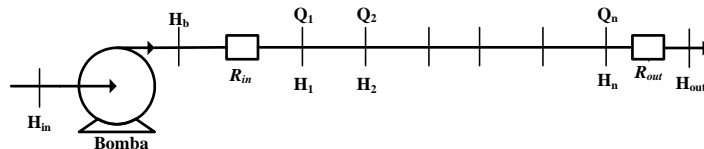


Figura 1. Sistema de Tubería Real.

3. FORMAS EN QUE SE MODELA LA OBSTRUCCIÓN EN LA TUBERÍA

3.1 Primera Forma de Modelado de la Obstrucción

Se modela la obstrucción suponiendo que se presenta una obstrucción puntual, es decir, suponemos que hay un elemento que reduce el área, tal como una placa orificio (Fig. 2). Haciendo un análisis de Energía y Continuidad se puede obtener una relación que permite calcular la obstrucción. La obstrucción hace que la presión H_2 cambie su valor a H_2^* . Por conservación de energía y continuidad entre 2 y 2*, obtenemos:

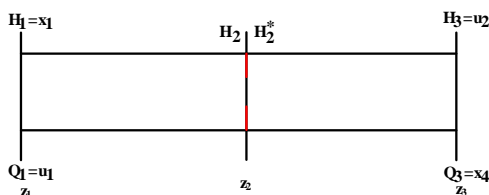


Figura 2. Esquema para la primera Forma de Modelado de la Obstrucción.

$$H_2^* = H_2 + \frac{Q_2^2}{2gC_d A^2} \left(1 - \left(\frac{A}{A_b} \right)^2 \right) \quad (4)$$

Donde H es la presión, V velocidad, A área de la tubería, A_b área de obstrucción. Para este artículo se está tomando $C_d = 1$. Tomando en cuenta este cambio en la presión de H_2 a H_2^* y escribiendo el sistema en variables de estado, quedaría:

$$x = [H_1, Q_2, H_2, Q_3]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \quad (5)$$

$$u = [H_{in}, H_{out}]^T \quad ; \quad y = [H_1, Q_3]^T \quad (6)$$

Las ecuaciones discretizadas del modelo serían:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{c^2 x_2 - \left\{ \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4(R+C)(-A + x_1 - u_1)}}{2(R+C)} \right\}}{gA} \frac{z_2 - z_1}{z_2 - z_1} \\ \dot{x}_2 &= -Ag \frac{x_3 - x_1}{z_2 - z_1} - \frac{f_1}{2DA} x_2 |x_2|, \quad \dot{x}_3 = -\frac{c^2 x_4 - x_2}{gA} \frac{z_3 - z_2}{z_3 - z_2}, \\ \dot{x}_4 &= -Ag \frac{\left\{ (R_{out} x_4^2 + u_2) - \left(x_3 + \frac{x_2^2}{2gA^2} \left[1 - \left(\frac{A}{A_b} \right)^2 \right] \right) \right\}}{z_3 - z_2} - \frac{f_3 x_4 |x_4|}{2DA} \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 Segunda forma de Modelado de la Obstrucción

Se supone que se presenta una reducción del área en una longitud l_o . La tubería se divide en tres secciones para definir una sección central donde se presenta la obstrucción.

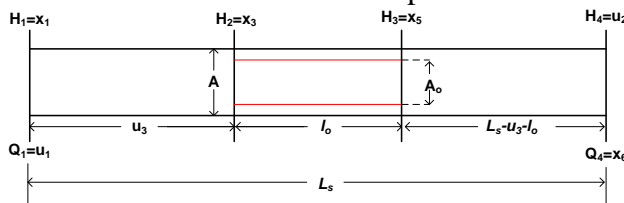


Figura 3. Esquema para la segunda Forma de Modelado de la Obstrucción.

En la Fig. 3 se puede ver que la obstrucción comienza en H_2 y termina en H_3 , entonces reemplazando A por A_b en la ecuación correspondiente a x_3 y a x_4 tendremos un modelo donde estamos considerando la obstrucción. Las ecuaciones discretizadas serían:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= -\frac{c^2}{gA} * \frac{x_2 - \left\{ \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4(R+C)(-A + x_1 - u_1)}}{2(R+C)} \right\}}{z_2 - z_1} \\
\dot{x}_2 &= -Ag \frac{x_3 - x_1}{z_2 - z_1} - \frac{f_2}{2DA} x_2 |x_2| ; \quad \dot{x}_3 = -\frac{c^2}{gA_b} \frac{x_4 - x_2}{l_o} \\
\dot{x}_4 &= -A_b g \frac{x_5 - x_3}{l_o} - \frac{f_3 x_4 |x_4|}{2DA_b} ; \quad \dot{x}_5 = -\frac{c^2}{gA l_o - (z_4 - z_3) - z_2 - z_1} x_6 - x_4 \\
\dot{x}_6 &= -Ag \frac{\{(R_{out} x_6^2 + u_2) - x_5\}}{l_o - (z_4 - z_3) - z_2 - z_1} - \frac{f_3 x_6 |x_6|}{2DA} ; \quad y = [H_1, Q_4]^T
\end{aligned} \tag{11}$$

4. OBSERVADORES PARA DETECTAR Y LOCALIZAR LA OBSTRUCCIÓN

Se pretende diseñar un observador que detecte y localice una obstrucción en una tubería. En el caso de sistemas lineales el llamado observador de Luenberger ofrece una solución completa al problema de la estimación de variables de estado.

4.1 Diseño del Observador de Luenberger

Para diseñar este observador es necesario linealizar el modelo de tubería. Luego el sistema puede ser escrito como:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t); \quad y = Cx(t) \tag{12}$$

Si (12) es observable entonces existe un observador de la forma:

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x}(t) + Bu(t) - K(C\hat{x}(t) - y(t)) \tag{13}$$

Con K tal que la matriz $A-KC$ sea estable [11].

4.1.1 Observador para el Caso de la Primera Forma de Modelado

Las variables de estados para el observador serían:

$$x = [H_1, Q_2, H_2, Q_3, z_o, A_b]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \tag{14}$$

Dónde:

$$x_5 = z_o \text{ posición de la obstrucción ; } x_6 = A_b \text{ área de obstrucción} \tag{15}$$

$$u = [H_{in}, H_{out}]^T = [u_1, u_2]^T ; \quad y = [H_1, Q_3]^T = [x_1, x_4]^T \tag{16}$$

Luego se estudió la Observabilidad del sistema. Si existe una ganancia del observador tal que, el error de estimación sea asintóticamente estable a cero, el observador estimara tanto a x_5 como a x_6 . En nuestro caso resultado $\text{rango } \mathcal{O} = 6$, por tanto el sistema es observable.

4.1.2 Observador para el Caso Segunda Forma de Modelado

Se diseñó un observador que estimara a A_b y z_o . Sin embargo, resultado no observable, por tanto, se diseñaron dos observadores; uno que estima A_b y otro que estime z_o .

4.1.2.1 Observador para Detectar el Grado de Obstrucción (A_b)

Variables de estado:

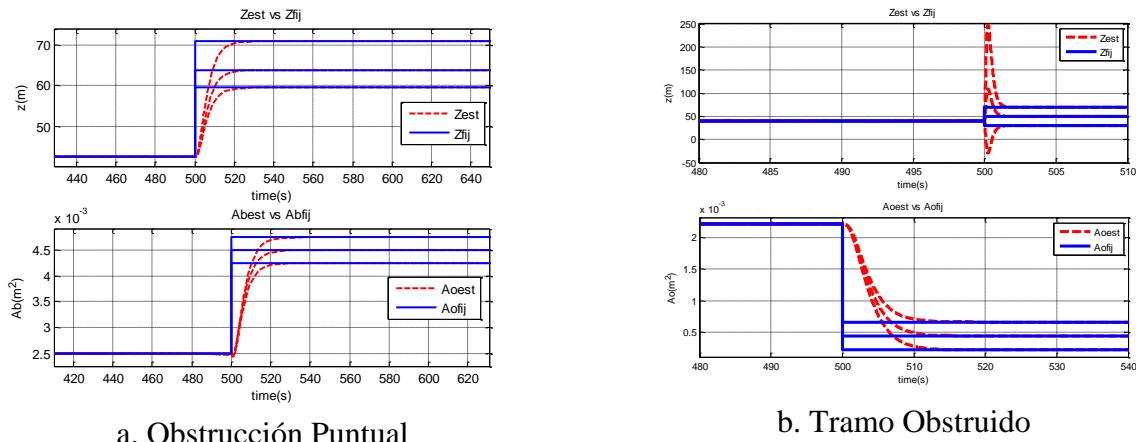
$$x = [H_1, Q_2, H_2, Q_3, H_3, Q_4, A_b]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T \quad (17)$$

$$u = [H_{in}, H_{out}]^T = [u_1, u_2]^T; \quad y = [H_1, Q_3]^T = [x_1, x_6]^T \quad (18)$$

Para estimar la posición se procedió de igual manera que para A_b .

5. SIMULACIONES Y RESULTADOS

En esta sección se presentan algunos resultados.



a. Obstrucción Puntual

b. Tramo Obstruido

Figura 6. Posiciones y Porcentajes de Obstrucción Estimados.

La Fig. 6a, muestra los resultados de las simulaciones hechas en el observador para la 1^{ra} forma de modelado. Se puede ver que el observador estima de manera simultánea el valor de la obstrucción (porcentajes de obstrucción 10, 20 y 30%) así como la posición en la que está ocurriendo. Igualmente, la Fig. 6b, muestra las simulaciones para la 2^{da} forma de modelado. En la figura superior, se observan tres diferentes posiciones de la tubería. Se puede ver claramente que el observador después de cierto tiempo alcanza el valor correcto de la posición. En la figura inferior, se ve como el segundo observador estima correctamente el valor de la obstrucción (tres diferentes porcentajes 10%, 20% y 30%).

6. CONCLUSIONES

Se presentó un enfoque basado en observadores para estimar la magnitud y posición de una obstrucción en una tubería. Basado en un modelo discretizado, se presentaron dos formas de modelar la obstrucción. La primera forma permitió diseñar un observador del tipo Luenberger, que es capaz de estimar simultáneamente tanto la obstrucción como su posición en la tubería. En la segunda forma, se diseñaron dos observadores, uno para estimar la posición y otro para estimar A_b . Finalmente, en la Fig. 6a se vio como el observador es capaz de estimar simultáneamente tanto los diferentes porcentajes de obstrucción como las diferentes posiciones de la obstrucción puntual. Igualmente, en la Fig. 6b se vio como el observador estima por separado los diferentes porcentajes de obstrucción así como las diferentes posiciones en las que se ubica la obstrucción.

Agradecimientos:

Al programa de colaboración Franco-Venezolano ECOS-Nord V11M02 / PI-2010000303 Fonacit, Fundayacucho Venezuela 2011 quien financio parcialmente este trabajo.

REFERENCIAS

- [1]. Xiao-Jian Wang; Martin F. Lambert; and Angus R. Simpson, M.ASCE. Detection and Location of a Partial Blockage in a Pipeline Using Damping of Fluid Transients JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT © ASCE / MAY/JUNE 2005.
- [2]. Pedro J. Lee; John P. Vítkovský; Martin F. Lambert; Angus R. Simpson; and James A. Liggett. Discrete Blockage Detection in Pipelines Using the Frequency Response Diagram: Numerical Study. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING © ASCE / MAY 2008
- [3]. J Ma, M J S Lowe and F Simonetti. Feasibility study of sludge and blockage detection inside pipes using guided torsional waves. Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 2629–2641.
- [4]. L. Torres, Besançon and D. Georges. A collocation model for water-hammer dynamics with application to leak detection. Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control Cancun, Mexico, Dec. 9-11, 2008.
- [5]. Besançon G., Georges D., Begovich O., Verde C., Aldana C., “Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines”, in European Control Conference, Kos, Greece, July 2-5, 2007
- [6]. Torres L., Besançon G., Navarro A., Begovich O., and Georges D. “Examples of pipeline monitoring with nonlinear observers and real-data validation”, in 8th International Multiconference on Systems, Signals and Devices, Sousse, Tunisia, March 2011.
- [7]. Lucía Castro Burgos y Héctor Valdés-González. Leak Detection in Water Pipelines: Proposal Based on a Bank of Filters. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 17 No 3, 2009, pp. 375-385.
- [8]. Jorge García-Serra, Vela, A.F. Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión. Universidad de Coimbra, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de la República Oriental del Uruguay. ISBN: 84-600-9146-5.
- [9]. Steven C. Chapra, Raymond P. Canale. Métodos Numéricos para Ingenieros. Editorial: MacGH.
- [10]. M. Guillén, J-F Dulhoste, G. Besançon and R. Santos. “Study of A Flow Model for Detection and Location of Leaks and Obstructions in Pipes” *9th International Conference of Modeling, Optimization and Simulation-MOSIM'12* June 06-08, 2012 Bordeaux-France.
- [11]. G. Besançon, Nonlinear Observers and Applications. Nonlinear Observers and Applications Series: Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 363 Besançon, Gildas (Ed.) 2007, XII, 224 p. Also available online, Softcover ISBN: 978-3-540-73502-1.

PRELIMINARY DESIGN OF A DOUBLE EXPANSION THROUGH FLOW WAVE ROTOR: WAVE ROTOR DIMENSIONING

Gilberto Materano

g.i.materanoblanco@cranfield.ac.uk

Department of Powear and Propulsion, School of Engineering, Cranfield University, College Road, Cranfield, MK43 0AL, Bedfordshire Cranfield-United Kingdom

Mark Savill

mark.savill@cranfield.ac.uk

Professor of Computational Aerodynamics Design, Head of Power and Propulsion Sciences, Department of Powear and Propulsion, School of Engineering, Cranfield University, College Road, Cranfield, MK43 0AL, Bedfordshire Cranfield-United Kingdom

Abstract. *As part of the preliminary design of a wave rotor, this paper presents a procedure to determine the device's dimensions by tracking the various waves generated during a cycle as well as the mass flow rate at each end of the channels. Both processes are achieved by implementing a 1D CFD code, for which it is only necessary to know in advance the channels length as geometrical parameter. The developed code is suitable for compressible and incompressible flows by implementing the SIMPLE algorithm to solve the Euler equations. The studied case is a double expansion through-flow wave rotor designed to be incorporated into a gas turbine for business jets. The advection effect is modelled by implementing a deferred correction technique to include a high order scheme and the ends of the channel are modelled by three different boundary conditions, which are: stagnation properties at the inlet, static properties at the outlet, and wall. The fluid properties at each port are obtained from the cycle thermal analysis previously developed [8]. In order to validate the results predicted by the 1-D code, a 2-D numerical model utilising a well-known commercial CFD software was used. The results comparison between the two codes reveals good agreement, thus demonstrating the potential for the use of the proposed technique during the preliminary design of wave rotors.*

Key words: Wave rotor, Compressible flow, Shock wave, Gas turbine, CFD

1 Introduction

The wave rotor is a compression device composed of multiple channels in a series arrangement. These channels rotate about an axial axis, isolated by two plates set at each end. The plates have

slots located in specific positions that let channels get in contact with multiple ports. The ports are used to inject or extract the working fluid at different states as well as generate shock waves and expansive waves to compress and expand the working fluid during a cycle.

An small mechanical compressor (small compression pressure ratio) followed by a wave rotor are able to achieve adiabatic compression efficiencies over 90% with and overall pressure ratios of 30 or over [1, 9]; these features have positioned the wave rotor as an option for the compression process of future gas turbines.

This work presents the development of a 1D CFD code able to predict the dimensioning of the wave rotor (location and opening times of the device's ports) as part of the device's preliminary design. The CFD code requires as input the channels' length to define the computational domain and the boundary conditions at each port, which are obtained from the analytical solution proposed by Weber [7]

Figure 1a provides a schematic representation of the studied case; a double expansion through-flow wave rotor fitted to a gas turbine, in which the numbers indicate the states reached by the fluid during a thermal cycle. In turn, Fig. 1b presents a schematic representation of the transient behaviour experienced by the wave rotor based on the Weber assumptions [9, 10]; highlighting the waves generated during the cycle, the states reached by the working fluid inside the device (represented with capital letters), and the port's sequence. In this figure three types of wave are also observed interacting during the cycle, these waves are: shock waves (continuous lines), contact waves (dot–dash lines) and rarefaction waves (dash lines).

The different ports of the wave rotor are called: the low pressure air port (LPA) to drive fresh air from the compressor to the WR, the high pressure gas port (HPG) to drive burned gases from the combustion chamber to the WR, the high pressure air port (HPA) to drive high pressure air from the wave rotor to the combustion chamber, and the low pressure gas ports (*LPG1* & *LPG2*) to drive gases from the wave rotor to the high pressure gas turbine and the low pressure gas turbine respectively (see Fig.1a).

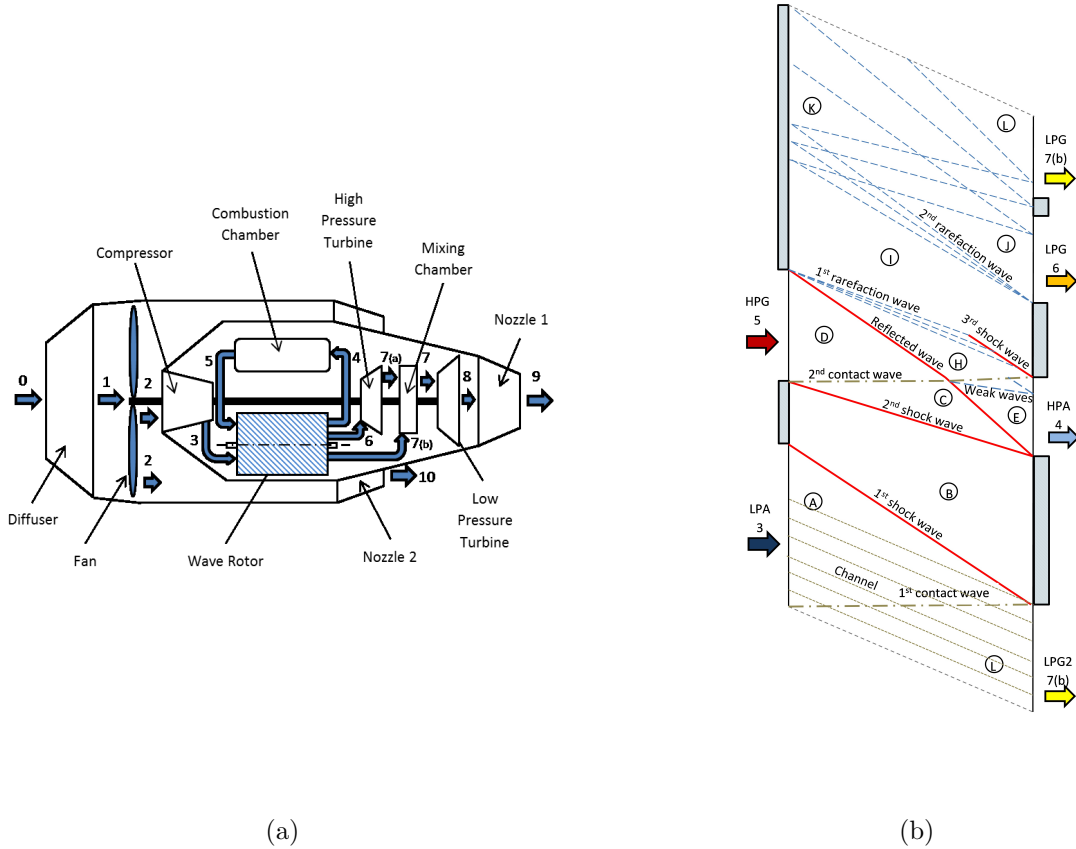
2 Methodology

1D CFD code for compressible flow

The 1D CFD code solves the Euler equations of mass, momentum and energy (inviscid conservation equations) by implementing the SIMPLE algorithm, which includes a pressure correction equation P' with an additional term that gives the mass flux correction due to the upwind value of P' (hyperbolic behaviour of compressible flow) [5]. In addition, the transport equation of a normalized passive scalar is solved to track the position of the contact wave.

The momentum equation is computed in a staggered mesh to avoid the interpolation of the pressure field, the convective term is estimated by implementing UMIST (high order TVD scheme) through the deferred correction technique, and the transient phenomenon is modelled by implementing a full implicit scheme, which guaranties a stable iteration process regardless the value of the Péclet number. The transient solution is achieved by incorporating an external loop. A comprehensive description of all these alternatives is presented by [8].

To model the transient process, the required boundary conditions are total pressure and temperature at the inlet, static pressure at the outlet and wall. This is performed by alternating



(a)

(b)

Figure 1: a) Schematic representation of a double expansion through-flow wave rotor attached to a turbofan engine; b) 2D representation of a double expansion through-flow wave rotor (rectilinear cascade) [7]

the Neumann boundary condition (prescribed derivative) and the Dirichlet boundary condition (prescribed scalar value) in each of the transport equations as suggested by Versteeg [8] and Peric [3].

The length of the channels is computed from Equ.1 once the value of H is set, this equation results from computing the mass flow rate driven by the LPA port when the state of the injected air is assumed constant [9, 10]. In this equation ρ_a , β , H , V_W , L , M_{xA} and M_A represent the fluid density, the channels' angle relative to the axial projection of the wave rotor, the channels' height in (m), the wave rotor tangential velocity in (m/s), the channels length in (m), and the fluid Mach number in state A relative to the first shock wave and relative to the channels respectively, see Fig.1b; the other variables different than H and L are obtained from [7].

$$\dot{m}_{LPA} = \rho_A \cos(\beta) H V_W L \left(1 + \frac{1}{\frac{M_{xA}}{M_A} - 1} \right) \quad (1)$$

Equation 2 is implemented to compute the mass driven by each channel during their interaction with the wave rotor's ports, where Δt_{step} represents the time step set during the CFD simulation, $u_{port,i}$ and $\rho_{port,i}$ represent the fluid velocity and density at the evaluated port during the time i , and s represents the channels' width. The accumulated value given by Equ. 2 should match with Equ. 1 through Equ. 3, this criterion is used as constrainer of the mass driven by the channels' ends to finish the interaction between the channels and the ports of the wave rotor.

$$\frac{m_{port}}{s} = \cos(\beta) H \sum_{i=1}^n \rho_{port,i} u_{port,i} \Delta t_{step} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{LPA} = \frac{m_{port}}{s} V_w \quad (3)$$

Moreover, NDt is the minimum spacing between the ports of the wave rotor, this distance is assumed as three times the width of the channels; a value that has shown to keep the ports isolated from each other and a suitable performance of the designed wave rotors.

$$NDt = \frac{3 \cdot s}{\Delta t_{step} \cdot V_w} \quad (4)$$

The interaction of the boundary conditions and the completion of the device's cycle are set according to [6, 9]. The implemented criteria define the position of the ports, while the mass balance is ensured.

A change of the reference system is necessary after the running of the CFD model to consider the channels' angle β . Equ.5 and Equ.6 let to set the new system of reference in the pitch line perimeter as well as in the wave-rotor axial direction. In this equations L is the channel length, in *mts.*, and t is the time required by the channel to reach that position, in *sec.*

$$L_x = L * \sin(\beta) \quad (5)$$

$$L_y = t * V_w - L_x \quad (6)$$

Code evaluation

This work intends to predict the dimensioning of a wave rotor that operates into a turbofan, in a cycle that keeps the same overall pressure ratio as the baseline cycle [7]. Table 1 shows the different values of M_A as well as the pressure and temperature implemented as boundary condition by the 1D-CFD code.

To start the analysis, the channels' height is set equal to twenty centimetres ($h = 0.2m$) whilst their width is set equal to four centimetres ($s=0.04$ m) the last value is selected to keep a s/h ratio equal to 20%. The value of h is selected to obtain a reasonable length of the wave rotor (see Eqn. 1) but it does not affect the result obtained by the code because the phenomena is assumed 1D. At the same time, h could be modified after the device's dimensioning to make the resultant mass flow rate be equal to the desired one.

The working fluid is assumed standard air (R equal to 287 j/kg K) [2] and the specific heat values are assumed constant (C_p equal to 1005 j/kg K & $k=C_p/C_v$ equal to 1.4)[4].The domain

Table 1: Boundary conditions implemented in the CFD model for three different values of M_A [7]

Options:	(a)	(b)	(c)	Units.
M_A	0.2	0.46	1	
V_W	180.09	181.44	182.16	m/s
h	0.2	0.2	0.2	m
L	1.01	0.98	1.03	m
\dot{m}_{LPA}	65.3	63.43	65.00	kg/s
$T_{0,LPA}$	479.67	444.50	424.23	K
$P_{0,LPA}$	292.72	232.6	205.06	kPa
$T_{0,HPG}$	1194.49	1204.98	1225.79	K
$P_{0,HPG}$	860.51	859.71	860.9	kPa
T_{HPA}	652.59	649.65	674.07	K
P_{HPA}	824.03	822.78	824.64	kPa
T_{LPG1}	1096.9	1094.05	1090.13	K
P_{LPG1}	572.43	549.62	511.91	kPa
T_{LPG2}	898.44	821.13	699.48	K
P_{LPG2}	284.67	201.31	108.33	kPa

Table 2: Additional information implemented by the 2D model (Ports angle and stagnation properties relative to the stator - $M_A = 0.46$)

Port	Angle θ	$P_0(Pa)$	$T_0(K)$
<i>LPA</i>	19.31°	218478	436.62
<i>HPG</i>	0°	820009	1204.99
<i>HPA</i>	5.02°	-/-	-/-
<i>LPG1</i>	0.79°	-/-	-/-
<i>LPG2</i>	19.31°	-/-	-/-

has a resolution of 160 cells per meter of length of the channel and the time step is set equal to $9 \times 10^{-6}sec$ throughout the simulation to ensure an stable iteration process.

The validation of the code is performed by a 2D simulation done with ANSYS FLUENT[®]. The 2D model requires the same boundary conditions than the used in the 1D model, but the stagnation properties in LPA and HPG ports must consider a change in the reference frame (the stagnation properties at the stator are different than at the rotor), the values implemented in the 2D model are shown in table 2.

The time step was set equal to $4.5 \times 10^{-6}sec$ and each cycle is concluded after 3829 time step, the dynamic equilibrium is achieved after two cycles due to the multi-channels interaction. A mesh sensitivity analysis was performed to ensure that results are independent of the discretisation. The geometry of the model was built from the data given by the 1D CFD code and the ports were projected based on the angles estimated by [7], (see table 2). the 2D model is constituted by 78 channels located through the entire pitch-line perimeter; this number results from the channels' width previously set.

3 Results and discussion

Figure 2 shows the value of pressure and temperature within the channels predicted by the 1D-CFD code during the channels' displacement through the cycle. A direct comparison of this figure with the scheme presented in Fig.1a shows that the analytical solution could be a good initial approximation. However, important differences are observed that make the 1D-CFD model a better option, they are as follows:

- A non-linear trajectory followed by the contacts waves during their displacement along the

Table 3: Results obtained from the developed code

M_A	0.200	0.460	1.000	(Units)
PLP	3.441	3.057	3.251	m
RPM	3140	3561	3362	rev/min
θ	1.095	0.973	1.035	m
Y_{LPA}	1.653	1.324	1.231	m
Y_{LPG1}	0.207	0.183	0.226	m
Y_{LPG2}	1.708	1.323	1.269	m
Y_{HPA}	0.49	0.422	0.469	m
Y_{HPG}	0.825	0.703	0.599	m

Y:Ports size, θ :Diameter, PLP: Wave rotor perimeter.

channels is observed, which results in a delay in the closure of LPG2 and HPA ports.

- An interaction between the waves and the boundary conditions is observed, this interaction propitiates the apparition of new waves that make distortions in the fluid properties including the velocity field and therefore the ports' closure can be affected.
- The collision between waves does not make them dissipate each other and their strength can affect the performance of the device, such as the rarefaction wave generated during the HPG port closure, whose arrive to the right end of the channels results in the early closure of the LPG1 port to prevent the return of the fluid, so the mass flow rate through this port gets reduced.

Table 3 shows the wave rotor perimeter, the diameter of the wave rotor, the RPM, and the ports size Y through the pitch line perimeter; all of them predicted by the 1D-CFD code. a $M_A = 0.46$ not only requires the shorted channels but also the smallest perimeter.

In addition, $M_A = 0.46$ gives the maximum ratio between the turbine mass flow rate \dot{m}_{LPA} and the size of port HPA Y_{HPA} (equal to 150.31), which is only possible when the value of density and velocity at port HPA are the highest of the studied alternatives, so $M_A = 0.46$ offers efficient compression shock waves.

To validate the 1D CFD code, Figure 3 plots values of temperature and pressure predicted by the 1D and 2D CFD simulations in a cell located in the middle of a channel during one cycle of the wave rotor. The main difference observed in these figures is the position of the first contact wave. The 2D model predicts a small delay that makes certain amount of burned gases become trapped at the right side of the channel once the interaction with the LPG1 port concludes.

Table 4 shows the mass flow rate at each port of the device according to the 1D and 2D CFD models. These values are lower than \dot{m}_{LPA} shown in table 1, due to the prompt arrival of the first reflected shock wave to the left end of the channels. Therefore, the LPA port must be closed early; otherwise a reverse flow through the LPA port is expected. Consequently, the height of the channels should be corrected by a factor of 1.038; a value obtained from the ratio between the desired mass flow and the obtained one.

Table 4: Mass flow rate - discrepancies between the CFD simulations at each port of the device

Port	1D CFD	2D CFD	error (%)
\dot{m}_{LPA}	63.43	58.6337	2.211
\dot{m}_{HPA}	63.43	63.7291	0.472
\dot{m}_{HPG}	63.43	62.0274	7.562
$\dot{m}_{LPG1+LPG2}$	63.43	60.5053	4.611

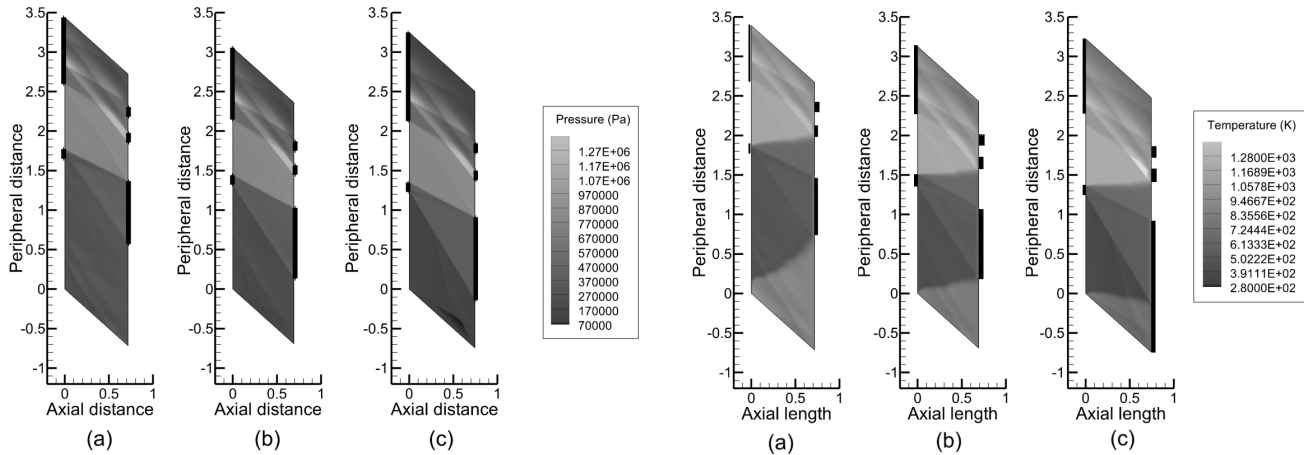


Figure 2: Contour of pressure, in Pascal, and temperature, in Kelvingiven, given by the 1D model: a) $M_a = 0.2$ b) $M_A = 0.46$ c) $M_A = 1$

The highest error between the mass flow rates predicted by both models is calculated in the LPA1 port. The 2D model achieves a lower flow velocity and thus a lower value of mass flow rate. The non-instantaneous opening of the ends of the channels has a strong influence on the observed behaviour.

4 Conclusions

This work has presented the development of a 1D CFD code to predict the dimensioning of wave rotors. This approach has shown to be effective in predicting most of the waves generated during the transient process as well as their interaction with the device. Therefore a better reliability is obtained than the analytical solution.

The differences observed between 1D and 2D models are not significant to disregard the proposed option. In fact, the 1D model is simple and does not require the ports size and location to define the domain. Likewise, the effect observed during the opening of the channels' ends can be incorporated by including a diffusive term in the transport equations.

Finally, The value of M_A must be considered in the design of wave rotors, because it affects the size of the designed device.

Acknowledgements

The research project has received funding from the European Union's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) for the Clean Sky Joint Technology Initiative under grant agreement NO CJSU-GAMSGO-2008-001, and from The University of Zulia, therefore the authors gratefully acknowledge their support, as well as Dr Macmanus, senior lecturer in Turbo machinery of the Department of Power and Propulsion - Cranfield University, for his valuable discussion about the theories applied in the analysis of compressible flow, especially in the study of transient problems.

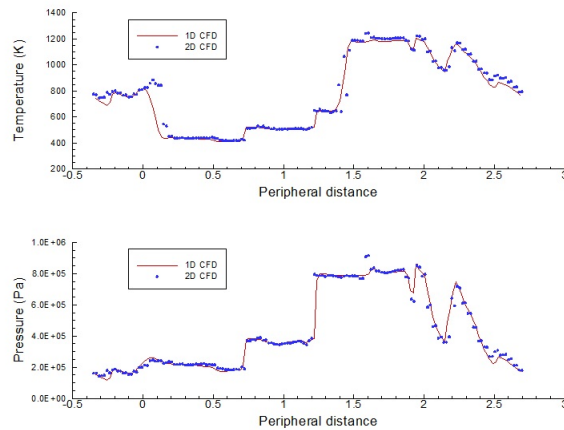


Figure 3: Pressure and temperature values predicted by the 1D and 2D models, measured in the middle of the channels during the entire cycle of the wave rotor

References

- [1] J. D. Anderson. *Modern compressible flow : with historical perspective* / John D. Anderson, Jr. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. Boston : McGraw-Hill, 200., 2004.
- [2] Y. A. Cengel and M. A. Boles. *Thermodynamics : an engineering approach* / Yunus A. Çengel, Michael A. Boles. McGraw-Hill series in mechanical engineering. New York : McGraw-Hill, 2007., 2007.
- [3] J. H. Ferziger and M. Perić. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, volume 3. Springer, 1997.
- [4] S. HHH, R. GFC, and H. Cohen. *Gas Turbine Theory*. 6th edition. Edinburg: Pearson Education Limited, 2009., 2009.
- [5] K. C. Karki and S. V. Patankar. Pressure based calculation procedure for viscous flows at all speeds in arbitrary configurations. *AIAA Journal*, 27(9):1167–1174, 1989.
- [6] G. Materano. Numerical modelling of pressure rise combustion to assess its feasibility on reducing emissions of future. Unpublished document - Cranfield University - PhD Thesis, 2014.
- [7] G. Materano and M. Savill. Preliminary design of a double expansion through flow wave rotor: Thermal and gas dynamic analysis. In *GT2013*, volume GT2013-94987, San Antonio, Texas, June 3-7 2013. ASME Turbo Expo 2013.
- [8] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, volume M. Pearson Education, 2007.
- [9] H. Weber. *Shock wave engine design* / [by] Helmut E. Weber. New York : John Wiley, 1995., 1995.
- [10] H. E. Weber. Wave engine aerothermodynamic design. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of The Asme*, 114, 1992.

COMPARISON OF PARTICLE DISPERSION OBTAINED WITH SIMPLE STOCHASTIC MODELS AND LES IN PIPE FLOW

Garcia J.

Crespo A.

garcia@etsii.upm.es

ETSII Universidad Politécnica de Madrid

C/José Gutiérrez Abascal, 2. Madrid-España

Torres MJ.

mtorres@unet.edu.ve

Universidad Nacional Experimental del Táchira

Paramillo, Av. Universidad, San Cristóbal-Venezuela

Abstract. *A hybrid Eulerian-Lagrangian approach is employed to simulate heavy particle dispersion in turbulent pipe flow. The mean flow is provided by the Eulerian simulations developed by mean of JetCode, whereas the fluid fluctuations seen by particles are prescribed by a stochastic differential equation based on normalized Langevin. The statistics of particle velocity are compared to LES data which contain detailed statistics of velocity for particles with diameter equal to 20.4 μm . The model is in good agreement with the LES data for axial mean velocity whereas rms of axial and radial velocities should be adjusted.*

Keywords: Langevin equation, LES, inhomogeneous turbulence

1. INTRODUCTION

The study of confined turbulent flows laden with solid particles is complicated due to the anisotropy and inhomogeneity of flow and its complex interaction with solid particles. Many methods have been developed to reproduce the turbulence by solving the transient Navier-Stokes equations on a discretized domain including direct numerical simulation (DNS) and large eddy simulation (LES). Both methods are conceptually similar, except that the computational effort in LES reduced, requiring a grid to be only so fine as to resolve the largest eddies, whereas the smaller eddies are modeled, however DNS and LES are computationally expensive. An alternative less expensive is the use of the stochastic models based on a Langevin equation; in this investigation our goal is use statistics of fluid velocity calculated by LES and generate the

turbulent fluctuations using Langevin equations. Finally, we will compare results for particles using Lagrangian model with LES results.

2. PARTICLE EQUATION OF MOTION

In the present study, particles density (ρ_p) and diameters (d_p) were set to 1000 kg.m^{-3} and $20.4 \text{ }\mu\text{m}$ respectively. Particle motion is described by a set of ordinary differential equations for velocity and position at each time step. We have considered that a one-way coupling approach is sufficient to describe the particle-fluid interactions, the density of particles is much larger than the gas density therefore Basset forces and virtual mass can be neglected; Brownian diffusion can be neglected too (it becomes important for particles smaller than those considered in this paper) therefore only drag force is taking into account. With these simplifications the following Lagrangian equations for the particle velocity are obtained:

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = v_{pi} \quad (1)$$

$$\frac{dv_{pi}}{dt} = -\frac{\rho}{\rho_p} \frac{3 C_D}{4 d_p} |v_p - \bar{u}| (v_{pi} - \bar{u}_i) + g_i = -F_{di} + g_i \quad (2)$$

where: x_{pi} is the particle position, v_{pi} is the particle velocity, \bar{u} is the filtered gas velocity at the particle position, d_p the particle diameter and F_{di} the drag force. The Stokes drag coefficient C_D valid for particles Reynolds number Re_p up to about 40 is computed as:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (3)$$

In the presence of turbulence, the integration of the particles paths in a LES framework requires the specification of fluctuating part of fluid velocity which is extracted from averaged fields by the stochastic normalized Langevin model that defines the fluctuating velocity field along the particle track in a turbulent pipe flow for which turbulence is inhomogeneous in wall normal (radial direction). Following the normalized Langevin equations in streamwise and radial directions of the boundary layer [1]:

$$d\left(\frac{u_1}{\sigma_1}\right) = -\left(\frac{u_1}{\sigma_1}\right) \frac{dt}{\tau_L} + \sqrt{\frac{2}{\tau_L}} d\xi_1 + \frac{\partial\left(\frac{\overline{u_1 u_2}}{\sigma_1}\right)}{\partial x_2} \cdot \frac{dt}{1 + Stk} \quad (4)$$

$$d\left(\frac{u_2}{\sigma_2}\right) = -\left(\frac{u_2}{\sigma_2}\right) \frac{dt}{\tau_L} + \sqrt{\frac{2}{\tau_L}} d\xi_2 + \frac{\partial\sigma_2}{\partial x_2} \cdot \frac{dt}{1 + Stk} \quad (5)$$

where $d\xi_i$ s are modeled as a series of uncorrelated Gaussian random numbers with zero mean and variance dt . The particle Stokes number is $Stk = \tau_p/\tau_L$ and τ_L is a Lagrangian time scale [2]

3. EULERIAN SIMULATION

The continuous phase is an incompressible fully developed turbulent flow of air (kinematic viscosity $\nu_g = 1.57 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, density $\rho = 1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Computation of the Eulerian velocity field has been made with the code developed by Pierce and Moin [3]; incompressible Navier Stokes equations are solved numerically in cylindrical coordinates using an implicit filtering. Time integration is based on the fractional step method [4] and a second-order Adams-Bashforth is used for advancement of the convective terms while implicit Crank-Nicholson method is applied for an update of the viscous term. The Poisson equation for pressure is solved using spectral techniques. The time step in wall units imposed by numerical stability requirements (Courant-Friedrich-Levy number: $CFL < 1$) is $\Delta t^+ = 0.10$. For the pipe flow, the origin of the coordinate system is located at the pipe center and the coordinates x , r and θ correspond to the streamwise, radial and azimuthal directions respectively, however the graphics results are represented with respect to $y = R - r$ (y is positive from the wall pipe to the center). For pipe flow simulation the Reynolds number is 2152, which is based on estimated average velocity ($u_b = 1.69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), and radius pipe ($R = 0.02 \text{ m}$). We have used a domain of $1885 \times 300 \times 942$ wall units in x , r , θ directions, discretized with $96 \times 96 \times 64$ nodes. A hexahedral grid is used; points are equally spaced in streamwise and azimuthal directions, while a non-uniform discretization was used for the wall normal direction in order to obtain a finer grid next to the wall. The grid spacing in wall units is $\Delta x^+ = 20$ in the streamwise direction and the minimum grid spacing in wall normal direction are $\Delta y^+ = 0.8$.

Periodic boundary conditions are imposed on the fluid velocity field in the axial and spanwise directions and no-slip boundary conditions are enforced at the walls. Pipe flow was initialized with a power law profile at the inlet plane respectively with random fluctuations throughout the entire domain. The flow was enforced by a constant wall shear stress. At the beginning of simulation, particles were distributed randomly over the computational domain and their initial velocity was set equal to that of fluid in the particle initial position. Periodic boundary conditions were imposed on particles in both streamwise and spanwise directions. The pipe walls are perfectly smooth and elastic collisions were assumed for particles impacting the wall. To calculate particle trajectories in the flow field, we have coupled a Lagrangian tracking routines [5] with LES flow solver. The routines use a tri-linear interpolation method to determinate the fluid velocity at particle position; with this velocity the equations of particle motion are advanced in time using a fourth order Runge-Kutta scheme. The time step used for particle tracking was chosen to be equal to the time step size used for the fluid, also two orders of magnitude less than relaxation time of particle.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In each time step 10 particles are injected from the inlet pipe; for the results shown, all velocities and rms of velocities are normalized with the friction velocity. The Figure 1 shows axial mean velocity profiles for LES fluid and particles with Langevin model. We can see that they are essentially identical.

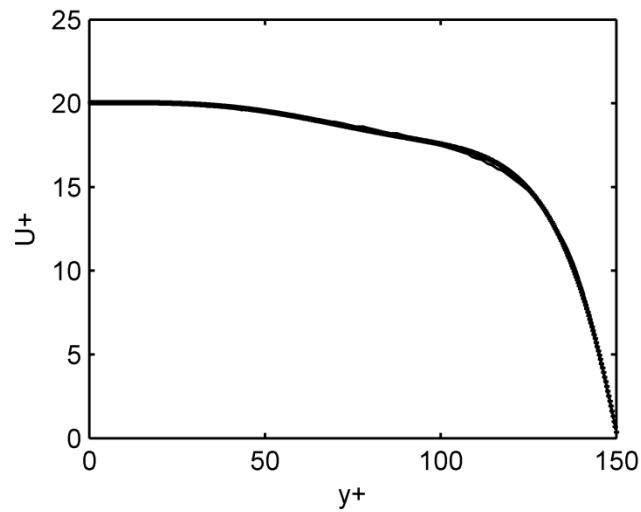


Figure 1. Mean axial velocity. (—) LES fluid; (+) Langevin model for particles

The rms values for the axial velocity for particles are shown in Figure 2.

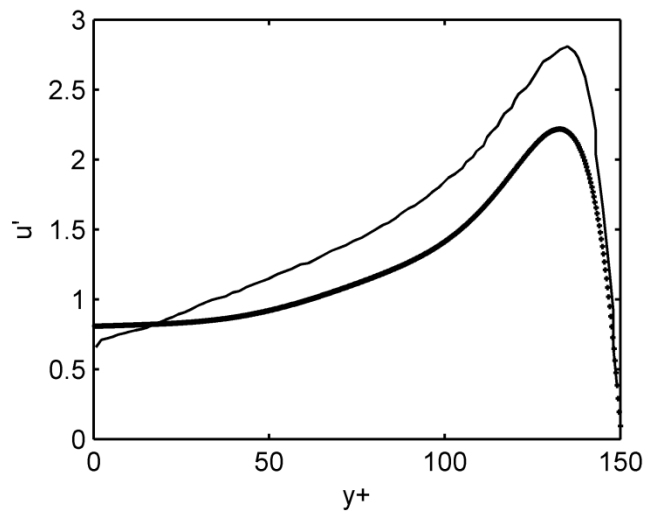


Figure 2. rms of axial velocity. (—) LES ; (+) Langevin model

The Langevin model predictions are in good agreement with LES data around pipe center. The place of maximum value is adequately predicted, however is mostly underpredicted. That behavior was also observed by Dehbi [1]. Figure 3 shows rms of radial velocity.

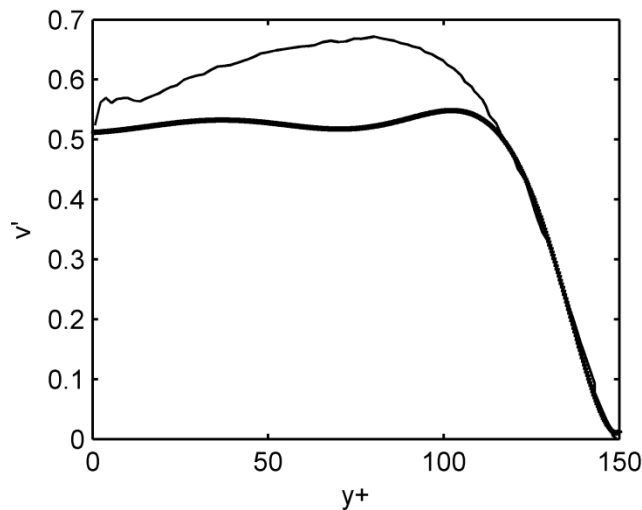


Figure 2. rms of radial velocity. (—) LES; (+) Langevin model

Both profiles match next to the center pipe whereas that up to $y^+ \approx 120$ Langevin model underestimates rms radial velocities.

Differences observed in both figures as shown above can be due the assumption of Gaussian turbulent scales and Lagrangian time scales used in the normalized Langevin equation.

5. CONCLUSIONS

Normalized Langevin equations have been employed to predict particle velocity statistics in a pipe flow with anisotropic and inhomogeneous turbulence in the wall normal direction. Eulerian statistics were provided by LES performed with JetCode. The model results were compared to LES data finding good agreement in axial mean velocity profiles, the rms of velocities modeled by Langevin equations exhibit some difference with LES results so that model will be reviewed.

REFERENCES

- [1].Dehbi, A. *Validation against DNS statistics of the normalized Langevin model for particle transport in turbulent channel*. Powder Technology, 200, 60 – 68, 2010.
- [2].Wang, L-P., Stock, D. E. *Dispersion of heavy particles by turbulent motion*. J. Atm. Sci., 50 (13), 1897 – 1913, 1993.
- [3].Pierce, C. D., Moin, P. *Progress-variable approach for large eddy simulation of turbulent combustion*. Report No. TF-80, Mechanical Engineering Department, Stanford University, 2001.
- [4].Kim, J., Moin, P. *Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations*. J. Comput. Phys. 59, 308 – 323, 1985.
- [5].Torres, MJ. *Estudio numérico de flujo turbulento cargado con partículas sólidas a través de canales y tuberías de sección variable*. Tesis Doctoral en trámites de publicación. Universidad Politécnica de Madrid.

LANGEVIN APPROACH FOR MODELLING OSTWALD RIPENING IN EMULSIONS

Rodríguez-López, Gieberth W

Toro-Mendoza, Jhoan

gieberth@gmail.com

jtorom@ivic.gob.ve

Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Centro de Estudios Interdisciplinarios de la Física. Laboratorio de Dispersiones e Interfases.

Carretera Panamericana, Km 11. Altos de Pipe. Caracas-Venezuela.

Abstract. *The main mechanism of phase separation in nanoemulsions is Ostwald ripening, in which smaller droplets are solubilized and the dissolved molecules diffuse into the larger droplets. The kinetic theory describing this process is the one proposed by Landau, Slyosov, and Wagner, known as LSW theory. However, the assumptions on which this theory is based are not strictly applicable to Brownian droplets forming nanoemulsions systems. In this paper an alternative to the LSW theory is proposed, where the evolution of the size of individual droplet includes the mechanism of solubilization and those related to thermal fluctuations. A term related to the probability of absorption of molecules dispersed phase dispersed in the medium is also included. The numerical evaluation of the model was performed using the Runge -Kutta method of fourth order. Typically, this method is used for solving ordinary differential equations. However, the equations involved in this study are stochastic leading to a modification of the traditional method.*

Keywords: Nanoemulsions, Ostwald ripening, Langevin equation.

1. INTRODUCTION

An emulsion is a colloidal system consisting of droplets suspended into another liquid phase. These systems are thermodynamically unstable because its Gibbs free energy is positive. If the droplet size is between 20 and 500 nm are referred to as nanoemulsions [1]. In nanoemulsions, Ostwald ripening (OR) is the main mechanism of phases separate. This is a process where the smaller droplets are solubilized into the continuous phase medium and the larger droplets increase in size since they adsorb the molecules dissolved in the continuous medium as a consequence of the difference in chemical potential. This process depends on the solubility of the

droplets: the smaller ones are more soluble compared to larger ones [1-3]. The dependence of the solubility with the radius of curvature is given by the Kelvin equation

$$c(r) = c(\infty) \exp\left[\frac{2\gamma V_m}{rRT}\right], \quad (1)$$

where $c(r)$ is the solubility of a particle of radius r , and $c(\infty)$ solubility in the continuous phase, γ is the interfacial tension between the dispersed phase and the continuous phase, V_m the molar volume of the dispersed phase, R the universal constant of the gases, and T the absolute temperature. The model that describes the kinetics of OR is the LSW (Lifshitz, Slyosov, and Wagner) theory [4,5]. This theory was conceived to describe OR in solid systems. The LSW theory applied to emulsions means that the reduction of the size is only due to an increase of the solubility of the smaller droplets in the continuous phase. LSW theory is based on the following assumptions: (1) the particles are fixed in space, (2) the system is at infinite dilution, (3) the concentration of the dispersed phase in the surrounding liquid (continuous phase) is the same throughout the system except in the vicinity of the droplets in the order of its radius, (4) the system is supersaturated, and (5) the individual molecules are transported through the dispersed phase purely by molecular diffusion [4-6]. However, these assumptions may not be strictly applicable to nanoemulsions. First, the droplets are not fixed since they exhibit Brownian motion. The latter is also related to the hypothesis of absence of interactions, since the solely movement of the particles creates hydrodynamic interaction between them. In this regard Ermak and McCammon showed the importance of including hydrodynamic interactions as this markedly affects the dynamics of even very dilute systems. [7] Second, the condition of supersaturation in systems of immiscible liquids can be met only on a few conditions.

One of the main results of the LSW theory is the expression for the rate of ripening, which is given by

$$\omega = \frac{dr_c^3}{dt} = \frac{8\gamma D_0 c(\infty) V_m^2}{9RT}, \quad (2)$$

where r_c is the critical radius. This parameter defines a size at which the droplets with radius $r > r_c$ tend to increase at the expense of smaller ones, and for droplets with $r < r_c$ solubilize into the medium. D_0 is the molecular diffusion coefficient of the dispersed phase in the continuous phase. According to equation (2) the interfacial tension is another important parameter, which is considered constant throughout the process. Meinders *et al.* [8] showed that the viscoelasticity has a major role in the OR process. In 2008, Wooster *et al.* [9] studied how the physical properties of the dispersed phase and the nature of the surfactant layer formed at the interface affect the stability. Another report by Georgieva *et al.* [10] showed that elastic compression of the interfacial layers formed by different surfactants plays a role in the emulsion stability dominated by solubilization. Furthermore, Chebil *et al.* [11] report the effect of the oils and their mixtures on the stability of nanoemulsions. These studies show that there are a lot of variables that must be considered in this process, but they can be summarized as the important effect of viscoelastic properties on the rate of ripening. Besides, it is plausible to assume that the thermal fluctuations affect the stability of nanometric droplets, being more appreciable as the droplets are smaller.

For these reasons it could be asked: *what other mechanisms different to solubility may be involved in OR?* This paper aims at presenting a model to figure out possible answers to the above question and circumvent some of the assumptions required by LSW. For this purpose, a Langevin type model that includes both the solubility and the mechanisms related to the ratio of

the energy from the Brownian fluctuations and the viscoelastic properties of the drop, and the probability that droplets adsorb molecules present in the medium is presented.

2. MODEL FOR THE RADIUS VARIATION OF A NANOEMULSION DROPLET

During OR, the droplets forming a nanoemulsion show a variation of mass which brings a change of the radius thereof. Thus, a model for the variation of the mass based on the Langevin equation [12] that contains other possible mechanisms involved in the process is proposed

$$\frac{dm(t)}{dt} = -\zeta m(t) + B_{\downarrow}(t, r, \eta) + C_{\uparrow}(t, r, \lambda). \quad (3)$$

In this model the term $-\zeta m(t)$ represents the solubility of one single droplet in the medium, $B_{\downarrow}(t, r, \eta)$ is a random function that models the internal dissipation mechanism of energy (related to the cohesive energy), and $C_{\uparrow}(t, r, \lambda)$ is related to the probability of adsorb dissolved molecules and that's why it depends on the mean free path λ . It should be mentioned that B and C depends on the size of the drop and the symbols $\uparrow \downarrow$ represent an increase or a decrease caused by the mechanism, respectively.

In Figure 1 we show a schematic representation of the OR mechanism. The droplet labeled with an A represents the particles with a size less than the critical radius. The droplet labeled with B represents the particles gaining mass as a product of molecular transfer. Smaller particles (in yellow) represent molecules of the dispersed phase solubilized into the medium. Here, smaller droplets loss mass by solubilization but also by the effect of thermal disturbances which attempt against the cohesive energy. We assume that this additional mechanism is mediated by the viscoelasticity of the surface. The large droplet gain mass by the adsorption of molecules. Their low solubility is due to their high size. The smaller ones can also adsorb molecules because there is a probability for it as they travel into the medium. However, in terms of critical radius, the dominating mechanism will depend on the mean free path and mechanical stability of the droplet.

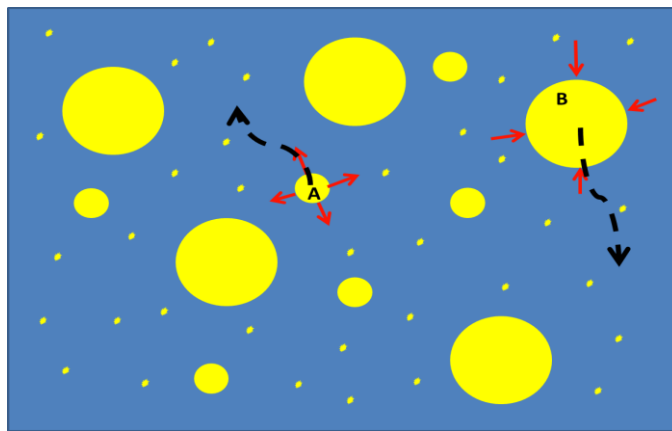


Figure 1 - Diagram of a nanoemulsion with occurrence of OR (see text for details).

In OR experiments, the evolution of the droplets radii is measured. Equation (3) represents the variation of mass. In analogy to equation (2), assuming constant density, spherical droplets we obtain an equation with two additional terms

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{\zeta r}{3\rho} + \frac{B_{\downarrow}(t,r,\eta)}{\rho 4\pi r^2} + \frac{C_{\uparrow}(t,r,\lambda)}{\rho 4\pi r^2}. \tag{4}$$

In the last equation we note that as the droplet size increases the solubility dominates. On the contrary, the droplet size decreases the predominant mechanisms are those related with thermal fluctuation and an increase in solubility will play a role also.

3. COMPUTATIONAL MODELING AND RESULTS

The numerical solution of Eq. (4) was obtained by the Runge -Kutta method of fourth order. At this stage of our work the term $B_{\downarrow}(t,r,\eta)$ will not be considered. Regarding the term $C_{\uparrow}(t,r,\lambda)$ should say that governed by a Poisson distribution because as time passes decreases the chance to get back another broken molecule. One of the first results show that when the drop is highly soluble , in other words, the first term on the right side in Eq. (4) is the dominant system see Fig.2a.

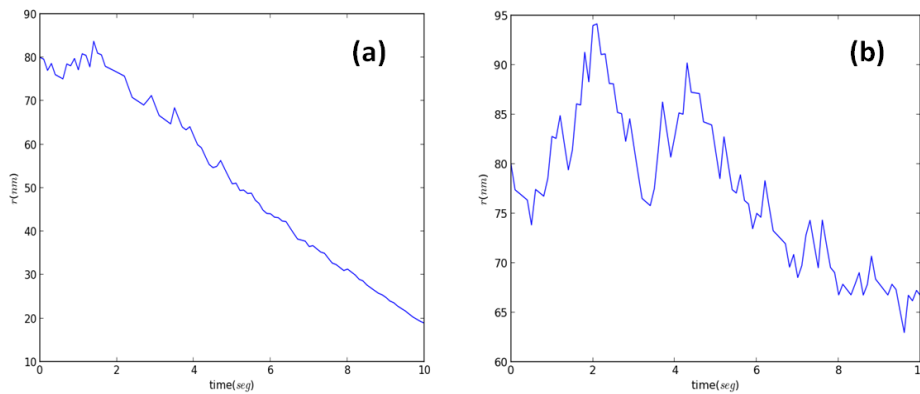


Figure 2 – (a) Variation of the radio, if highly soluble in the continuous phase. (b) Change the radio, when the two mechanisms are competing.

The case where there is a predominant mechanism (see Figure 2b) is also shown. For this case, the fluctuations of $C_{\uparrow}(t,r,\lambda)$ cannot be neglected. Finally we will have a solution when the dominant process is $C_{\uparrow}(t,r,\lambda)$ (see Figure 3) , in this context we drop growth .

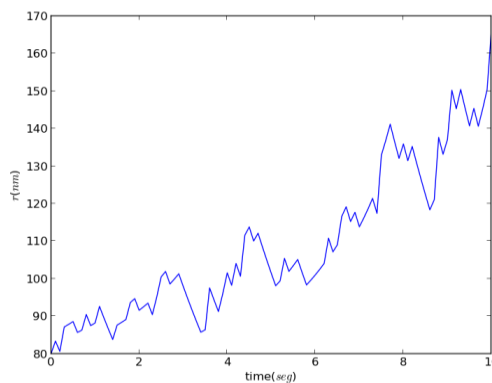


Figure 3 - Variation of the radius, when $C_{\uparrow}(t,r,\lambda)$ is the dominant mechanism .

However in Fig.3 an asymptotic solution is not obtained. This can be due to a lack of setting proper boundary conditions to fulfill the steady state condition of the system. A possible boundary condition to do is to include a radius at which gravity influence the ripening process.

4. CONCLUSIONS

It is possible to model the evolution of the size of a Brownian emulsion droplet by means of a Langevin equation for the droplet radius taking into account other possible mechanisms behind the mass variation. We propose that two terms has to be added: one regarding the effect of the thermal disturbances leading to mass loss, and a second one regarding the probability of adsorb molecules present in the continuous medium. The results suggest that this procedure can lead to a better understanding of Ostwald ripening in emulsions.

REFERENCES

- [1].Solans, C., Izquierdo, P., Azemar, N., & Garcia-Celma, M., Nano-emulsions, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. Vol. 10, n. 3-4, pp. 102-110, 2005.
- [2].Kabalnov, A., Ostwald ripening and related phenomena, *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol.22, n.1, pp. 1-12, 2001.
- [3].Porras, M., Solans, C., González, C., Martínez, A., Guinart, A., & Gutiérrez, J., *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspect*, vol.249, n.1, pp. 115-118, 2004.
- [4].Lishitz, I., & Slyozov, V., The kinetics precipitation from supersaturate solid solutions. *Journal Physics Chemical Solids*, vol. 19, n. 1, pp. 35–50, 1961.
- [5].Wagner, C., Theorie der altering von niederschlagen a durch umlosen. *Z. Elektrochem*, vol. 65, n. 7, pp. 581–5694, 1961.
- [6].Finsy,R., On the critical radius is Ostwald ripening. *Langmuir*, vol. 20, n. 7, pp. 2975–2976, 2004.
- [7].Ermak, D., & McCammon, J., Brownian motion with hydrodynamic interactions. *Journal Chemical Physics*, vol. 69, n.4, pp. 1352-1360, 1978.
- [8].Meinders, M., Kloek, W., & van Vliet, T., Effect of surface elasticity on Ostwald ripening in emulsions. *Langmuir*, vol. 17, n. 13, pp. 3923–3929, 2001.
- [9].Wooster, T., Golding, M., & Sanguansri, P., Impact of oil type on nanoemulsi3n formation and Ostwald ripening stability. *Langmuir*, vol. 24, n. 22, pp. 12758–12765, 2008.
- [10].Georgieva, D., Schmitt, V., Leal-Calderon, F., & Langevin, D., On the possible role of surface elasticity in emulsion stability. *Langmuir*, vol. 25, n. 10, pp. 5565–5573, 2009.

- [11].Chebil, A., Desbrieres, J., Nouevel, C., Six, J., & Durand, A., Ostwald ripening of nanoemulsions stopped by combined interfacial adsorptions of molecular and macromolecular nonionic stabilizers. *Colloid and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 425, n. 1, pp. 24–30, 2013
- [12].Lemons, D., & Gythiel, A., Paul Langevin’s 1908 paper “On the theory of Brownian motion” [“Sur la théorie du mouvement brownien,” C.R. Acad. Sci. (Paris) 149, 530-533 (1908)]. *American Journal of Physics*, vol.65, n.11, pp. 1079-1081, 1997.

SENSITIVITY ANALYSIS OF END PRESSURES AND FLOWS WITH RESPECT TO A BLOCKAGE INSIDE A PIPELINE.

Ignacio Rubio Scola

Gildas Besançon*

Didier Georges

{*ignacio.rubioscola, gildas.besancon, didier.georges*}@gipsa-lab.fr

Département Automatique, GIPSA-lab. Institut polytechnique de Grenoble. Saint Martin d'Hères, France.

*Institut Universitaire de France.

Marcos L. Guillén

Jean-F. Dulhoste

Rafael Santos

{*marcosg, djean, rsantos*}@ula.ve

Grupo Termofluidodinámica. Dpto. De Ciencias Térmicas. Escuela de Ing. Mecánica. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

Abstract. *The present paper is based on the sensitivity analysis of input and output pressures and flows of a pipeline for the detection and location of a blockage in a pipeline. To that end, three ways of modeling a blockage in a pipe have been designed. The first model assumes that the blockage is punctual like an orifice plate placed online in the pipeline. For the second and third model, a longitudinal blockage is assumed along the pipeline. In the second model, it is only considered a reduction of the pipeline cross-section in a particular stretch of the pipeline. In the third model, the blocked segment is modeled by considering two orifice plates and between the plates there is a blocked pipe stretch. These models have four different outputs, pressure and flow rate at the input and pressure and flow rate at the output. The aim of this work is to determine which pair of outputs have the highest sensitivity to the change of blockage position in order to improve the detection and location of the blockage. In this study, the energy for each output and for each position is calculated and the magnitude of the energy variation with respect to blockage position is then obtained. Numerical simulations are presented for the different models.*

Key words: Pipeline, Sensitivity analysis, Blockage, Modeling

1 INTRODUCTION

Fluid transportation by pipeline is really cheap and efficient, but faults, such as leaks or blockages, can generate a loss in money and repairing time if there are not detected in short time. A lot of work has been done on leaks detection and location but not so much on blockages detection and location (Wang et al. [1] and Guillén et al. [2]). Particularly, in this work, a sensitivity analysis is done to show how detectable is the position of a blockage when the input and output flows and pressures are measured.

The paper is organized as follows: section 2 presents the different models considered and section 3 explains the sensibility analysis done. Section 4 then shows the results in simulation, and section 5 concludes the paper.

2 DIFFERENT PIPELINE MODELS WITH LUMPED BLOCKAGE

As mentioned in Chaudry [3], if convective changes in velocity and constant liquid density could be considered, then the dynamics of the fluid in a pipeline can be described by the Water Hammer partial differential equations:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + Ag \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{fQ|Q|}{2DA} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

where H means the pressure head (m) and Q the flow rate in the pipeline (m^3/s), both varying in time t (s) and space z (m). In addition, the wave speed in the fluid (m/s), the gravitational acceleration (m/s^2), the cross-sectional area of the pipe (m^2), the diameter of the pipe (m), the friction coefficient, and the pipe length (m) are represented by the constant parameters c , g , A , D , f and L respectively. The boundary conditions on Q, H , for $z \in \{0, L\}$ and the initial conditions for the fluid dynamics must be fixed at $Q(z, 0)$, $H(z, 0)$ for $z \in [0, L]$. The partial differential equations Eq.(1) must be discretized in space in order to solve them numerically by using a finite-difference approximation of the spatial differential operators. If the boundary conditions on $Q(0, t)$ and $H(L, t)$ are imposed, then the equations for each section (i) are:

$$\begin{aligned} \dot{H}_i &= -\frac{c^2}{gA} \frac{Q_{i+1} - Q_i}{z_{i+1} - z_i} \\ \dot{Q}_i &= -Ag \frac{H_i - H_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} - \frac{f_i Q_i |Q_i|}{2DA} \end{aligned} \quad (2)$$

where the H_i 's and Q_i 's refer to the approximate values of H, Q at z_i 's and Fig. 1 illustrates the discretization.

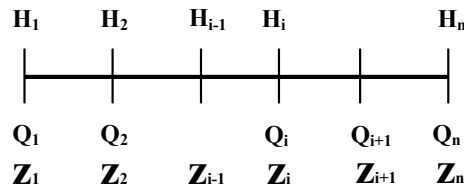


Figure 1: Pipeline discretized in n sections.

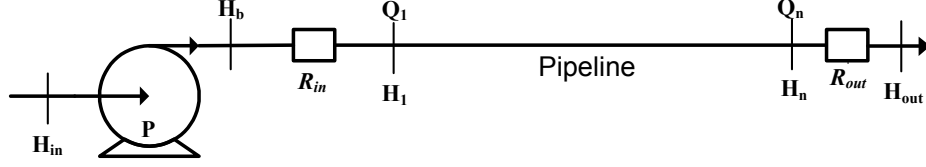


Figure 2: Pump-Restriction-Pipeline-Restriction configuration.

The boundary conditions will be given by a pump and a restriction that are connected at the beginning of the pipeline and at a restriction the end of it, as shown by Fig. 2. As the dynamics of the pump and the restrictions are much faster than the pipeline the static equations could be used, for the pump and the first restriction the equation are:

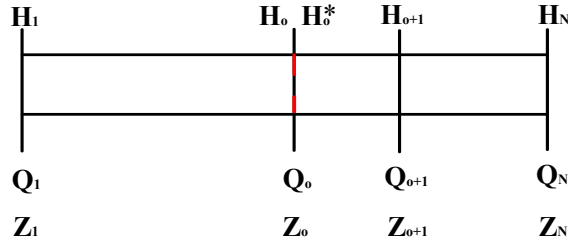
$$\begin{aligned} H_b - H_{in} &= A_P Q_1^2 + B_P Q_1 + C \\ H_b - H_1 &= R_{in} Q_1^2 \end{aligned} \quad (3)$$

and for the second restriction:

$$H_N - H_{out} = R_{out} Q_N^2 \quad (4)$$

where H_{in} and H_b are the pressure in the input and output of the pump, H_{out} is the output pressure of the second restriction and the constants parameters A_P , B_P , C_P are the pump parameters and R_{in} and R_{out} are the input and output restriction values respectively.

2.1 Blockage considered as punctual


 Figure 3: Pipeline with a punctual blockage at z_o .

The first model is based on the hypothesis that the blockage is punctual at position z_o (see Besançon et al. [4]), as shown by Fig. 3, the relation between the pressure before the blockage (H_o) and after (H_o^*) could be described as an orifice plate, so by using Bernoulli's equation the flows on the blockage is modified as follows:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_o &= -Ag \frac{H_{o+1} - H_o^*}{z_{o+1} - z_o} - \frac{f_o Q_o |Q_o|}{2DA_o} \\ H_o^* &= H_o - \frac{Q_o^2}{2gA^2} \left[\left(\frac{A}{A_o} \right)^2 - 1 \right] - h_L \end{aligned} \quad (5)$$

In the second equation of (5) h_L represents the pressure losses due to the blockage, if the worst case of $h_L = 0$ is considered (its geometry is unknown), then the blockage modeled is bigger than the real one. Equations 2 describes the dynamics of the other pressures and flows.

2.2 Blockage considered as a section with a reduced cross section area

For the second model the blockage is modeled as a piece of pipeline (with length l_o) which its cross section area is reduced (from A to A_o), Fig. 4 illustrates the blockage.

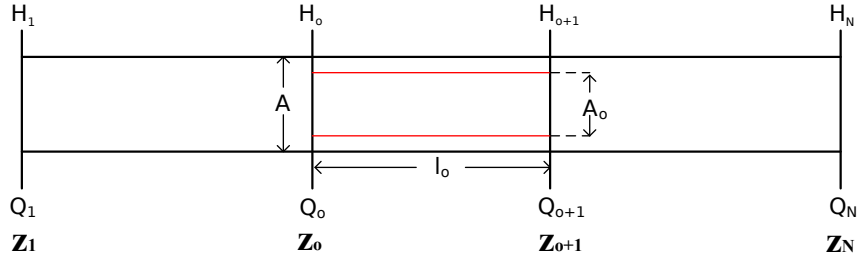


Figure 4: Pipeline with a cross section reduction between z_o and z_{o+1} .

The equations describing the pressure (H_o) at the beginning and the flow (Q_{o+1}) at the end of reduced part of the pipeline are modified (with respect to Eq. 2):

$$\begin{aligned} \dot{H}_o &= -\frac{c^2}{gA_o} \frac{Q_{o+1} - Q_o}{l_o} \\ \dot{Q}_{o+1} &= -A_o g \frac{H_{o+1} - H_o}{l_o} - \frac{f_{o+1} Q_{o+1} |Q_{o+1}|}{2DA_o} \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 Blockage considered as a reduced section with both sides geometry

The last model is based on the second one, but it also takes into account the phenomena that occurs in the borders of the longitudinal blockage where first exists a contraction in the cross section of the pipe (from A to A_o) and then occurs an expansion of it (from A_o to A), shown in Fig. 5.

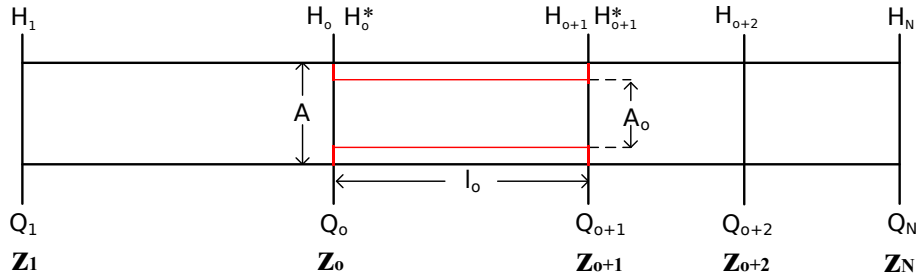


Figure 5: Pipeline with a cross section reduction between z_o and z_{o+1} and the sides effects.

Equation (7) describes the dynamics of the pressures and the flows before (H_o and Q_{o+1}) and after the blockage (H_{o+1} and Q_{o+2}).

$$\begin{aligned}
\dot{H}_o &= -\frac{c^2}{gA_o} \frac{Q_{o+1} - Q_o}{l_o} \\
\dot{Q}_{o+1} &= -A_o g \frac{H_{o+1} - H_o^*}{l_o} - \frac{f_{o+1} Q_{o+1} |Q_{o+1}|}{2DA_o} \\
\dot{H}_{o+1} &= -\frac{c^2}{gA} \frac{Q_{o+2} - Q_{o+1}}{z_{o+2} - z_{o+1}} \\
\dot{Q}_{o+2} &= -Ag \frac{H_{o+2} - H_{o+1}^*}{z_{o+2} - z_{o+1}} - \frac{f_{o+2} Q_{o+2} |Q_{o+2}|}{2DA}
\end{aligned} \tag{7}$$

The pressures just after the beginning and the end of the blockage are H_o^* and H_{o+1}^* , are modified using Bernoulli's in order to represent the change in the cross section area of the pipe.

$$H_o^* = H_o - \frac{Q_o^2}{2gA^2} \left[\left(\frac{A}{A_o} \right)^2 - 1 \right] \quad \text{and} \quad H_{o+1}^* = H_{o+1} - \frac{Q_{o+1}^2}{2gA_o^2} \left[\left(\frac{A_o}{A} \right)^2 - 1 \right] \tag{8}$$

Three different ways of modeling a blockage are shown in this section, next section gives a methodology for comparing the sensibility of the different outputs respect to the blockage's position.

3 SENSITIVITY ANALISYS

In order to quantify the effects of different blockage's positions in the measured variables, the sensibility (S) of one output (y) respect to the position (z) is introduced as the variation of the energy (E) of that output respect to the position (z):

$$S_z^y = \frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\int_0^T y(z)^2 dt \right) \tag{9}$$

The sensibility increases with the change of the energy of an output when the position moves, what implies that, the bigger this function is, the easier is to distinguish two different locations from that output. Sensibility analysis is also useful for parameter identifiability analysis (see Dötsch et al. [5]). In the next section, the three models will be simulated with the same inputs conditions and the sensibility analysis will be done for each measured variable.

4 NUMERICAL RESULTS

Using a simulation software (Simulink from MathWorks ©) the three models are simulated with the same inputs, $H_{in} = 1 + 0.5 \sin(2\pi t)$ (m) and $H_{out} = 1$ (m). Then defining the measured variables as H_1 , H_N , Q_1 and Q_N the eq. (9) is calculated for each model and each output. The time windows used is $T = 2s$ and 83 different positions are simulated taking 85 sections for the discretization of the pipeline. Table 1 shows the numerical values of the average of the absolute values of the sensibility. In order to understand this table, the values of the pressures H_1 and H_N are around 6.5 (m) and 3.5 (m) and the flows are near $4.3 \cdot 10^{-3}$

Table 1: Energy variation average for each output and each model.

Output	Model 1	Model 2	Model 3
H_{in}	$2.31 \cdot 10^{-05}$	$1.42 \cdot 10^{-04}$	$1.43 \cdot 10^{-04}$
H_{out}	$8.27 \cdot 10^{-07}$	$1.31 \cdot 10^{-05}$	$1.35 \cdot 10^{-05}$
Q_{in}	$8.52 \cdot 10^{-12}$	$9.35 \cdot 10^{-12}$	$9.46 \cdot 10^{-12}$
Q_{out}	$1.31 \cdot 10^{-12}$	$2.27 \cdot 10^{-11}$	$2.33 \cdot 10^{-11}$

(m^3/s) The second and third model have a similar sensibility but the first model has a minor sensibility than last two. The best pair of measures with bigger sensibility are H_{in} and Q_{out} , but it is still very low and if noise around 1% is injected in the outputs then two different positions will be indistinguishable.

5 CONCLUSIONS

In this work a sensibility analysis respect to the position of a blockage in a pipeline has been done for three different way of modeling a blockage. The numerical results shows that there are two model which are more sensible and in all the models there is a pair of outputs that show a bigger sensibility over the other two. In all the cases the values of sensibility founded are very low and to distinguish between two different positions is very difficult. In the future this sensitivity analysis will be done to more complex models to increase the value of this sensibility and guarantee a strong distinguishability between two different blockage positions.

Acknowledgements

This work was supported in part by a French-Venezuelan collaboration program ECOS-Nord V11M02/ PI-2010000303 Fonacit, Fundayacucho Venezuela.

REFERENCES

- [1] WANG, X. J., LAMBERT, M. F., & SIMPSON, A. R., Detection and location of a partial blockage in a pipeline using damping of fluid transients, *Journal of water resources planning and management*, vol.131, no. 3, pp. 244-249, 2005.
- [2] GUILLÉN, M., DULHOSTE, J-F., BESANÇON, G., & SANTOS, R., Study of A Flow Model for Detection and Location Of Leaks and Obstructions In Pipes. *9th International Conference of Modeling, Optimization and Simulation*, 2012.
- [3] CHAUDRY, H., Applied Hydraulic Transients. Van, 1979.
- [4] BESANÇON, G., RUBIO SCOLA, I., GUILLÉN, M., DULHOSTE, J.F., SANTOS, R., & GEORGES, D., Observer-based detection and location of partial blockages in pipelines. *2nd International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems.*, 2013.
- [5] DÖTSCH H.G.M., & VAN DEN HOF, P.M.J., Test local structural identifiability of high-order non-linearly parametrized state space models. *Automatica*, vol. 32(6), 875-883, 1996.

ANÁLISIS NUMÉRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE EFICIENCIAS HIDRÁULICAS EN TURBINAS DE FLUJO LIBRE

Gustavo José Marturet Pérez

marturet@gmail.com

Instituto Universitario de Tecnología del Estado Bolívar, IUTEB.

Departamento de Mecánica.

Sector Fuente Luminosa. Bolívar - Venezuela

Resumen. *Aplicaciones tecnológicas de energías limpias han permitido el desarrollo de turbinas de flujo libre o corriente libre y con ellas comunidades pueden disponer de energía eléctrica. Algunas investigaciones en el área de turbinas de flujo libre indican mejores desempeños en las de tipo Gorlov de tres álabes helicoidales. Esta investigación pretende modelar numéricamente un prototipo de turbina Gorlov a fin de determinar el campo de presión y de flujo con miras a obtener la eficiencia hidráulica según la velocidad de flujo y de giro de la turbina. La turbina posee una configuración de tres álabes helicoidales tipo NACA 0020 sobre los que se desarrollan fuerzas de arrastre y sustentación que inciden sobre la eficiencia hidráulica. El modelo matemático de flujo se plantea en un dominio 2D bajo la premisa de flujo estable y se pretende resolver con técnicas de análisis numérico mediante software de tipo comercial. En estas condiciones la cuantificación de la eficiencia hidráulica para un flujo de 5 m/s y 55 W de potencia de turbina indica valores de 99% de eficiencia.*

Palabras Clave: Turbina Gorlov, eficiencia hidráulica, dinámica de fluidos computacional.

1. INTRODUCCIÓN

En lo particular nuestro país, referencia en el manejo y producción de energía hidroeléctrica, no ha logrado satisfacer en su totalidad territorial las necesidades de electrificación constituyéndose así una excelente oportunidad para aplicaciones del uso de energías alternativas. Sin embargo, algunas fuentes alternativas de energías, limpias y de bajo impacto ambiental, como lo son turbinas hidrocínicas no escapan a las dificultades por altos costes de materiales y de crear modelos susceptibles de investigación, medición, análisis y optimización. Como salida a tales inconveniencias el uso de técnicas de simulación y modelación apoyadas en herramientas CFD son opciones para su desarrollo.

Algunas investigaciones [1], [2] y [3] en el ámbito de CFD, como en este estudio, apuntan al desarrollo de turbinas para generación de energía fundamentadas en los potenciales hidroeléctricos de las corrientes marinas y de los ríos. La turbina hidrocínica, modelo Gorlov

(véase Figura 1), estaría sumergida en un río aprovechando su potencial hidráulico y con el accionar de un generador suministraría la energía eléctrica.

En ausencia de prototipos de turbinas hidrocinéticas construidas en país, se desconoce con fidelidad el comportamiento particular de éstas frente a las condiciones variables de servicio u operación que revelen sus actuaciones globales como función de los parámetros operativos: caudal de fluido, potencia generada y velocidad de giro entre otros.

Actualmente, tendencias en el análisis numérico y CFD de turbinas hidrocinéticas apuntan a simular bajo concepciones de dominios computacionales en mallados bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D). Reservándose aquellas simulaciones 2D para las primeras etapas del diseño dado los menores costes en tiempo y recursos computacionales que requieren [1]. Por otra parte, modelizaciones 2D de turbinas Gorlov dejan abierta la posibilidad de un análisis más profundo con aplicaciones tridimensionales [3]. Investigaciones experimentales de turbinas Gorlov apuntan a la construcción de un prototipo para la medición de torque, RPM y velocidad del flujo a fines de construir sus curvas características.[4]

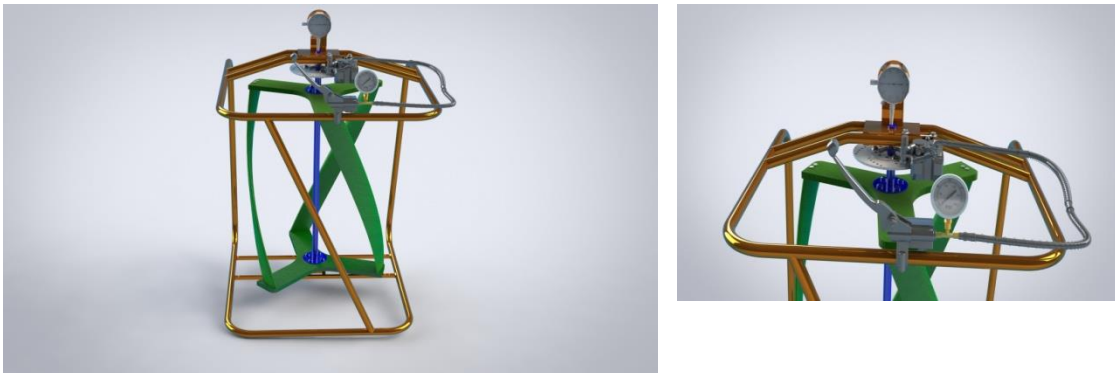


Figura 1. Modelo de Turbina Gorlov e instrumental de mediciones. [4]

Finalmente, se pretende modelar numéricamente un prototipo de turbina Gorlov a fin de determinar el campo de presión y de flujo con miras a obtener la eficiencia hidráulica según la velocidad de flujo y de giro de la turbina. Geométricamente el modelo experimental de turbina Gorlov a simular comprende unos 450 mm de diámetro y 600 mm de alto con perfil alar tipo NACA 0020 de tipo helicoidal.

2. MODELACIÓN NUMÉRICA

Una variable importante de cuantificar en las turbinas es su eficiencia global η_t . Algunos autores [5] y [6] la establecen en similares términos previo a definir: la eficiencia interna η_i , la eficiencia volumétrica η_v , la eficiencia hidráulica η_h y eficiencia mecánica η_m .

La eficiencia interna η_i , cuantifica los cambios de propiedades que sufre el fluido entre la entrada y la salida de la turbina como producto de todas las irreversibilidades que ocurren por efectos volumétricos y roce viscoso o hidráulico. Así pues:

$$\eta_i = \frac{\text{Potencia entregada al rotor de la turbina}}{\text{Potencia disponible en el fluido}} = \frac{\gamma Q_0 (H-h_f)}{\gamma Q H} \quad (1)$$

Donde

Q_0 = caudal útil, es decir solo el caudal que cede su energía al rotor

Q = caudal suministrado a la turbina

H = altura neta de la turbina que valora la altura energética absorbida por efectos de la presión y altura cinética en la ecuación de Bernoulli

hf = altura energética perdida por efectos de fricción

γ = peso específico del fluido.

La eficiencia volumétrica η_v , expresa las pérdidas del fluido que no tienen la oportunidad de transferir su energía al rotor de la turbina.

$$\eta_v = \frac{Q_0}{Q} \quad (2)$$

La eficiencia hidráulica η_h , cuantifica las irreversibilidades que ocurren en la turbina por efectos del roce viscoso o hidráulico y de superficie, de tal manera que sobre ella influyen las pérdidas por rozamiento de superficie y rozamiento por forma.

De tal manera que:

$$\eta_h = \frac{H-hf}{H} \quad (3)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2) y (3) en la definición de η_i , se tiene:

$$\eta_i = \eta_v \eta_h \quad (4)$$

Obsérvese en las ecuaciones (2) y (3) que la eficiencia interna se hace igual a la eficiencia hidráulica si no existen pérdidas volumétricas. La eficiencia mecánica η_m , expresa las pérdidas ocasionadas por efectos de la fricción entre las partes mecánicas de la turbina. De manera que:

$$\eta_m = \frac{\text{Potencia que aparece en el eje}}{\text{Potencia entregada al rotor}} = \frac{T \omega}{\gamma Q_0 (H-hf)} \quad (5)$$

Para la cual T , es el torque en el eje de la turbina y ω es su velocidad angular. Considerando todas las irreversibilidades involucradas, la eficiencia global de la turbina η_t , tiene por expresión:

$$\eta_t = \frac{\text{Potencia que aparece en el eje}}{\text{Potencia disponible en el fluido}} = \frac{T \omega}{\gamma Q H} \quad (6)$$

Sobre los álabes [7] sometidos a la acción de fluidos en movimiento se desarrollan presiones y fuerzas tangenciales a las superficies, éstas últimas a consecuencia de los efectos viscosos; de tal manera que ambas, la presión y los esfuerzos de corte, originan fuerzas de sustentación y arrastre sobre los álabes.

Con la aplicación de software de tipo comercial para CFD es posible determinar el torque producto de la presión T_{pres} . También el torque viscoso T_{visc} , producto de la fricción que actúa sobre la turbina Gorlov. De tal manera que con herramientas de simulación se pueden obtener datos para curvas características de turbinas.

Dado que la eficiencia hidráulica considera los efectos de fricción y de superficie, se tiene:

$$\eta_h = \frac{(T_{pres} - T_{visc})\omega}{T_p \omega} = \frac{(T_{pres} - T_{visc})}{T_{pres}} = \frac{T_n}{T_{pres}} \quad (7)$$

Donde T_n es el torque neto.

En la necesidad de modelar la turbina Gorlov partimos de un dominio computacional discretizado con el empleo pre-procesadores para la elaboración de la malla, tal y como se muestra en la Figura 2.

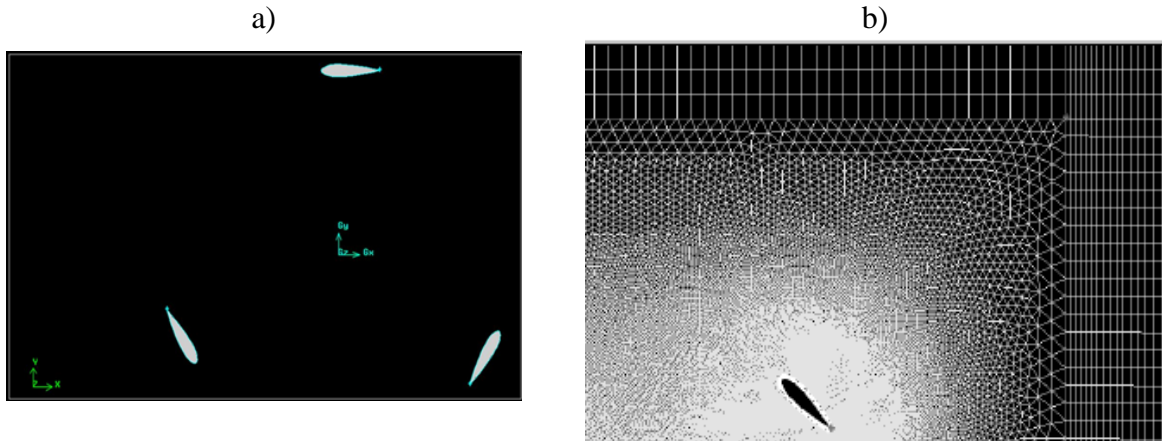


Figura 2. a) Plano 2D de turbina Gorlov. b) Volúmenes de la malla de la turbina Gorlov mixtos: cuadriláteros y triángulos.

La turbina estará inscrita en una malla de volúmenes del tipo cuadriláteros para las zonas aguas arriba y aguas abajo del rotor y triangulares en la zona de la interacción turbina-flujo circundante a sus tres álabes. Los tres álabes separados a 120° , corresponden a un perfil simétrico de 75 mm de cuerda siguiendo las especificaciones prescritas para un modelo tipo NACA 0020.

En toda la simulación las ecuaciones de continuidad y momentum son resueltas usando el método SIMPLE. Los términos convectivos se discretizaron usando 2do orden aguas arriba. Para la zona de entrada de flujo al dominio se fijó la velocidad de entrada de manera uniforme, mientras que la salida se fijó la presión. Los álabes rotan sobre su eje central a las revoluciones del estudio. La modelación numérica se hizo suponiendo un régimen de trabajo estable en la turbina cuando el fluido se modela en 2D procurando soluciones computacionalmente económicas. El análisis de convergencia para el dominio computacional indicó que para con una malla de 166684 nodos un error de 0,5%, una calidad de malla que oscila entre 0,78 y 0,86 cuando se aplica el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ estándar ser la mejor opción de simulación de esta investigación.

3. RESULTADOS

Simulaciones sucesivas arrojaron como resultados mejores desempeños de la Gorlov en un rango de velocidades entre 3 y 5 m/s cuando las rpm del estudio oscilan entre 10 y 100RPM. La Figura 3 muestra un campo de velocidades para el fluido a 5 m/s aguas arriba con velocidades de flujo de $4,35e-03$ m/s en la zona aguas abajo cuando gira a 10 RPM.

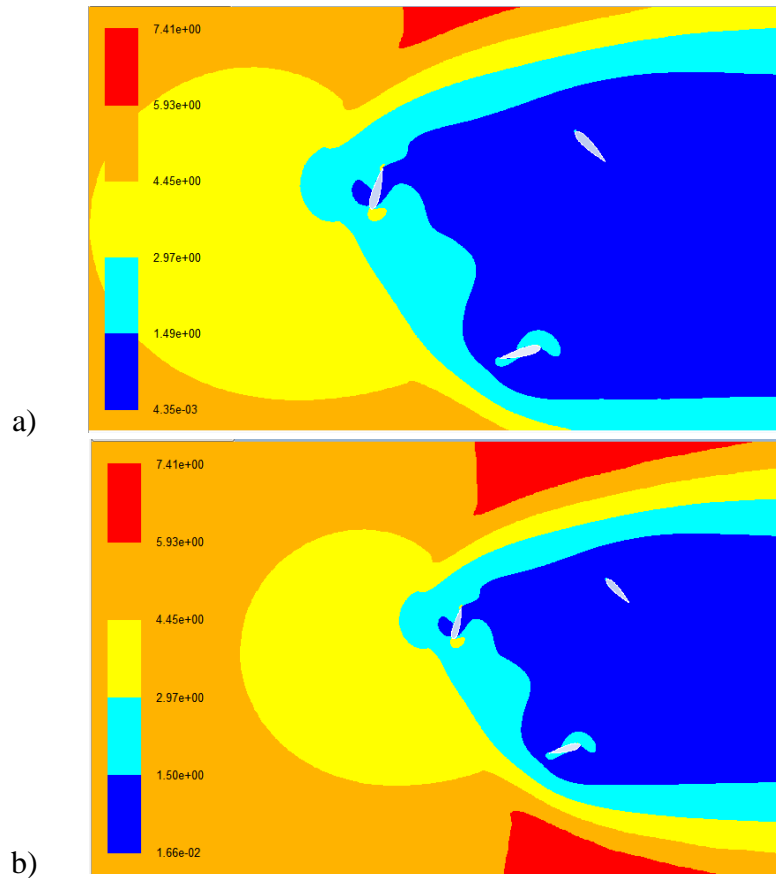


Figura 3. Campo de velocidades de la simulación de turbina Gorlov. a) 5 m/s a 10 RPM. b) 5 m/s a 100 RPM.

Obtenidos los campos de flujo y de presión mediante software de tipo comercial se procedió con la valoración del torque producto de la presión T_{pres} y del torque viscoso T_{visc} , a fin de calcular las eficiencias hidráulicas. La Tabla 1 muestra sus resultados expresados en la condición de mejor desempeño alcanzado.

Tabla 1. Valores de eficiencia para flujos de 5 m/s a diferentes RPM en la turbina Gorlov simulada

V. flujo(m/s)	RPM	Torque neto (N-m)	T.pres (N-m)	Eficiencia(%)
5	10	39,68	39,94	99,35
5	50	37,20	39,05	95,27
5	100	34,09	37,92	89,89

Los datos de la Tabla 1 pudieron complementarse con simulaciones adicionales en rangos más amplios de operación. Las simulaciones se realizaron para velocidades de flujo entre 0,7 y 7m/s para velocidades de rotación entre 10 y 100 RPM. Con ellos se graficó la Figura 4 en la que se observa que mejores prestaciones de la turbina modelada ocurren bajas RPM. También para flujos de 2 m/s y a 10 RPM se logran potencias de 0,6 W con eficiencias de 63,1%.

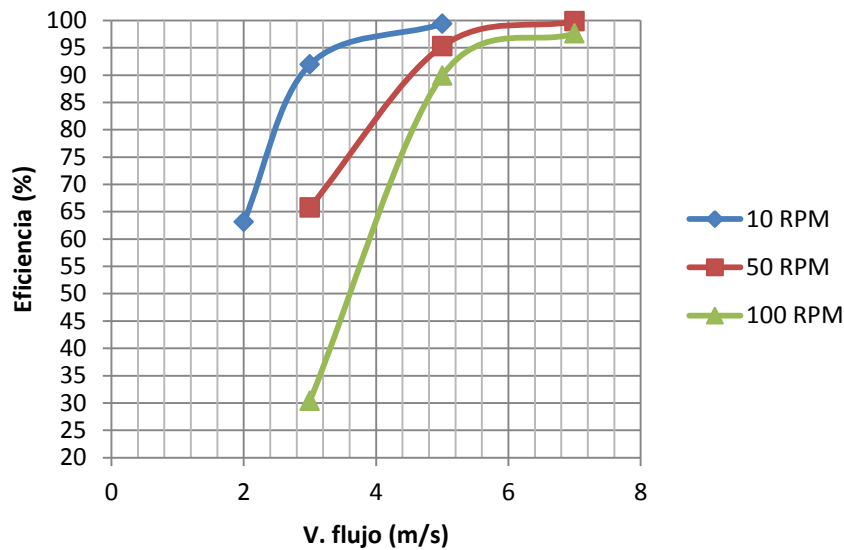


Figura 4. Eficiencia vs. V. flujo para la turbina Gorlov.

CONCLUSIONES

Los resultados del análisis numérico indican que el punto de funcionamiento o de mejor eficiencia corresponde a una velocidad de flujo de 5 m/s para unas 10 RPM de velocidad de giro en la turbina, para el cual se puede obtener una potencia de 51,55 W con una eficiencia hidráulica de 99%.

REFERENCIAS

- [1]. Calisal, S. y Li, Ye, Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine, *Renewable Energy*, Vol.55. 2010, pp. 2325-2334.
- [2]. Lawn, C. y Yang B, Three-dimensional effects on the performance of a vertical axis tidal turbine, *Ocean Engineering*, Vol 58. 2013, pp. 1-10.
- [3]. Marturet, Gustavo., *Simulación fluidodinámica de un modelo de turbina hidrocínética tipo Gorlov*, Trabajo de Maestría, UNEXPO, Puerto Ordáz, 2012.
- [4]. Marcano y otros, *Desarrollo de un Modelo Experimental de Turbina Hidrocínética Tipo Gorlov*, Tesis, IUTEB, 2013.
- [5]. Alarcón, Gabriel, *Turbomáquinas*. Mérida, Venezuela, Universidad de Los Andes, 1998
- [6]. Mataix, Claudio, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, 2da. ed. Madrid: Ediciones del Castillo, 1986.
- [7]. Cengel, Yunus A. y Cimbala, J. *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*, 1era. ed. México: McGraw-Hill, p. 337, 2006.

AVERAGE VALUES OF THIN LIQUID FILMS FORMED BETWEEN TWO DROPLETS OF EMULSION

Fernández Acuña J.

Toro-Mendoza J.

jfernandez@ivic.gob.ve

jtorom@ivic.gob.ve

Centro de Estudios Interdisciplinarios de la Física,
Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas.
Caracas-Venezuela

Abstract. *Numerous studies have been conducted on the collision dynamics of two emulsion droplets and the effects it could produce its deformability on the whole system stability. Following this line of research, this paper analyzes the average values of the thickness and radius of the parallel flat film formed between two Brownian emulsion droplets experiencing a head-on collision. The evolution of the film is considered as a random process product of the thermal perturbations from the surrounding medium distributed in the configuration space determined by its radius and thickness. This analysis is based on a Brownian dynamics type model, which incorporates the energies of both hydrodynamic and thermodynamic interaction. The results show substantial changes in the average deformation that may affect the dynamics of the film.*

Keywords: Emulsion, Brownian Dynamics, Thin liquid films, deformable droplets.

1. INTRODUCTION

An emulsion is a thermodynamically unstable colloidal dispersion of a liquid phase in another, i.e droplets suspended in a liquid. They could be classified in O/W or W/O systems depending on whether the oil phase is dispersed or water, respectively. The droplet diameter can vary between 100nm to 20 microns, and because the corresponding Gibbs free energy is positive they are subject to aggregation process like flocculation and coalescence until a complete separation of the phases is reached. However, those processes could be controlled by the addition of surfactant agents absorbed in the interface leading to a decrease of the interfacial tension and creating an energy barrier at the surface preventing or delaying coalescence [1].

When the emulsions are formed by large drops (above a few microns) the aggregation process is governed by gravity, leading to creaming or sedimentation, depending on the

difference of densities. However, when dealing with smaller droplets dynamics is dominated by thermal disturbances (Brownian motion) and molecular forces [2].

Unlike solid suspensions, the dynamics of aggregation of the droplets appears to be more complex due to surface deformation and mobility. Thus, if a parallel planar film of liquid is formed between the colliding droplets (Fig. 1a) it will eventually break up. The film formation and the rate of thinning are important factors in the stability of the emulsions for hydrodynamic and direct interactions are sensitive to the shape of the interacting surfaces of the beads [3,4].

Previous studies argue that once the film is formed, the thickness h and radius r fluctuate around an equilibrium state and the combination of these at different times t is a random process (Fig.1b)[2,3]. In this regard, Toro -Mendoza and Petsev [2] followed up on the evolution of the radius and the thickness of the film through an analysis of a Brownian dynamics model for the cylinder (film) formed between the droplets, in order to obtain a detailed picture of the temporal evolution of it.

In this paper, a study of the dependence of the average behavior of the radius and thickness of the film with the variation of some physicochemical parameters (droplet size, electrolyte concentration, interfacial tension, and Hamaker constant) is performed. This average was obtained from various numerical runs ($N=20$).

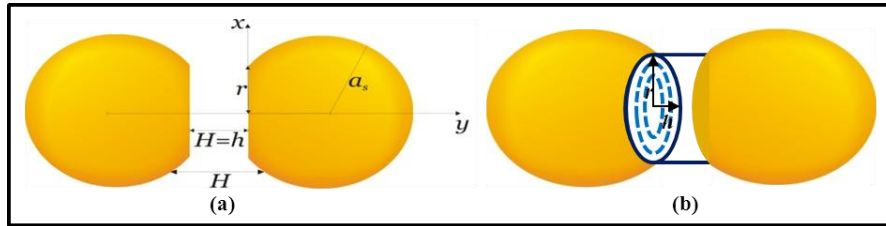


Fig. 1: Schematic representation of two colliding Brownian emulsion droplets forming a parallel planar and circular film. Droplets surfaces can be modeled as truncated spheres of radius a .

2. THEORETICAL BASIS

2.1. Brownian dynamics

Brownian dynamics is widely used to determine the effect of fluctuations in macroscopic systems and represents a powerful tool for a detailed treatment for Brownian systems [5]. In the case of two approaching deformable emulsion droplets, a film is formed whose dynamics is contained in a 2-dimensional space defined by the radius r and thickness h . These parameters exhibit a random behavior. The stochastic nature of the film formation is described by a probability function which is solution of the Smoluchowski equation. However, it is well established that N parameters appearing in the Smoluchowski equation is equivalently described by a set of N coupled Langevin equations. Hence, we can describe our film by two Langevin equations in absence of friction. Twice integrated, and in form of finites differences, one has [2,3]

$$\Delta r = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r D_{rr} + \frac{\partial}{\partial h} D_{rh} \Delta t - \frac{1}{k_B T} D_{rr} \frac{\partial W}{\partial r} + D_{rh} \frac{\partial W}{\partial h} \Delta t + R t \quad (1)$$

$$\Delta h = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r D_{rh} + \frac{\partial}{\partial h} D_{hh} \Delta t - \frac{1}{k_B T} D_{hh} \frac{\partial W}{\partial h} + D_{rh} \frac{\partial W}{\partial r} \Delta t + H t \quad (2)$$

The first two terms on the right side in the equations (1) and (2) represent the directional flow velocity ($\nabla \cdot D \neq 0$). The second term couples hydrodynamic resistance and the interaction forces between the droplets (W). The third term represents the random fluctuations.

2.2. Interaction potentials

The total potential energy of interaction W between two emulsion droplets is a product of the combination of a number of contributions in the system [2, 6, 14, 19-23]

$$W = W_S + W_{VW} + W_E + DW \quad (3)$$

where W_S is the contribution due to the change of surface energy during deformation, W_{VW} is the attractive van der Waals interaction, W_E is the electrostatic contribution, and DW corresponds to other possible interactions. These contributions depend on the shape of the surfaces of the particles [9,19].

van der Waals interaction. The aggregation of emulsion droplets is produced by attractive forces. They are a consequence of dipolar interactions between the molecules. Danov *et al.* [9,10,14,19-23] obtained an expression for the energy of van der Waals interaction between two deformable droplets assuming that they deform as truncated spheres, using the approximation of Hamaker

$$W_{VW} = -\frac{A}{12} \frac{4a^2}{2a+h} + \frac{4a^2}{h} \frac{4a-h}{4a+h} + 2 \ln \frac{h}{2a+h} + \frac{128a^5 r^2}{h^2(2a+h)^3} \quad (4)$$

where A is the Hamaker constant.

Electrostatic interaction. Electrical forces are caused by a surface distribution of electrical charge on the particle, generally due to the presence of ionic surfactants absorbed into the surface. It produces an electrical potential Ψ in the particle - solvent interface. In this regard, Danov *et al.* [19], obtained the electrostatic potential for two deformed droplets with a of moderately high and constant potential, which is given by

$$W_E = \pi \epsilon_0 \epsilon \kappa \Psi^2 \left[1 - \tanh \frac{\kappa k}{2} r^2 + 2a \kappa^{-1} \ln \left(1 + \exp -\kappa h \right) \right], \quad (5)$$

where $\kappa^{-1} = 2e^2 z^2 C_{el} / \epsilon_0 \epsilon k_B T$ is the Debye screening length, e is the electron charge, ϵ_0 is the vacuum permittivity, ϵ is the dielectric constant of medium and C_{el} the electrolyte concentration [9,10,14,19-23].

Surface deformation energy. When two droplets approach, the volume remains constant. However, due to the hydrodynamic resistance surfaces are subject to change the spherical form, leading to an increase of the area. The work for doing so is against the interfacial tension [9], which, for two truncated spheres model is

$$W_S = \frac{1}{2} \pi \gamma \frac{r^4}{a^2} \quad (6)$$

where γ is the interfacial tension.

3. RESULTS

The effect of different factors on the behavior of the film is examined. The parameters used in the computations are: $\Psi = 15\text{mV}$, $\epsilon = 80.4$, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{12} \text{ Fm}^{-1}$, $T=298 \text{ K}$ and $\eta = 8,91 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

3.1. Influence of the tension in the film formation

The interfacial tension is a factor in the deformability of the droplets and hence the stability of the emulsion. The role of this parameter on the evolution of r and h was determined for

different values of σ ($\sigma = 0.1\text{mN/m}$, $\sigma = 1\text{mN/m}$, and $\sigma = 10\text{mN/m}$), $A = 4 \times 10^{-21}\text{ J}$, $C_{el} = 0.1\text{M}$ and $\varepsilon_s = 0.01$, and the results are shown in Figure 2.

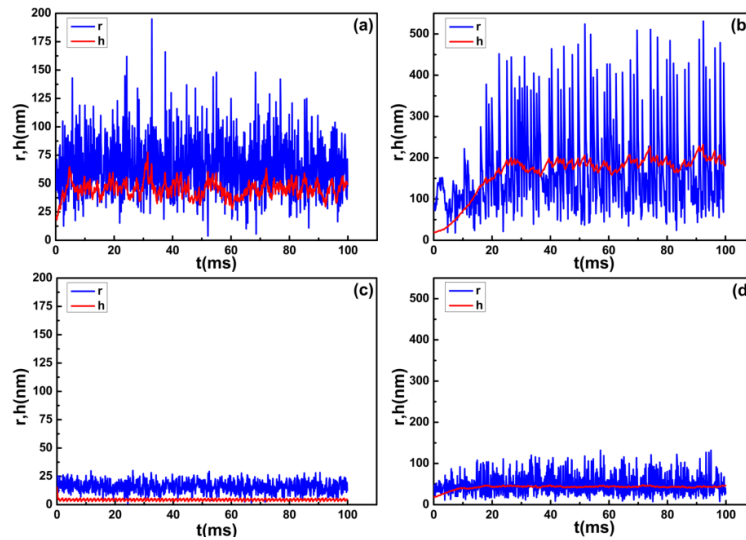


Figure 2 - Time evolution of r and h values of the film formed between two identical drops of radius $a = 500\text{ nm}$ for (a) and (c) and $a = 2\mu\text{m}$ for graphs (b) and (d).

Fluctuations in each of the curves arise from a complex combination of hydrodynamic and thermodynamic interactions, and thermal disturbances present in the system, becoming very pronounced for very low interfacial tension values and large droplets size. Inversely, for tension is very high greater energy is required to deform the droplets and therefore the dimensions reached by the film are small compared with the previous case.

The results for the average value of the film radius around which the film fluctuates are shown in Figure 3. It is noticeable that there is a clear proportionality between the size of droplets, the interfacial tension, and r_{av} . This matches the behavior expected from the fundamental equations. In particular the equation (6) allows relating the radius of the droplet and interfacial tension with the film so that the variation of r is proportional to the droplet size and inversely proportional to the tension. Therefore, the higher surface tension higher energy required to deform the droplet and the larger the radius of the particles these are more easily to deform beams which favors an increase in the film radius.

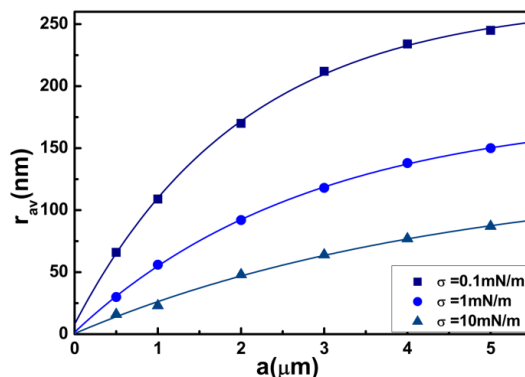


Figure 3 - Dependence of the average radius of deformation to the size of the drop. $C_{el} = 0.1\text{ M}$ and $A = 4 \times 10^{-21}\text{ J}$.

3.2. Influence of the Hamaker constant film formation

The dependence of the behavior of the film with the Hamaker constant was evaluated. The values used were $A = 1 \times 10^{-21} J$, $A = 1 \times 10^{-20} J$ and $A = 5 \times 10^{-20} J$ for droplet radii ranging from $a = 500 nm$ to $a = 5 \mu m$, $\sigma = 1 mN/m$, $\epsilon_s = 0,01$ and $C_{el} = 0,1M$. The procedure carried out is identical to the previous two sections, and the average radius of deformation results are shown in figure 4. The graph corresponds to three curves ranging from attractive systems ($A = 1 \times 10^{-21} J$) to repulsive ones ($A = 5 \times 10^{-20} J$). It can be observed, as in previous section, that changes in the Hamaker constant values do not affect greatly to the mean values of the film radius. However, it can be seen that the results obtained in the intermediate attractive system $A = 1 \times 10^{-21} J$ are located in between the other two cases. The latter led to an analysis of the behavior of h (see Fig.5).

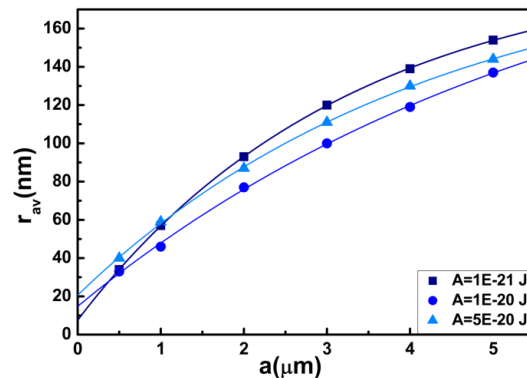


Figure 4 - Dependence of the average radius of deformation to the size of the drop. $C_{el} = 0,1M$ and $\sigma = 1 mN/m$.

Figure 5 shows the time evolution of the film thickness h of the system consisting of a couple of drops of radius $a = 3 \mu m$ for different values of A . In Figure 5a the value for the Hamaker constant is $A = 1 \times 10^{-21} J$. It is observed that the film thickness gradually increases to a maximum value around which continually oscillates for the high repulsion between the droplets.

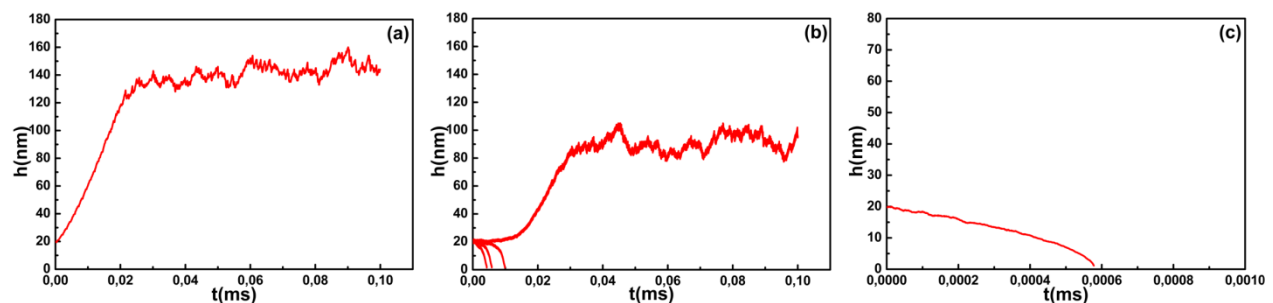


Figure 5 - Time evolution of h for a couple droplets of radius $a = 3 \mu m$: (a) $A = 1 \times 10^{-21} J$; (b) $A = 1 \times 10^{-20} J$; (c) $A = 5 \times 10^{-20} J$

In the case of Figure 5c ($A = 5 \times 10^{-20} J$) the system more attractive and, as can be seen in the figure, coalescence times are very short and prevents the film evolves to larger dimensions. However, in the curves of Fig 5b ($A = 1 \times 10^{-20} J$) it can be noticed that after performing several numerical experiments, the film follows different paths for each event, i.e. either evolves to reach stable films or breaks and droplets rapidly coalescing. This latter behavior shows that the film is

able to follow a random walk under certain physicochemical conditions, and therefore it is not possible to determine stability based solely on the interaction parameters as this system is conditioned fluctuations of r and h .

4. CONCLUSIONS

The present study assesses the dynamics of emulsion film formation subject to molecular and thermal forces. The results suggest that despite the complexity shown during the course of the film there is a tendency of distortion which is inversely proportional to the increased dependency of the surface tension of the droplet and the radius of the film formation. Moreover, it is observed that for some value (or combination) of the parameters describing the system, stability versus coalescence system basically depends on the random walk that it follows. This result is important when predicting the stability of an emulsion, and that even if the values of the parameters to predict some stability depend on fluctuations of r and h .

REFERENCES

- [1].Capek I., Degradation of kinetically-stable o/w emulsions. *Advances in colloid and interfaces science*, vol. 107, n. 2–3, pp. 125–155, 2004.
- [2].Toro-Mendoza J., Petsev D., Brownian dynamics of emulsion film formation and droplet coalescence. *Physical Review E*, vol 81, n 5, pp. 051404, 2010.
- [3].Petsev, D. N. Theoretical Analysis of film thickness transition dynamics and coalescence of charged miniemulsion droplets. *Langmuir*, vol 16, No.5; pp. 2093-2100, 2000.
- [4].Gurkov, T., Basheva, E. Chapter: *Hydrodynamic behavior and stability of approaching deformable drops*. In: Encyclopedia of surface and colloid science, Hubbard, A. T., Ed. Marcek Dekker, N. Y, 2002.
- [5].van Kampen N. *Stochastic processes in physics and chemistry*. Elseiver, 2007.
- [6].Danov, K.; Denkov,N.; Petsev, D.; Ivanov, I.; Borwankar, R. Coalescence Dynamics of Deformable Brownian Emulsion Droplets. *Langmuir*, vol. 9, n. 7, pag: 1731-1740, 1993
- [7].Toro Mendoza J. Tesis Doctoral: *Simulaciones de estabilidad de emulsiones de gotas deformables*. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Venezuela, 2008.
- [8].Danov,K.; Petsev, D.; Denkov, N. Borwankar, R. Pair interaction energy between deformable drops and bubbles. *Journal of Chemical Physic* vol. 99, pp 7179-7189, 1993.
- [9].Toro-Mendoza J., García-Sucre M., Petsev D. *Deformation of Brownian Emulsion Droplets*. En Transworld Research Network & Research Signpost. Chapter 8 in Topics of Colloidal Aggregation and Interfacial Phenomena, Kerala, India, 2012.
- [10]. Goossens, M., Mittelbach, F., & Samarin, A., *The LaTeX Companion*. Addison-Wesley, 1994.

ESPECTROS DE DISEÑO DEL ÁREA METROPOLITANA DE MÉRIDA A PARTIR DE PERFILES SÍSMICOS MODELADO A TRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS CON COMPORTAMIENTO NO LINEAL Y DEMANDADOS DINÁMICAMENTE

Francisco Pinto

Franciscopinto29@gmail.com

Escuela de Ingeniería Civil Universidad de Los Andes

Milgreya Cerrada

milgreya@ula.ve

Grupo de Geofísica, Facultad de Ciencias. Departamento de Geomecánica. Escuela de Ingeniería Geológica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes, Mérida -Venezuela.

Pedro Rivero

riverop@ula.ve

Escuela de Ingeniería Civil Universidad de Los Andes

Resume. *La presente investigación determina los espectros de diseño del área metropolitana de Mérida a partir de perfiles sísmicos modelados a través de elementos finitos que presenta un comportamiento no lineal y son demandados dinámicamente, para poder contribuir a definir los niveles de fuerza con las cuales deben ser diseñadas las nuevas edificaciones de la ciudad y las acciones que deben ser incorporadas para la evaluación de estructuras existentes. Para llevar a cabo este análisis se parte de definir las propiedades dinámicas del subsuelo a través de un estudio de velocidad de onda de corte en profundidad, y caracterización física de los perfiles del subsuelo del área, y posteriormente, considerando los niveles de amenaza sísmica planteada para el área de estudio, se analizan 7 secciones y 39 perfiles sísmicos del subsuelo a través de modelos numéricos en 2D, por medio del software especializado en evaluaciones geotécnicas, PLAXIS, el cual permite simular el subsuelo considerando deformaciones planas, a través de elemento finitos triangulares de 15 nodos, una malla fina, que garantiza la exactitud del análisis sísmico, comportamiento no lineal del suelo, y a su vez demandar la estructura del suelo dinámicamente. Para evaluar la respuesta se establece sensores de medición de variación en función del tiempo de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento en el tope del modelo obteniéndose los espectros de diseño locales, herramienta fundamental para la estimación de la demanda sísmica en estructuras. Finalmente luego del estudio se obtiene, que el área*

metropolitana de Mérida, se asienta en suelos duros o densos, con velocidades de onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad de 366 – 762 m/seg, este hecho, concatenado con los estudios realizados en el marco del plan de microzonificación sísmica, indica que el área de estudio se comporta sísmicamente de manera similar, lo que se refleja en la evaluación de la respuesta sísmica del subsuelo, logrando definir un espectro de diseño que define los niveles de fuerza esperados en el área metropolitana de Mérida, ante eventos sísmicos, al mismo tiempo se observa que la manera adecuada de hacer evaluaciones sísmicas del subsuelo en el área de estudio, es a través de modelos numéricos bidimensionales que incorporen modelos adecuados de caracterización del suelo.

Palabras claves: Sismo, perfil, edificaciones, espectro, Mérida, modelo

1. INTRODUCCIÓN

Las respuestas de los suelos ante la excitación sísmica, modifican el comportamiento de la señal sísmica a nivel del sustrato rocoso. Las respuestas, según el entorno geográfico, serán diferentes, ya que están controladas por el espesor y las características dinámicas del suelo, y al mismo tiempo por las características del sismo. Cuyas variaciones se manifiestan en amplificación, atenuación de las ondas sísmicas, mayor duración de la misma, y variación del contenido frecuencial. Estas alteraciones que los suelos producen en la respuesta sísmica, si no son estimadas correctamente, pueden generar daños en las estructuras emplazadas.

El área metropolitana de la ciudad de Mérida, presenta una importante amenaza sísmica, representado por el sistema de falla de Boconó y las grandes particularidades tectónicas que la circunscriben, importantes espesores de sedimentos y alta vulnerabilidad por el desarrollo descontrolado y desmedido. Por lo tanto, se busca caracterizar la respuesta sísmica del subsuelo aplicando el método sísmico de ondas superficiales tipo Refracción por Microtemblores (ReMi), el cual se ha convertido en un método moderno para caracterizar sitios y en la evaluación de terrenos para estudios de ingeniería civil, ya que permite obtener la velocidad de onda de corte sin la utilización de fuentes artificiales. Posteriormente, se procede al procesamiento numérico mediante modelos dinámicos de comportamiento no lineal, concluyendo en la obtención de espectros de diseño locales, herramienta fundamental para la estimación de la demanda sísmica en estructuras, representando un aporte en la mitigación de riesgo sísmico en la ciudad.

2. BASES TEÓRICAS

2.1 Estudio del suelo ante cargas dinámicas

La evaluación de la respuesta sísmica del suelo bajo cargas dinámicas, se debe realizar a partir del modelado dinámico no lineal, el cual utiliza elementos finitos y ecuaciones del movimiento para llevar a cabo la integración del dominio del tiempo paso a paso de dicho movimiento. Este modelo, es el más usado para evaluar la respuesta dinámica del suelo, debido a que se ha demostrado un comportamiento no lineal del cuando suelo es sometido a cargas cíclicas. Dicha respuesta está controlada en gran medida por la rigidez y el amortiguamiento del suelo. Las vibraciones provocadas por un terremoto es una carga cíclica variable que provoca en el suelo un comportamiento tenso - deformacional no lineal el cual queda definido por el módulo de corte que es la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado de la curva y es una medida de la dureza del material. Se obtiene calculando la pendiente de la curva tensión

- deformación y en función de dónde se evalúa está pendiente se distingue el módulo de corte tangente (G_{tan}), secante (G_{sec}) o máximo (G_{max}).

2.2 Parámetros sísmicos del movimiento del terreno

El movimiento del terreno debido a un sismo se expresa por una serie de parámetros físicos cuya definición constituye la base del diseño sísmico, dichos parámetros son: aceleración, velocidad, desplazamiento, periodo, duración, entre otros. La manera de representar estos parámetros es por medio de los espectros de respuesta del terreno, obtenidos a partir de una integración numérica de los acelerogramas en superficie, con lo cual se obtiene las aceleraciones máximas en función del periodo. Para propósitos de diseño el espectro de respuesta es inapropiado; por lo que se define el espectro de diseño el cual se basa en un análisis estadístico del espectro de respuesta para un conjunto de movimientos del suelo.

3. METODOLOGÍA

Se consideran 7 perfiles sísmicos sobre el área metropolitana de Mérida definidos a partir de la aplicación de ReMi. Los cuales se correlacionaron con datos geológicos, geotécnicos – dinámicos, disponibles hasta el momento. En este caso solo se presentan los datos recabados para una parte de los perfiles sísmicos en el área de estudio, específicamente el del sector Los Próceres (Tabla 1), al noroeste de la Ciudad de Mérida. Estos perfiles son sometidos a 10 registros acelerográficos (Tabla 2), que presenta las características necesarias de la probable sismicidad en la zona, definidos a partir de Bendito [1], obteniendo así la respuesta del suelo a partir de modelos bidimensionales de comportamiento no lineal con nuevas relaciones de representación de la pérdida de rigidez del suelo con el incremento de la deformación cortante cíclica.

Tabla 1. Condiciones promedio del suelo para la avenida Los Próceres (alrededores sector Pie

Condiciones promedio del suelo para la avenida Los Próceres (alrededores sector Pie del Tiro – urbanización El Bosque)				
Esesor (m)	Litología	Vs (m/seg)	Vp (m/seg)	ρ (Kg/m ³)
4.-16.	Arcilla Limo Arenosa	270	562.05	1620
4.-16.	Arena Limo Arcillosa	704.11	1397.83	2260
4.-16.	Grava Arcillo Arenosa	809	1606.06	2460
	Roca Fracturada de la Formación Palmarito	1250	2165.06	2740

Tabla 2. Registros acelerograficos de entrada en la roca

Terremoto	Magnitud	DE(km)	PGA(g)
Landers 28/06/1992	7.4 Ms	52	0.05
Duzce, Turkey 12/11/1999	7.3 Ms	30	0.053
San Francisco 22/03/1957	5.3 Ms	11	0.105
Anza (Horse Canyon) 25/02/1980	4.7 Ms	13	0.131
Coyote Lake 06/08/1979	5.6 Ms	9.3	0.132
Kem County 21/07/1952	7.5 Ms	56	0.179
Northridge 17/01/1994	6.7 Ms	36	0.234
Parkfield 28/06/1966	6.0 Ms	11	0.269
San Fernando 09/02/1971	6.4 Ms	30	0.315
Loma Prieta 18/10/1989	7.1 Ms	11	0.411

El método seleccionado, para la evaluación bidimensional del suelo, fue el MEF, la aplicación de este método se realiza a través de un modelo numérico en el software *Plaxis* [2], al ser una potente herramienta en el cálculo de problemas geotécnicos. El modelo utilizado fue el modelo hiperbólico con endurecimiento por deformación. *HardeningSoilModel* (HS). Este modelo es uno de los más avanzados para simular el comportamiento del suelo, involucra los análisis de suelos suaves y rígidos [3], representa una variante elasto-plástico del modelo hiperbólico y esta formulado dentro de la teoría endurecimiento por fricción. La importancia de este modelo en la investigación, es que la superficie de fluencia que considera no es fija en el espacio de los esfuerzos principales, sino que puede incursionar en deformaciones plásticas. En este modelo los estados límites de esfuerzos son descritos por medio del ángulo de fricción (ϕ), cohesión (c) y ángulo de dilatación (Ψ). La dilatación es uno de los parámetros más importantes incorporados, ya que la misma tiene un pronunciado efecto sobre la resistencia al corte. Bolton [4], propone la ecuación Eq. 1. para materiales con ángulo de fricción $\phi < 30^\circ$, que es empleada en el estudio.

$$\Psi \approx \phi - 30^\circ \quad (1)$$

La rigidez del suelo es definida introduciendo tres parámetros diferentes: rigidez por carga triaxial o modulo secante (E_{50}), rigidez por descarga triaxial (E_{ur}), y la rigidez por carga de compresibilidad o modulo tangente (E_{oed}) determinados a partir de relaciones que utiliza los resultados obtenidos por el ReMi, específicamente la velocidad de onda de corte (V_s). Se toma como valores los que se obtienen a partir de las ecuaciones Eq. 2. Eq. 3. Eq. 4. Eq. 5.

$$E_{ur} \approx 3 * E_{50} \quad (2)$$

$$E_{oed} = \frac{E * (1 - \mu)}{(1 - 2\mu)(1 + \mu)} \quad (3)$$

$$E_{oed} \approx V_p^2 * \rho \quad (4)$$

$$E_{oed} \approx E_{50} \quad (5)$$

Este modelo toma en cuenta la dependencia del esfuerzo con el módulo de rigidez del suelo, no solo con la curva esfuerzo-deformación hiperbólica (Figura 1a), sino que controla la dependencia de la rigidez del suelo con el nivel de esfuerzos, dado por el coeficiente (m).

Por tratarse de un problema sísmico, los depósitos de suelo, son modelados asumiendo una geometría horizontal de los estratos con una relación de aspecto ancho – vertical H/V que puede variar entre 4 y 1.5; para las capas del suelo se asume un comportamiento no drenado, ya que la demanda sísmica dura un corto periodo de tiempo permitiendo la generación de presión de poros, los modelos se consideran desde el basamento hasta el depósito cuaternario (Figura 1b).

Los bordes laterales se asumen semi-infinitos a través de los coeficientes de relajación C_1 y C_2 usados para impedir la absorción de la onda sísmica en la dirección normal y tangencial sobre los bordes absorbentes. Se utiliza en este estudio elementos triangulares de 15 nodos, una malla muy fina para más exactitud del análisis sísmico, lo que se obtuvo posterior a un análisis de convergencia de resultados con estudios previos y con simultaneidad de corridas de modelos (Figura 2).

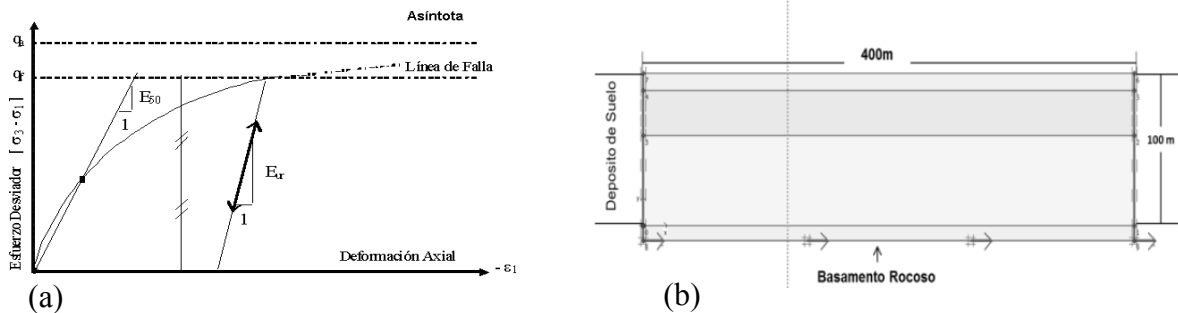


Figura 1- (a) Relación hiperbólica esfuerzo-deformación del modelo de suelo. (b) Geometría del modelo para el sector los próceres, a nivel del sector Pie del Tiro

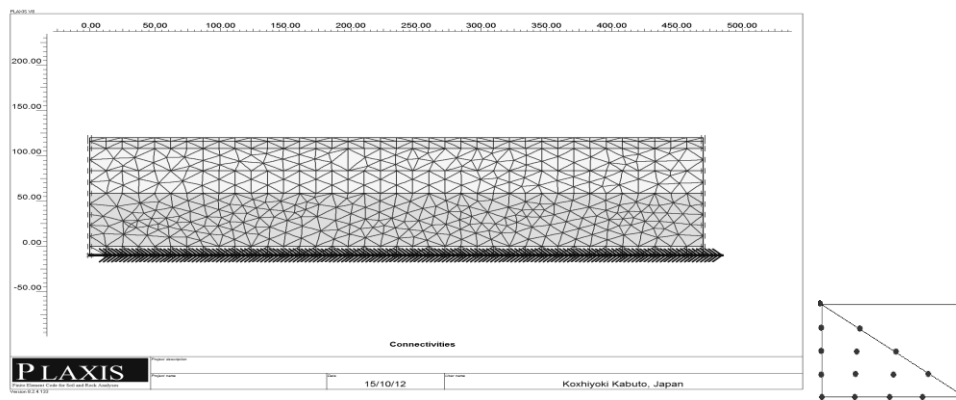


Figura 2- Perfil con malla muy fina, utilizado para verificar la selección del tipo de malla y elemento triangular de 15 nodos empleado en el modelo.

Finalmente, la columna del subsuelo se somete a los eventos sísmicos seleccionados para el análisis y se toman los resultados que corresponden a la capa superficial del subsuelo. Con las respuestas obtenidas, se conforman los espectros de diseño los cuales se basan en un análisis estadístico de los espectros de respuesta para el conjunto de movimientos del suelo definidos para el área metropolitana de Mérida. Se debe mencionar que la definición matemática de los espectros se conserva análoga a las definiciones sismoresistentes de la normativa venezolana, para conservarse dentro de las prescripciones y no crear problema de uso de los espectros.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se determinan las velocidades de onda de corte de los primeros 30 metros de profundidad y su correspondiente clasificación según las normas IBC2000 [5] con los cuales se consiguen posteriormente los distintos parámetros sísmicos para estimar los efectos de sitio del suelo, obtenido por la sísmica de refracción por microtemores (ReMi), para el área de estudio, en la misma se puede observar que predominan los suelos tipo C, con velocidad de onda de corte entre 365.7 – 762 m/seg, que corresponden a suelos duros o densos a muy denso o roca meteorizada, con una resistencia a la penetración $N > 50$. En base a la clasificación del IBC2000 [5], el área metropolitana de Mérida se asienta sobre un suelo firme con posible buen comportamiento ante eventos sísmicos. Partiendo de lo anterior, en la Figura 3b, se muestran las curvas de respuesta espectral de aceleración de valores medios para la totalidad de los resultados de los análisis bidimensionales a través del método de los elementos finitos. Se observa que la máxima

amplificación espectral alcanzada corresponde a 2.5, y los valores máximos de demanda sísmica se concentra en periodos predominantes entre 0.22 a 0.40 seg. La respuesta del subsuelo tiende a ser similar en toda el área.

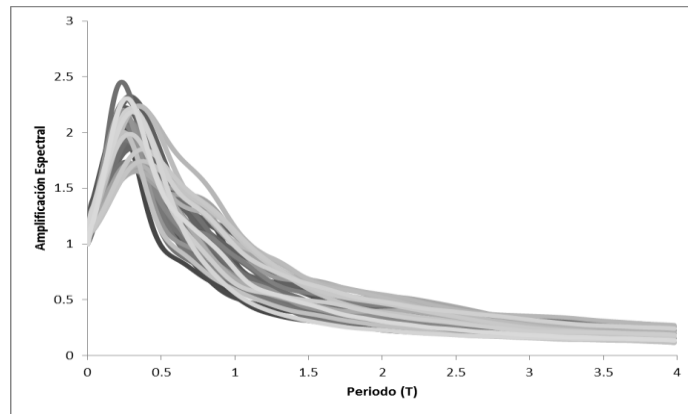


Figura 3- Totalidad de espectros de respuestas del suelo para el área metropolitana de Mérida

Con la finalidad de proporcionar la mayor seguridad posible en el diseño sismorresistente de edificaciones, a continuación, se define el espectro de diseño (figura 4.), que considera el comportamiento dinámico del suelo, conforme a los resultados obtenidos y a la práctica común en la ingeniería sísmica. La forma espectral de diseño queda descrita mediante tres ramas: una rama ascendente con aceleraciones crecientes, una rama de aceleraciones constantes y una rama descendente. Los parámetros para caracterizar al espectro de diseño para la terraza de la ciudad de Mérida se encuentran en la figura 4.

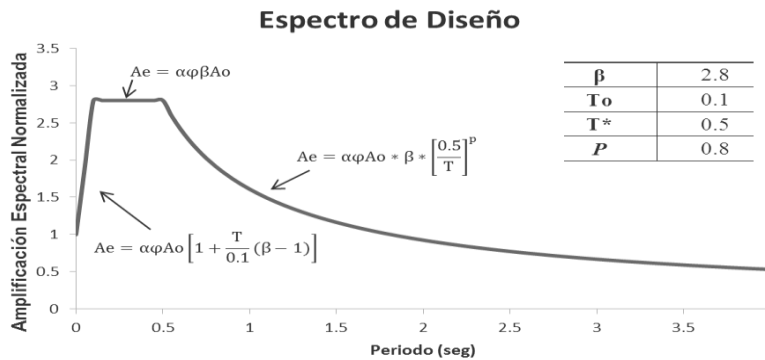


Figura 4. Espectro de diseño elástico propuesto para la ciudad de Mérida.

5. CONCLUSIONES

Los estudios arrojan un tipo de suelo denso a muy denso en la mayoría del área de estudio, llegando inclusive a un suelo con características de roca, la respuestas sísmicas obtenidas para los distintos modelo no puede ser sectorizada, se define un único espectro de diseño para evaluar la demanda sísmica a la cual están sometidas las edificaciones sobre el área metropolitana de Mérida. Se define el nuevo espectro de diseño normalizado con los siguiente parámetros, factor de amplificación (β) 2.8, la meseta espectral se comprende entre periodos de 0.10 a 0.50 seg,

exponente de la rama ascendente (P) 0.80. Cabe destacar que el nuevo espectro de diseño se adapta a la normativa COVENIN [6].

REFERENCIAS

- [1]. Bendito A., Rivero P., y Lobo-Quintero W, 2000, *Curvas de isoaceleraciones para estado de desempeño estructural en el occidente de Venezuela*, IMME, Vol. 39, No 2, pag. 1-18, Julio 2001, Caracas, Venezuela.
- [2]. PLAXIS V 7.2, 2001, *Finite Element code for soil and rock analyses. Manual Dynamic*, K. J. Bakker, P.G.
- [3]. Schanz T., Vermeer P., y Bonnier P., 1999, *Formulation and verification of the hardening soil mode*, *In beyond 2000 in computational geotechnics*, RBJ Brinkgreve editor, A.A Balkema, Rotterdam, pp. 281-290.
- [4]. Boton MD, 1986, *The strength and dilatancy of sands*, *Geotechnique*, Vol. 36, N^o 1, pp 617-653.
- [5] International Building Code, Edición 2000, *International Code Council*, Inc., Falls Church, VA, 2000.
- [6]. COVENIN (1756-1998 Rev. 2001), *Norma venezolana para edificaciones sismoresistente*. MINDUR, FUNVISIS, Caracas, Venezuela.

Agradecimientos

Se le agradece el apoyo económico al FONACIT proyecto PEI 2011001375. Para la exitosa culminación de este proyecto se conto con la colaboración de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) a través del proyecto 2007333939 (MISION CIENCIAS).

MODELO NÚMÉRICO 2D DEL SUBSUELO DEL ÁREA METROPOLITANA DE MÉRIDA A PARTIR DEL CODIGO ABIERTO SPECFEM2D 6.1.5

Jennifer Colina

Marianelly Salas

jennifer2607@gmail.com

marianellysalass@gmail.com

Escuela de Ingeniería Geológica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela

Vanessa Volcanes

volcanescv@gmail.com

Grupo de Geofísica, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Venezuela.

Milgreya Cerrada

o ki t g { c B w r Q g "

Grupo de Geofísica, Facultad de Ciencias. Departamento de Geomecánica. Escuela de Ingeniería Geológica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes, Mérida -Venezuela.

Stéphanie Klarica

klarica@ula.ve

Grupo de Geofísica. Departamento de Física. Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela

Grelys Sosa

sosarely@ula.ve

Grupo de Investigación en Geología Aplicada, GIGA. Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.

Resumen. *El área Metropolitana de Mérida es una de las ciudades más sísmicas de Venezuela, debido a que se encuentra afectada por el sistema de Fallas de Boconó. En los últimos años el área Metropolitana de Mérida sufre un crecimiento vertiginoso y descontrolado generándose zonas de eminente potencial de riesgo. Por tal motivo es imprescindible realizar investigaciones en donde se pueda conocer el comportamiento del subsuelo ante un evento sísmico. Esta investigación tiene como objetivo realizar un modelado numérico 2D a partir de datos de ruido sísmico ambiental. El modelado se realiza mediante el código abierto SPECFEM2D 6.1.5, basado en el método de elementos espectrales, con el fin de conocer como es el comportamiento de las partículas del subsuelo al paso de la onda sísmica y comparar cómo se comportan cuando la fuente se encuentra en sedimento y en roca basamento. La metodología aplicada es la*

siguiente: se emplea la técnica geofísica de refracción por microtremores (ReMi) como método de adquisición de datos y estos se analizan mediante el software SeisOpt®ReMiTM, para así obtener modelos 1D del subsuelo, estos modelos arrojan el valor de las velocidades de las ondas sísmicas P y S para cada capa, al igual que la densidad del material, el espesor y profundidad en la cual se encuentra. Luego se procede a modelar con el código SPECFEM2D, para ello se debe conformar una serie de archivos con los valores de velocidad, densidad, factor de atenuación para cada medio presente; se define el tamaño de los elementos espectrales, la geometría del modelo, ubicación de la fuente, entre otros parámetros, lo que permite generar la malla y obtener el modelo de velocidad de la onda S, campos de desplazamientos, gráficas de desplazamiento vs tiempo y velocidad vs tiempo, calculado en varios perfiles que se distribuyeron en el área; en donde se exhibe de manera general que la amplificación de la onda es mayor cuando se encuentra en sedimento y disminuye cuando se está en presencia de un medio rígido o roca basamento, cabe destacar que las amplificaciones más importantes se encuentran al norte del área Metropolitana de Mérida en donde se asienta la población de Tabay.

Palabras Claves: Elementos espectrales, SPECFEM2D, ondas sísmicas, Mérida.

1. INTRODUCCIÓN

La técnica *Refraction Microtremor* (ReMi) o sísmica de microtremores, es un método no invasivo para obtener información general, en una dimensión, de volúmenes grandes del subsuelo, por cada arreglo, usualmente perfiles de velocidad de ondas de corte hasta más de los 30m de profundidad. La fuente sísmica consiste de ruido sísmico ambiental, o microtremores, los cuales son generados constantemente por el ruido artificial o natural. [1]

En el área metropolitana de Mérida, la aplicación del método (ReMi) es una técnica innovadora, debido a que aporta información sobre las características del subsuelo a profundidades mayores a los 30m. De esta manera permite interpretar resultados de perfiles a través de velocidades de ondas de corte, así como espesores de sedimentos obtenidos por esta técnica, los cuales son utilizados en el modelado con Métodos Espectrales a través del código abierto *SPECFEM2D-6.1.5*, con la finalidad de conocer el comportamiento de los sedimentos en el subsuelo en el momento del paso de la onda sísmica y así poder comparar su comportamiento cuando la fuente se encuentra en sedimentos y en roca basamento.

2. BASES TEORICAS

2.1 Método de Refracción por Microtremores (ReMi)

Este método se basa en el análisis e inversión de la curva de dispersión de las ondas *Rayleigh* para un determinado sitio. El primer paso del análisis *ReMi* consiste en generar un espectro de energía de componentes del movimiento en función de frecuencia versus tardanza (inverso de la velocidad), llamado espectro p-f; luego se determina la gráfica de períodos versus velocidad de fase de la onda *Rayleigh*. El producto final del método es un perfil unidimensional de las velocidades de ondas de P, S, densidad y espesor de cada capa.

2.2 Métodos Espectrales

Los elementos espectrales son esencialmente métodos de discretización para la solución aproximada de ecuaciones diferenciales parciales, basadas en interpolaciones de *Lagrange* usadas en conjunto con reglas particulares de cuadratura. Para los elementos espectrales se asume que la solución puede ser expresada como una serie de funciones de polinomios bases, que pueden aproximarse a la solución. El método de elementos espectrales es una técnica de elementos finitos de alto orden que combina la flexibilidad geométrica de los elementos finitos con la alta precisión de los métodos espectrales, resolviendo la ecuación de onda en su forma lineal. El método incluye varias propiedades de cómputos favorables, tales como el uso de productos tensoriales, matrices de masa diagonales y adecuación para implementarse en sistemas de computación en paralelo. Por estas ventajas el método de elementos espectrales es una alternativa viable sobre métodos tradicionales tales como volúmenes finitos y elementos finitos.[2]

Para realizar un análisis numérico a través del Método de los elementos espectrales, se utiliza el código *SPECFEM2D-6.1.5*; el cual utiliza computación paralela. Para ser ejecutado debe especificarse el nombre del compilador para Fortran 90 y del paquete MPI, si se desea trabajar usando la arquitectura de distribución paralela; sin embargo también puede correrse de forma serial.[3]

3. METODOLOGÍA

Para la adquisición de datos se emplea la técnica geofísica de Refracción por Microtremores (ReMi) y estos se analizan mediante el software *SeisOpt@ReMiTM*, para luego modelar con el código abierto *SPECFEM2D-6.1.5* y así obtener un modelado 2D del perfil en estudio. Los perfiles se distribuyen a lo largo del área Metropolitana de Mérida. Para motivos de esta investigación solo se explican dos de ellos uno en la población de Tabay ubicada al norte del área Metropolitana y otro en el Municipio Libertador de la ciudad de Mérida específicamente en la Avenida Don Tulio Febres Cordero en las inmediaciones de la Facultad de Medicina de la Universidad de Los Andes. Se presentan tres tipos de casos, uno donde el espesor de sedimentos alcanza profundidades de 140m (Perfil facultad de Medicina (P1)), otro donde el espesor de sedimentos es de 65m (Perfil Población de Tabay (P2)). Ambos se modelan con la fuente en el basamento y en la capa de sedimentos, pero para el perfil (P2) solo se modela en basamento, esto con el fin de observar como es el comportamiento de la partícula en distintos medios.

En la tabla 1 se encuentran los valores de entrada que se utilizan para el modelado con el código abierto para el perfil (P1), cabe destacar que estos valores se obtiene a través del software *SeisOpt@ReMiTM*.

Tabla 1: Velocidades y densidades involucradas en el Perfil facultad de Medicina (P1)

Densidades (g/cm^3)	Velocidades (m/s)
2720	Vp: 3092 Vs: 1761
1980	Vp: 1310 Vs: 659
1840	Vp: 1187 Vs: 598
1640	Vp: 872 Vs: 419

Tabla 2: Velocidades y densidades involucradas en el Perfil de la población de Tabay (P2)

Densidades (g/cm ³)	Velocidades (m/s)
1740	Vp: 743 Vs:429
1920	Vp: 1072 Vs:619
2260	Vp:1324 Vs:765
2300	Vp:1430 Vs: 826

Además de estos datos se necesita los valores de factor de compresión (Qp) y factor de corte (Qs) de cada material para así proceder con la elaboración de la malla. Para el mallado se define el tamaño de los elementos espectrales a través de la siguiente ecuación:

$$\Delta x = V_s / f_0 \quad (1)$$

Donde Vs= velocidad de onda de corte; F₀= frecuencia del terreno.

Para definir la cantidad de elementos en ambos perfiles, en el eje x se debe dividir el tamaño de los elementos espectrales entre la longitud total del tendido o del perfil sísmico a evaluar y para el eje z se sigue el mismo procedimiento. En la tabla 3 y 4 se muestra de manera tabulada la cantidad de elementos espectrales para cada capa y los valores de factor de compresión (Qp) y factor de corte (Qs) para cada modelo.

Tabla 3. Cantidad de elementos espectrales, Qp y Qs para el perfil (P1)

Capa	Cantidad de elementos espectrales eje X	Cantidad de elementos espectrales eje Z	Factor de compresión Qp	Factor de corte Qs
1	12	1	264,3	176,1
2	12	2	171,5	114,3
3	12	3	155,6	103,7
4	12	6	108,9	72,6

Tabla 4. Cantidad de elementos espectrales, Qp y Qs para el perfil (P2)

Capa	Cantidad de elementos espectrales eje X	Cantidad de elementos espectrales eje Z	Factor de compresión Qp	Factor de corte Qs
1	40	1	64,2	42,9
2	40	1	92,8	61,9
3	40	1	114,7	76,5
4	40	76	123,9	82,60

Para esta investigación se utiliza la opción del mallador interno del código. Una vez creada la malla se conforman varios archivos que contienen información sobre las estaciones receptoras de la señal sísmica y la excitación sísmica en función de una fuente puntal. En la figura 1a y 1b se muestra la configuración de la malla, ubicación de la fuente y estaciones para cada perfil.



Figura 1a- Perfil P1 Facultad de Medicina

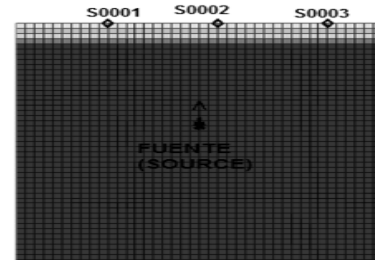


Figura 1b- Perfil P2 Tabay

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se determinó el comportamiento de las partículas del subsuelo al paso de la onda sísmica cuando la excitación sísmica se encuentra en basamento y en sedimento. En los gráficos de desplazamiento vs tiempo y velocidad vs tiempo, se observa que cuando la fuente se encuentra en sedimento el mayor desplazamiento es de 0,2m el cual ocurre en 0.2 seg y la velocidad en un tiempo de 0,3 seg es de 14 m/s (Figura 2a Perfil P1); mientras que cuando la fuente esta en basamento el mayor desplazamiento es 0,12m en 0.2 seg y la velocidad en un tiempo de 0,3 seg es de 7m/s (Figura 2b Perfil P1); esto nos indica que en roca basamento la onda viaja con mayor rapidez, porque se encuentra en un medio rígido y en las capas donde existe una mayor variabilidad de los materiales, el desplazamiento de las ondas es menor lo que trae como consecuencia una amplificación de la misma.

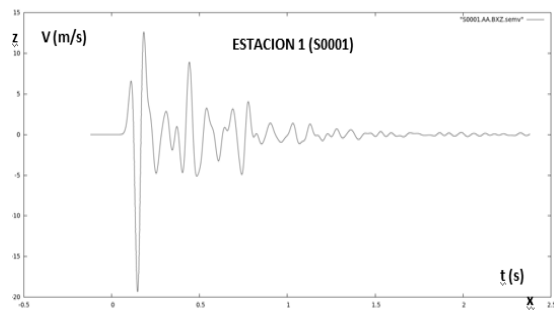
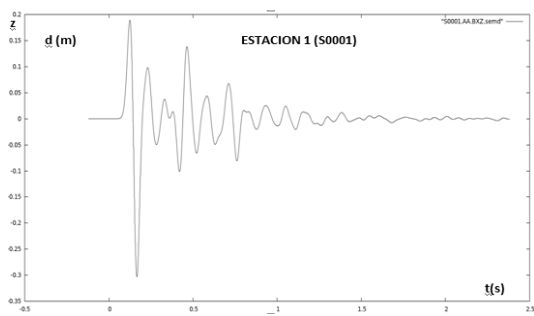


Figura 2-(a) Graficas Desplazamiento vs tiempo y Velocidad vs tiempo en sedimento para (P1)

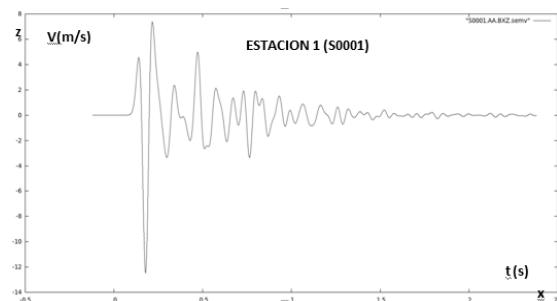
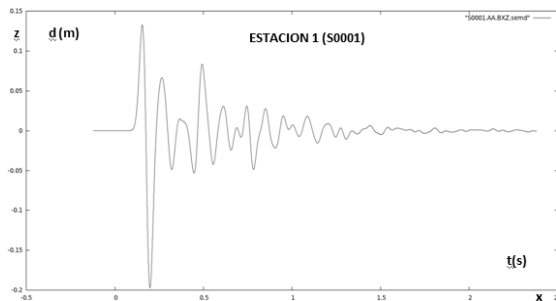


Figura 2-(b) Graficas Desplazamiento vs tiempo y Velocidad vs tiempo en basamento para (P1)

En la figura 3 se observan los gráficos de desplazamiento vs tiempo y velocidad vs tiempo, los cuales corresponden al perfil (P2) cuando la fuente se encuentra en basamento, dando como resultado un desplazamiento de 0,14m en un tiempo de 0,4s y la velocidad para este mismo tiempo es 5m/s, haciendo una comparación con el perfil (P1) cuando la fuente se encuentra en basamento se puede observar que el comportamiento de la partícula al paso de la onda sísmica es similar en ambos perfiles.

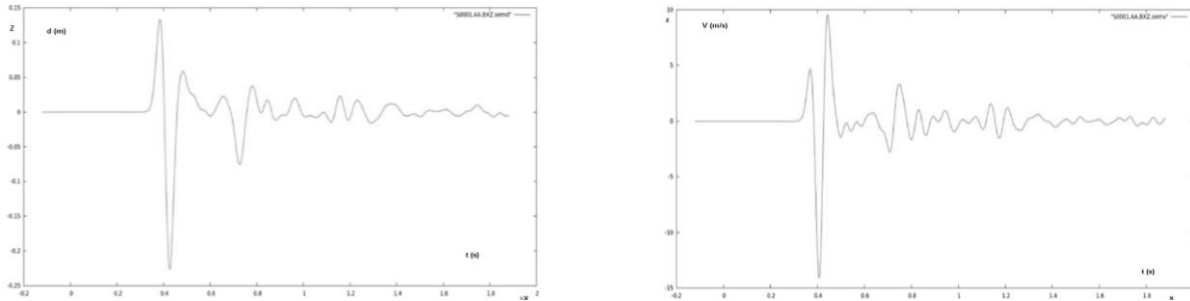


Figura 3- Graficas Distancia vs tiempo y Velocidad vs tiempo en basamento para (P2)

5. CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES A FUTURO

En base a las simulaciones realizadas se puede decir que el código abierto *SPECFEM2D-6.1.5* es una herramienta importante para corroborar los datos geofísicos que se obtienen en esta investigación ya que comprueba que en roca basamento las velocidades de las ondas son mayores y en sedimento disminuyen. Cabe destacar que se simularon distintos perfiles en el área metropolitana de Mérida dando como resultado de manera general que las mayores amplificaciones ocurren en la población de Tabay.

Para investigaciones futuras se recomienda tomar en cuenta la topografía de la zona y para conocer con mayor precisión el comportamiento de las partículas al paso de la onda sísmica se deben elaborar modelos numéricos que abarquen mayores distancias en superficie y mayores profundidades al igual que se debe considerar el momento tensor de la zona de fallas.

Agradecimientos

Se le agradece el apoyo económico al FONACIT proyecto PEI 2011001375. Para la exitosa culminación de este proyecto se conto con la colaboración de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) a través del proyecto 2007333939 (MISION CIENCIAS).

REFERENCIAS

- [1]. Louie, J. (2001). Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays. *Bssa*, Vol.91, No.2, p. 347-364. Reno, Nevada, U.S.A, 2001.
- [2]. Rocabado, V; Schmitz, M; Rendon, Helbert; Violette, J; Franck, A; Sobiesik, M; Ampuero, J; Alvarado, L. “ Modelado numérico de la respuesta sísmica 2D del Valle de Caracas”. Volumen 21 N° 4. Caracas Venezuela 2006.
- [3]. Sosa, G; Klarica, S. Modelado numérico de la meseta de Mérida utilizando el método de los elementos espectrales. E. Davila, G. Uzcategui, M.Cerrolaza (Editores) 2012 SVMNI.

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL ANÁLISIS DE LOS TALUDES LOCALIZADOS ENTRE SAN JUAN DE LAGUNILLAS Y LAGUNILLAS, MUNICIPIO SUCRE, ESTADO MÉRIDA.

Grellys Sosa

Mariela Barrueta

Marlis González

María Elberg

sosarely@ula.ve

marielab20@hotmail.com

mar_lis_18@hotmail.com

mariael@ula.ve

Grupo de Investigación en Geología Aplicada, GIGA, Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, ULA – Mérida, Venezuela.

Resumen. *El Método de Elementos Finitos con frecuencia es muy usado en la práctica ingenieril debido a su potencia para analizar dominios complejos tanto en dos como en tres dimensiones, convirtiéndose de esta manera en una alternativa para el estudio del comportamiento de cuerpos y objetos; por tanto se utiliza en esta investigación, la cual se orienta hacia el análisis geomecánico de los taludes comprendidos entre las poblaciones de San Juan de Lagunillas y Lagunillas en el Municipio Sucre del Estado Mérida, zona constituida por sedimentos poco consolidados que han experimentado pequeños movimientos en masa ocasionando daños en las vías de acceso. La metodología utilizada se desarrolla a través de cuatro etapas: la primera consiste en la revisión bibliográfica y análisis de fotografías aéreas; la segunda se basa en el reconocimiento en campo y recolección de muestras de suelo, en la tercera etapa las mencionadas muestras son ensayadas en el laboratorio; obteniéndose parámetros como Densidad, Módulo de Young y Coeficiente de Poisson; y la última etapa corresponde a la simulación geomecánica, en la cual los datos obtenidos se procesan a través del programa computacional ABAQUSTM (licencia del Centro de Cálculo Científico de la ULA) para conocer los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos experimentados por los taludes debido a las fuerzas de cuerpo. En éste trabajo se simulan 5 taludes en 2 dimensiones y se estudia la influencia de la traza Norte de la Falla de Boconó en uno de ellos, debido a la proximidad de dicha falla. Los resultados obtenidos presentan esfuerzos en el rango de $8E^4$ Pa a $9E^6$ Pa, deformaciones entre $7E^{-6}$ y $8E^{-5}$, ocurriendo únicamente en el rango elástico, y desplazamientos*

con valores de 0.598 cm a 12.39 cm, lo cual es indicativo de taludes relativamente estables. Para un esfuerzo impuesto de 100 KPa en la zona de falla, el modelo 1 exhibe desplazamientos de 5 a 9 cm aproximadamente.

Palabras Claves: Elementos Finitos, Taludes, Análisis Geomecánico.

1. INTRODUCCIÓN

Los taludes que se ubican en la carretera que comunica las poblaciones de San Juan de Lagunillas y Lagunillas a 30 kilómetros al Suroeste de la Ciudad de Mérida, están constituidos por sedimentos aluviales poco consolidados que se caracterizan por su gran torrencialidad [1] y por derivar de los afluentes del margen derecho del Río Chama los cuales generalmente se encuentran expuestos a agentes condicionantes y desencadenantes de movimientos del suelo. Por esta razón surge la necesidad de realizar estudios que permitan determinar aproximadamente el comportamiento geomecánico de dichos taludes ante la acción de distintas cargas y ante determinados eventos.

El software ABAQUS permite modelar cualquier geometría simulando el comportamiento de una gran cantidad de materiales, siendo aplicable en distintas áreas de ingeniería y estudiando el comportamiento de los cuerpos sólidos a través del Métodos de Elementos Finitos, es por tanto utilizado en esta investigación para determinar el rango de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones que experimentan los taludes por su propio peso, y el esfuerzo producido en dichos taludes al simular el desplazamiento de una de las trazas de falla cercana a la zona de interés.

2. Metodología

La metodología aplicada para desarrollar este trabajo de investigación se fundamenta en 4 etapas principales: En la primera etapa se efectúa una revisión bibliográfica – cartográfica - fotogeológica con el fin de conocer el área de estudio y los problemas asociados con movimientos en masa de la zona, se hace una inspección del lugar de interés identificando taludes inestables y propensos a experimentar derrumbes y/o deslizamientos, durante la segunda etapa se seleccionan los taludes a simular y se diseña la geometría de los mismos en base a datos tomados en la fase de campo; además se efectúan tomas de muestras de suelo y roca que son posteriormente ensayadas en el laboratorio para determinar algunos parámetros geomecánicos como la densidad, los cuales son utilizados en la simulación, esto corresponde a la tercera fase, la última etapa atañe a la simulación numérica de las geometrías creadas, utilizando para esto el programa ABAQUS, durante esta fase se aplican cargas y se mallan los modelos diseñados, obteniéndose resultados y generándose las conclusiones de la investigación.

3. Descripción de Modelos

Todos los modelos generados en este trabajo son analizados considerando comportamiento elástico de los materiales, se crean cinco modelos asociados cada uno a los taludes identificados como susceptibles a experimentar movimientos en masa, condición reconocida durante la fase de campo en función de los materiales que conforman los taludes y de otros aspectos como saturación y pendiente de los mismos; las geometrías creadas corresponden a cortes transversales a la vía. De manera general todos los modelos están conformado por dos materiales cuyos

parámetros geomecánicos asignados para la simulación se muestran en la “Tabla 1”, para el caso del Basamento los valores de densidad, módulo de elasticidad y relación de Poisson fueron obtenidos de González [2], mientras que para el cuaternario la densidad de los materiales fue conseguida por ensayos de laboratorio, los valores de E y ν , fueron tomados de Quintero [3] y Casteletti [4] respectivamente.

Tabla 1. Propiedades Geomecánicas asignadas a los Modelos

Materiales	Densidad Natural (Kg/m ³)	E (Pa)	V
Cuaternario. Modelo1	1922		
Cuaternario. Modelo2	1834		
Cuaternario. Modelo3	1881	9.8 E9	0.25
Cuaternario. Modelo4	2000		
Cuaternario. Modelo5	2080		
BASAMENTO	2800	5.196 E10	0.20

3.1 Modelo 1

Este modelo representa el talud N°1 de coordenadas UTM N941175, E237791 en el área de estudio se evidencia el dominio de la traza Norte de la Falla de Boconó con comportamiento normal dextral con un ángulo de inclinación de 78° Santiago [5], la cual afecta directamente este talud ver “Fig. 1”, en la traza de falla el modelo se somete a una fuerza tangencial de 1E5 Pa. El modelo está constituido por una malla de 1075 elementos.

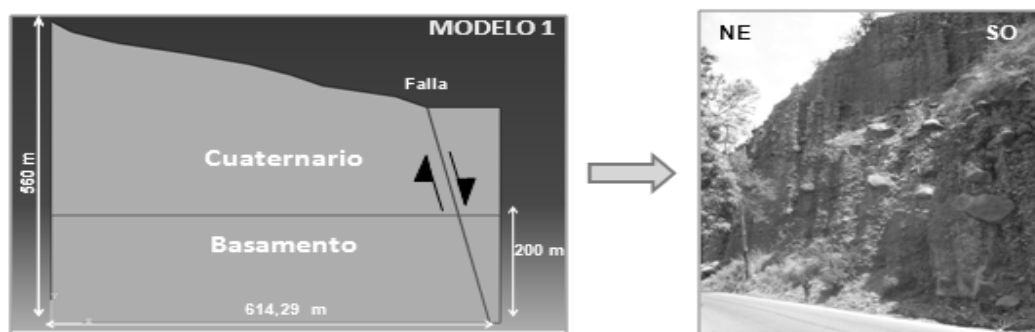


Figura 1- La imagen de la izquierda muestra las dimensiones del modelo y sus materiales constituyentes, mientras que a la derecha se presenta una imagen del talud en campo.

3.2 Modelos 2, 3 4, y 5

A lo largo de la vía principal de la zona de estudio existen varios taludes con características físicas y litológicas similares pero con distintas dimensiones, lo cual conllevó a generar un modelo por cada talud que se mostrara propenso a experimentar algún tipo de movimiento en masa por consiguiente los modelos 2,3,4 y 5 son semejantes ver “Fig. 2”, estos son sometidos a un análisis considerando la acción de su propio peso ya que esta fuerza representa una carga que

actúa de forma permanente y continua; si dicha carga es capaz de romper la estabilidad de los mencionados taludes cualquier otro agente adicional desencadenaría indudablemente movimientos en masa en su cara libre.

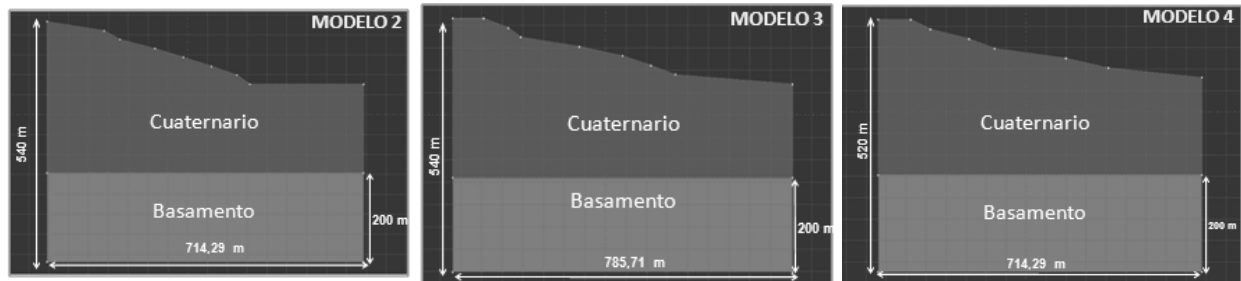


Figura 2- Dimensiones y litologías de las geometrías a simular

4. Resultados

Para todos los modelos simulados se presenta el rango de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, originados por la acción de la gravedad desde la cara libre de los taludes hasta la base de los mismos, el modelo 1 está afectado adicionalmente por la acción de un esfuerzo tangencial en la zona de falla. El programa muestra los resultados utilizando una escala cromática, ver “Fig. 3 y Fig. 4”. En la “Tabla 2” se presentan los resultados obtenidos.

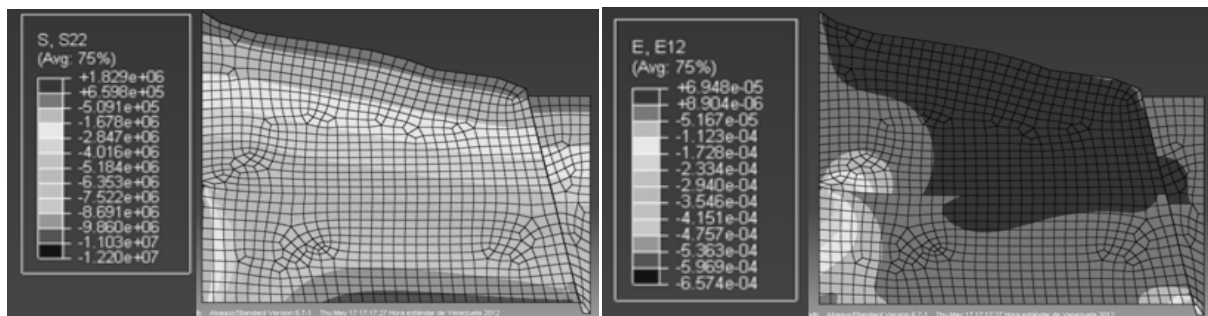


Figura 3- A la derecha los esfuerzos en el eje Y, a la izquierda deformaciones cortantes para el modelo 1

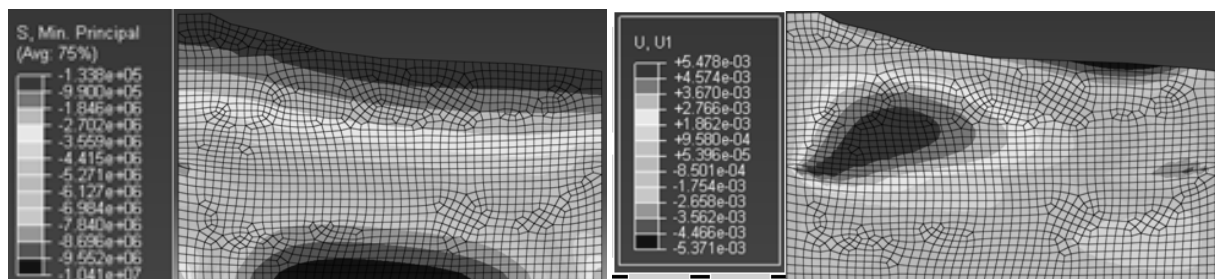


Figura 4- A la derecha esfuerzos y a la izquierda desplazamientos horizontales para el modelo 5

Tabla 2. Resultados obtenidos de la simulación

Resultados obtenidos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Esfuerzos compresivos, en Pa (S Min. Ppal)	-2.498E4 -2.186E6	-1.444E5 -9.465E5	-9.698E4 -9.387E5	-1.297E5 -9.661E5	-1.338E5 -9.900E5
Esfuerzos en dirección x, en Pa (S11)	-1.969E6 -8.511E6	+1.424E6 -2.328E6	+3.584E5 -5.914E5	+1.181E3 -8.207E5	+3.302E4 -8.191E5
Esfuerzos en dirección y, en Pa (S22)	-6.598E5 -5.091E5	-1.294E5 -9.326E5	-9.689E4 -9.385E5	-1.266E5 -9.632E5	-8.300E4 -9.434E5
Esfuerzos cortantes, en Pa (S12)	2.732E5 8.806E5	1.131E6 8.122E5	1.547E5 9.595E5	3.262E5 7.395E5	1.193E6 9.571E5
Deformaciones mínimas principales (E Min. Ppal)	-2.443E-6 -7.711E-4	-1.291E-5 -8.419E-5	-9.477E-6 -9.024E-5	-1.266E-5 -8.831E-5	-1.367E-5 -9.395E-5
Deformaciones en dirección x (E11)	+1.817E-5 -1.426E-4	+2.255E-5 -4.407E-5	-6.954E-5 -4.431E-5	2.457E-5 -4.315E-5	+3.514E-6 -4.443E-5
Deformaciones en dirección y (E22)	-7.518E-5 -3.572E-5	-5.012E-6 -7.533E-5	-2.808E-6 -8.220E-5	-7.173E-6 -8.130E-5	-7.864E-7 -8.032E-5
Deformaciones cortantes (E12)	6.948E-5 8.904E-6	5.614E-5 3.458E-5	6.871E-5 3.758E-5	7.185E-5 2.849E-5	7.863E-5 2.657E-5
Desplazamientos horizontales, en m. (U1)	0.003847 0.005616	0.002995 0.04635	0.002490 0.005022	0.001752 0.005248	0.001754 0.005371
Desplazamientos verticales, en m. (U2)	0.05984 0.1197	0.1036 0.1130	0.1089 0.1188	0.08492 0.1132	0.01136 0.1239

5. Conclusiones

Fundamentalmente los máximos esfuerzos compresivos se concentran en la base de los modelos con valores de -2.186E6 para el modelo 1 hasta -9.900E5 para el modelo 5, los mayores desplazamientos ocurren a lo largo del eje Y con valores de 0.0598 m a 0.1239 m, ubicados en la cara libre del talud mientras que la mayoría de los desplazamientos horizontales exhiben valores entre 2 y 5 milímetros exceptuando el talud 2 que alcanza un desplazamiento horizontal de 4,6 centímetros. Las deformaciones que experimentan los taludes en general tienen valores muy pequeños no llegando a alcanzar el rango plástico, esto si se compara este parámetro con el valor de deformación plástica del concreto el cual es próximo a 0.003; esta similitud se debe a que las rocas en superficie tienen una conducta parecida al concreto.

De forma general, en el modelado de la zona de estudio se pudo concluir que los esfuerzos, las deformaciones y los desplazamientos en cada uno de los modelos mantienen el mismo patrón de comportamiento, a diferencia del modelo 1 en el cual se encuentra asociada la traza Norte de la Falla de Boconó obteniéndose desplazamientos entre 0.05 a 0.09 m sobre la traza de falla.

Las mayores deformaciones que se generan coinciden con las zonas donde se producen los mayores esfuerzos y estos a su vez son ocasionados por el aumento de la presión litostática con la profundidad, lo cual es de esperarse.

Al considerar únicamente fuerzas másicas como cargas actuantes sobre los taludes localizados entre San Juan de Lagunillas y Lagunillas estos se muestran estables; y a pesar de que en uno de ellos fue incorporada una traza de falla con un esfuerzo de cizalla asociado, este último mostró desplazamientos horizontales – verticales y deformaciones similares a los taludes que no tenía dicha característica incorporada, lo cual permite intuir que únicamente el movimiento inducido en la zona de falla y la acción del peso propio de los materiales no afectan significativamente el equilibrio del talud.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación fue parcialmente financiado por CDCHTA, bajo el código: I-1304-12-02-F.

REFERENCIAS

- [1]. Schubert, C. y Vivas, L., El Cuaternario de la Cordillera de Mérida, Andes Venezolanos. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela, 1993.
- [2]. González de Vallejo, L., *Ingeniería Geológica*. Pearson-Prentice Hall. Madrid, España. 2006.
- [3]. Quintero, M. y Sosa, G., Estudio numérico mediante Simulación Geomecánica de los taludes entre la Victoria y San Felipe, Municipio Antonio Pinto Salinas del Estado Mérida. Trabajo Final de Grado: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida, Venezuela. 2010
- [4]. Casteletti, I. *Nociones de Mecánica de Suelos*. Facultad de Ingeniería. Mérida, Venezuela. 1991.
- [5]. Santiago, F., Caracterización estratigráfica de la Cuenca Las González, Estado Mérida, en su sección de la Quebrada el Barro. Implicaciones neotectónicas. Trabajo Final de Grado: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida, Venezuela, 2008.

DETERMINACIÓN DEL TIPO DE ROTURA Y APLICACIÓN DEL MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE EN LOS TALUDES UBICADOS EN LA VÍA HACIA JAJÍ, ESTADO MÉRIDA

Bongiorno Francisco

Belandria O'neill

Castillo Fidel

Belandria Norly

frabon@ula.ve

oneillbb@hotmail.com

fidalc_17@hotmail.com

nbelandria@ula.ve

Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA)

Escuela de geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela

Rubén Chacón

rdchacon@ula.ve

Universidad de Los Andes Mérida-Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Grupo DIMMA.

Resumen. *Este estudio pretende determinar el tipo de rotura de los taludes ubicados en la carretera que conduce al poblado de Jají, estado Mérida y el cálculo del factor de seguridad a través del método de equilibrio límite. Se tomaron datos de campo para caracterizar geomecánicamente los macizos rocosos de acuerdo a la clasificación GSI, RMR y SMR y de suelos empleando la clasificación SUCS y AASHTO. Se aplican las proyecciones estereográficas con el propósito de determinar la cinemática de estabilidad y el tipo de rotura de los macizos rocosos en función de la orientación de las discontinuidades, para posteriormente utilizar el método de equilibrio límite el cual arroja un factor de seguridad que indica la inestabilidad del mismo. Los Resultados obtenidos indican que los macizos rocosos son clasificados de medio a malos, que requieren tratamientos ocasionales o sistemáticos, en el caso de los taludes de suelo en su gran mayoría son estables, pero al considerar el efecto del agua en el método de equilibrio límite, los taludes tienden a la inestabilidad. Todos estos resultados obtenidos con programas computacionales, son corroborados por métodos analíticos, arrojando para ambos métodos, resultados semejantes y aceptables.*

Palabras claves: Talud, Equilibrio límite, Estabilidad, Rotura, Proyecciones

1. INTRODUCCIÓN

En la carretera ubicada entre el sector El Portachuelo y La Chorrera vía Jají en el municipio Campo Elías, se presentan una serie de taludes en suelos y macizos rocosos donde los problemas de inestabilidad está afectando la vía, debido a una serie de factores erosionales y geológicos-estructurales, por lo que se pretende dar solución a estos problemas. Para ello se requiere la adquisición de una serie de datos que se obtienen principalmente a partir de recopilaciones bibliográficas, análisis fotogeológico y trabajo de campo, a partir de este resultado se elabora un mapa Geológico-Estructural, donde se determina para cada talud y macizo de interés el factor de seguridad mediante el método equilibrio límite, con el propósito de evaluar la estabilidad de la zona.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Estudiar geotécnica y estructuralmente los taludes ubicados entre el sector El Portachuelo y La Chorrera, vía Jají, municipio Campo Elías, Estado Mérida.

2.2 Objetivos específicos

Calcular las propiedades y parámetros geotécnicos, que ayuden a la predicción del comportamiento de la roca y del suelo.

Determinar el tipo de rotura, con la ayuda del mapa de densidad Polos y el diagrama de Rosetas, utilizando el programa Dips.

Calcular el factor de seguridad, a través del método equilibrio limite, para la determinación de la estabilidad de los taludes de la zona.

3. METODOLOGÍA

La descripción de los taludes de suelo y macizos rocosos se realiza mediante las observaciones directa en campo y toma de datos “in situ”, donde se determina la litología y se miden diversos parámetros tales como; nivel de meteorización, identificación de las discontinuidades y característica de las mismas, así como, se determina el número de familia de diaclasas y se mide para cada una de ellas las siguientes características: rumbo, buzamiento, separación, frecuencia, persistencia, abertura, rugosidad, relleno, presencia de agua. También se mide la orientación del afloramiento y de las discontinuidades, siguiendo la metodología de González, *et al* [1] y Ferrer M., *et al* [2] para la medición de todos estos parámetros. Se calcularon la dirección e inclinación de los esfuerzos principales de las fallas geológicas que afectan los macizos rocosos siguiendo la metodología de los diedros rectos y por el método analítico de Bongiorno *et al* [3]. Se obtuvieron propiedades geomecánicas en el laboratorio, además se clasificaron geomecánicamente los macizos rocosos de acuerdo a Bieniawski [4]

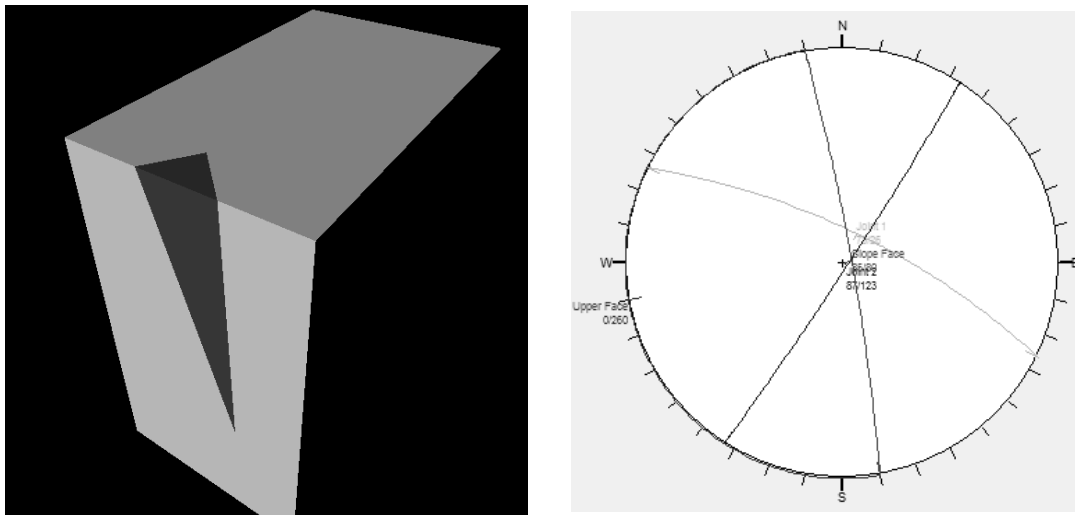
(RMR), Romana [5] (SMR), y Hoek & Brown (GSI) modificada por Sönmez, H y Ulusay, R.[6], para cada macizo rocoso, con el fin de compararlas entre ellas y generar la clasificación más acertada y apropiada para los macizos rocosos estudiados. Se identificaron taludes y laderas de suelo, tomando su respectiva muestra para obtener los datos necesarios en el laboratorio y así emplearlos en el estudio de la estabilidad de ellos. Los ensayos realizados son: ensayo de granulometría que permite separar los diferentes tamaños de las partículas del suelo (gravas, arenas, y finos), utilizando una serie de tamices, contenido de humedad que permite cálculo de la humedad de muestras en condiciones naturales, peso específico de los sólidos, corte directo, límite de consistencia que representa la mayor o menor resistencia que ofrece el suelo para cambiar su forma, índice plástico, límite líquido, límite plástico y por último ensayo de peso unitario. Con los datos obtenidos de los macizos rocosos se introducen en el software RocLab que es un programa computacional, el cual permite calcular parámetros tales como el ángulo de fricción interna y la cohesión del macizo a partir de mediciones hechas en campo. Como datos de entrada se requiere la valoración de GSI obtenida con parámetros medidos en campo, constante de la roca (m_i), la cual se obtiene por tablas tabuladas del programa, y se elige un valor dependiendo del tipo roca encontrado en el macizo estudiado. Perturbación: Alteraciones realizadas por el hombre, que modifican la estabilidad del talud. Rango de rotura de la envolvente: Presenta secuelas directas sobre los parámetros de Mohr-Coulomb encontrados, se debe tomar en cuenta el peso unitario de la muestra y la altura del talud. Otro software empleado es el Dips que permite la realización y procesamiento de las proyecciones estereográficas en las cuales se visualiza la ubicación de las discontinuidades, tipo de rotura (cuña, plana o vuelco) y la correspondiente a la cinemática estabilidad del macizo rocoso. Para procesar los datos, se introducen valores de orientación del talud, de las discontinuidades y ángulo de fricción interna. Al tener representados gráficamente los planos en la red estereográfica se procede a evaluar las condiciones de estabilidad y tipos de rotura que se presentan en los afloramientos. Por otro lado, se usaron los programas computacionales Swedge y Slide para evaluar la estabilidad y calcular el factor de seguridad en los taludes de suelos como en de los macizos rocosos.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En primer lugar se presentan los resultados de los macizos rocosos los cuales se detallan en la tabla 1. Según la calidad de los macizos rocosos por las diferentes clasificaciones geomecánicas poseen un rango de mala a media, la clasificación de SMR arroja una rotura en cuña para el macizo 2, que luego de introducido en el software Swege “Fig. 1” se determina el factor de seguridad dando como resultado un valor de 0,86. Este resultado es comparado con el método analítico propuesto por Ucar [7]. Con respecto a los resultados de los taludes en suelos se utilizó el programa Slide el cual permite calcular el factor de seguridad. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos comparándolo con los métodos analíticos propuestos por Ucar [7]. Al considerar el coeficiente sísmico y la saturación de agua en los taludes de suelo, se puede notar una disminución considerable del factor de seguridad, que es muy probable que se genere en la zona y estos podrían ocasionar una gran inestabilidad en todos los taludes de suelo estudiados. De manera general se muestra como ejemplo las simulaciones el talud 2 “Fig. 2”, de acuerdo con los resultados arrojados por el programa, tanto por el método de Bishop y Fellenius el factor de seguridad es de aproximadamente 1,7, por lo que se le asigna al talud la categoría de estable.

Tabla 1. Resultados de la clasificaciones geomecánicas y Factor de Seguridad de macizos 1 y 2.

Características	Macizo 1	Macizo 2
Clasificación de Bieniawski	Calidad mala	Calidad mala
Índice de resistencia geológica (GSI)	Calidad media	Calidad media
Rotura en cuña	No presenta	Si presenta
Rotura en vuelco	No presenta	Si presenta
Clasificación de Romana	No se estudia porque no hay ninguna rotura	Para la rotura en vuelco el macizo es de buena calidad y en el caso de la rotura en cuña el macizo es parcialmente estable
Factor de seguridad por el programa Swedge	Se realiza solo para rotura en cuña.	Sin tomar en cuenta la cohesión el FS = 0,86, y tomando en cuenta a la misma el FS = 1,42. Considerando el coeficiente sísmico horizontal de 0,3 (COVENIN), el FS= 0,05
Factor de seguridad por el método analítico	No se calcula porque no hay ninguna rotura	FS = 0,86
Estabilidad	Media	Media.

**Figura 1.** Geometría de la rotura en cuña en el macizo 2 con el programa Swedge con su proyección estereográfica

Asimismo, en el caso de tener en consideración el nivel freático y el coeficiente sísmico según las normas COVENIN para el estado Mérida, se utiliza de acuerdo al coeficiente sísmico horizontal un valor de 0,3 y para el vertical 0,15 (ver tabla 3). Cuando el talud se satura con un 95 % de agua utilizando la herramienta de sensibilidad del agua, el factor de seguridad comienza a disminuir y al alcanzar una saturación de 100% el mismo alcanza un valor de 0,95, por lo que se le asigna la característica de muy inestable.

Tabla 2. Resumen del factor de seguridad obtenido por los diferentes métodos.

Factor de seguridad de los taludes de suelos				
Zonas	FS por el Slide (método de Bishop)	FS por el Slide (método de Fellenius)	FS por el método analítico (Bishop)	FS por el método analítico (Fellenius)
Talud 1	4,39	4,26	4,33	4,24
Talud 2	1,71	1,66	1,84	1,81
Talud 3	1,69	1,65	2,03	1,98
Talud 4	2,11	2,17	2,15	2,10

Tabla 3. Resumen del factor de seguridad obtenido por los diferentes métodos teniendo en consideración el coeficiente sísmico y la saturación de agua.

Factor de seguridad de los taludes de suelos teniendo en consideración el coeficiente sísmico y la saturación de agua			
Zonas	FS por el Slide (método de Bishop)	FS por el Slide (método de Fellenius)	FS con un 100% de agua por el Slide (método de Bishop)
Talud 1	1,43	1,39	0,85
Talud 2	0,91	0,89	0,51
Talud 3	0,88	0,85	0,49
Talud 4	1,04	1,01	0,58

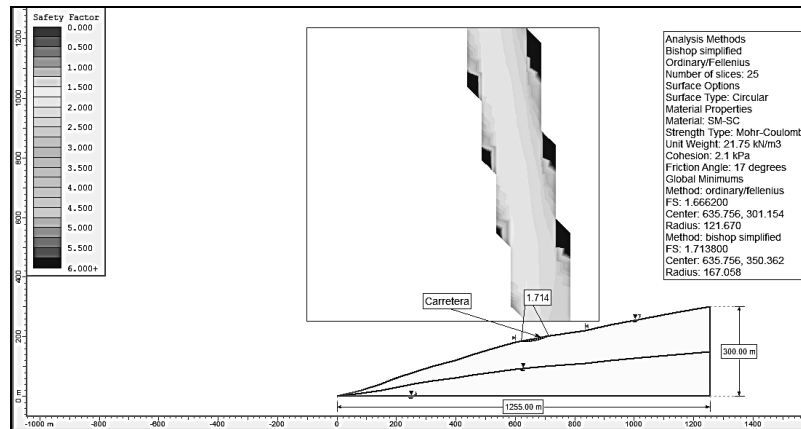


Figura 2- Factor de seguridad mediante el programa Slide para el talud 2.

5. CONCLUSIONES

En el macizo 1 se obtuvo un índice RQD de calidad buena de la roca, el RMR equivale a una clase IV de calidad mala del macizo, y en el caso del GSI dió una valoración de 50, indicando que la calidad del macizo es media, a diferencia de Bieniawski, esta clasificación le asignó al macizo una mejor calidad. Para el caso de la cinemática, el macizo 1 no presentó ningún tipo de rotura. Para el macizo 2 el índice de calidad de la roca es bueno, el RMR le establece al talud una

clase IV de calidad mala, y el GSI es igual a 51, por lo que se le asigna una calidad media al macizo. Según Romana, para el caso de la rotura en vuelco, el macizo 2 es de clase II, asignándole estabilidad y buena calidad, y en el caso de la rotura en cuña, el macizo es de clase III, indicando que el mismo es parcialmente estable. En ambos casos se requiere tratamientos ocasionales o sistemáticos. En la obtención de las propiedades y parámetros del macizo 2, la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ) dan valores elevados, lo que indica una buena resistencia del macizo. En cuanto a la cinemática del talud se determinó la existencia de rotura en vuelco y en cuña, al evaluar esta última con el programa Swedge y de forma analítica, se determinó que el macizo 2 para este tipo de rotura es inestable, y la cuña que en el se forma es relativamente pequeña. Al comparar los resultados del método de equilibrio límite con el analítico, se pudo denotar que los valores obtenidos en ambos métodos son muy similares, lo que permite validar toda la información introducida en los programas. En el caso de tomar en consideración la sismicidad y la saturación de agua en los taludes, el factor de seguridad disminuyó considerablemente y en consecuencia se vuelven muy inestable

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto de investigación del PEII- FONACIT a través del N° 2011001247 y por el CDCHTA- ULA bajo el código I-1382-13-12, instituciones a las cuales se le extiende su agradecimiento e importante apoyo.

REFERENCIAS

- [1].González, L., Ferrer, M., Ortuño L., Oteo, C. *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. Madrid-España. 2002
- [2].Ferrer, M., y Gonzalez, L. *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. Editorial Planeta Tierra. Instituto Geológico y Minero, Madrid – España. 134 p, 2007
- [3].Bongiorno, F., Belandria, N., y Ucar, R. *Determinación de la dirección de los esfuerzos principales a través de análisis numérico y proyecciones estereográficas de la Falla de Boconó en el sector Yacambú estado Lara*. Revista Ciencia e Ingeniería, Facultad de Ingeniería. ULA. Vol. 32, N° 32 pp. 57-66 Abril-Junio 2011.
- [4]. Bieniawski, Z. *The Geomechanics Classification in rock engineering applications*. In Proc. 4 th Int. Congr. Rock Mech., Montreux. 1976
- [5].Romana, *Nuevos factores de ajuste para la aplicación de la clasificación de Bieniawski a los taludes*. 1985
- [6].Sowers G.B., y Sowers G.F.. *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Editorial Limusa-Wiley, SA. México, 1972.
- [7].Ucar, *Manual de anclajes en Ingeniería Civil*. Mc Gray. Madrid, 2004.

IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS OUT-OF-CORE PARA LA VISUALIZACIÓN DE VOLÚMENES SÍSMICOS DE GRAN TAMAÑO

Jorge Castellanos

Luis Arvelo

Deiby Manzo

Pedro Linares

Jorge Rodríguez

jcasteld@uc.edu.ve

luisarvelo592@gmail.com

dmanzov@gmail.com

plinares@uc.edu.ve

jrodrigu@uc.edu.ve

Centro Multidisciplinario de Visualización y Cómputo Científico (CEMVICC), Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad de Carabobo

Av. Universidad, Bárbula, UC. Facultad de Ciencias y Tecnología. Naguanagua Edo. Carabobo, Venezuela

Resumen. *La visualización de datos sísmicos hace uso de archivos de datos 2D y 3D. Sin embargo, la mayoría de las veces la memoria principal disponible en el equipo destinado a tal fin es excedida por el tamaño de los datos a visualizar, es por ello que los datos terminan siendo almacenados en memoria secundaria para ser procesados a demandas por la aplicación de visualización, esta estrategia de procesamiento requiere del desarrollo de técnicas que permitan obtener datos de la memoria secundaria de manera rápida y eficiente, para ser utilizado por el módulo de visualización. En este artículo se introduce un sistema de caché, el cual mediante un algoritmo de pre-búsqueda, basado en hilos (threads), permite obtener los datos a ser visualizados mientras que la aplicación de visualización presenta en pantalla los datos obtenidos previamente.*

Palabras clave: Out-of-core, Visualización de Volúmenes, Caché, Mapeo de texturas.

1. INTRODUCCIÓN

El área de procesamiento de datos en el campo de exploración petrolera, debido a los avances tecnológicos de hoy día, ha incorporado mejoras en la calidad de la información y a su vez hace uso de archivos de procesamientos sísmicos de mayor tamaño, los cuales requieren plataformas de cómputo especializado para su visualización. Éste artículo se enfoca en cómo implementar técnicas *out-of-core* que permitan que el procesamiento de dichos datos sea rápido y eficiente para satisfacer las demandas de la aplicación de visualización cuando éstas exceden la capacidad de la memoria principal [1]. La búsqueda de los datos en disco puede realizarse antes de ser requeridos (pre-búsqueda: *prefetch*) para poder anticiparse a la demanda de información. De esta manera, Rhodes et al. [2], en su *slicer application*, permiten desplazarse en el volumen solamente por sectores que están en la dirección de alguno de los ejes de coordenadas. En este trabajo, se propone la implementación de un soporte *out-of-core* para la visualización de volúmenes de tamaño arbitrario. Este soporte *out-of-core* hace uso de un sistema que evita la carga redundante o innecesaria de datos. Finalmente, se propone un protocolo de pre-búsqueda por demanda que explota la concurrencia del acceso a disco con la visualización a través de un enfoque basado en hilos [3].

2. VISUALIZACIÓN DE VOLÚMENES

El mapeo de texturas se puede efectuar por fragmentos; esta técnica es muy conveniente para el propósito de este trabajo; además esta técnica de visualización permite graficar solo la porción del volumen visible al usuario, lo cual se traduce en un ahorro significativo de memoria y tiempo de procesamiento; la figura 1 muestra un diagrama con las caras ocultas al usuario (caras punteadas) las cuales no serán pintadas para ese instante de tiempo.

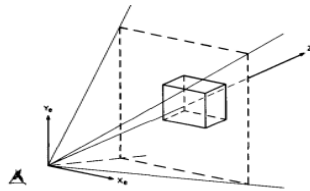


Figura 2 – Caras visibles al usuario

La visualización requiere de un proceso previo de clasificación donde se debe asociar a cada voxel¹ del volumen sus valores correspondiente de color y opacidad de acuerdo a una función de transferencia que asigna a cada valor de intensidad su color y opacidad respectiva; para este proyecto se implementó una *Look Up Table*² para asignar a cada valor de intensidad del volumen un color de acuerdo a la paleta que el usuario haya seleccionado para la representación del volumen. La figura 2 muestra el proceso de asignación de colores de acuerdo al valor de intensidad.

¹ Es la unidad cúbica que compone un objeto tridimensional, es equivalente a un pixel 3D.

² Un arreglo asociado que se usa para sustituir una rutina de computación con una simple indexación de los arreglos.

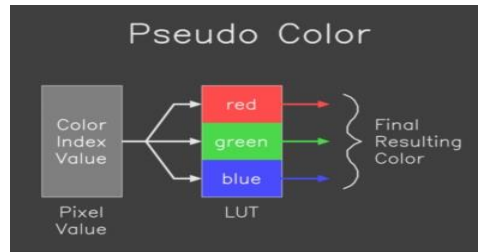


Figura 2 – Función de Transferencia para el mapeo de colores del volumen

3. MANEJO DE DATOS *OUT-OF-CORE*

Administrar las solicitudes del módulo de visualización por parte de la capa *out-of-core* para la búsqueda en disco y actualización de los datos en memoria principal requiere un esquema de organización que permita administrar la demanda de datos eficientemente, por esta razón se plantea un esquema basado en dos niveles.

El nivel superior posee un conjunto de datos en memoria principal que alimenta al módulo de visualización para generar un polígono texturizado, este nivel es básicamente un mapeador de texturas 2D. El nivel inferior se puede ver como un conjunto de tres estrategias enfocadas a la transferencia de los datos desde el disco a la memoria principal. La primera es el esquema de organización de los datos en disco de tal forma que minimice el tiempo de lectura; la segunda es un sistema de caché intermedio que contiene los datos potencialmente requeridos por el módulo de visualización y la tercera una estrategia eficiente de pre-búsqueda de los datos encargado de leer los datos en disco en el tiempo t_i que podría ser utilizados en el tiempo t_{i+1} .

3.1 Organización de los datos

Los datos de entrada en el campo de visualización de volúmenes sísmicos viene dado por un archivo SEG-Y³ el cual contiene un número de parámetros *inline*, *crossline* que representan las coordenadas x e y; y contienen un número de muestras por traza que consisten en valores escalares que representan la intensidad del volumen que representan a z. Este conjunto de datos de entrada es muy similar al que representan las aplicaciones de visualización científica [1] [4]; la entrada al módulo de visualización contiene una lista de vértices, donde cada vértice aparece exactamente una sola vez y cada uno de ellos está compuesto por las coordenadas x, y, z y un valor escalar que representa la intensidad. La construcción de una figura geométrica específica es simple si los datos están en memoria principal, donde solo tenemos que ubicar en memoria el vértice que necesitamos, sin embargo cuando el tamaño de los datos es demasiado grande, para ser almacenado completamente en memoria, cada vértice que requiere el módulo de visualización se traduce en un acceso aleatorio a disco.

Para esta investigación se implementó la estructura de datos basada en árboles B+ (*B+ tree*) ya que por ser auto-balanceada y debido a que mantiene los datos almacenados de manera ordenada y la consulta, inserción y eliminación se pueden realizar de manera muy eficiente, es la más usada en las estructuras de datos de memoria externa [1]. La figura 3 muestra la estructura de un árbol B+.

³ Formato de archivo estándar en el ámbito de la exploración sísmica.

Para mayor eficiencia en el acceso a memoria secundaria se utilizó la biblioteca Tokyo Cabinet [5], la cual consiste en un conjunto de rutinas para la gestión de una base de datos que organiza los datos en tabla hash, árbol B+, o matriz de longitud fija.

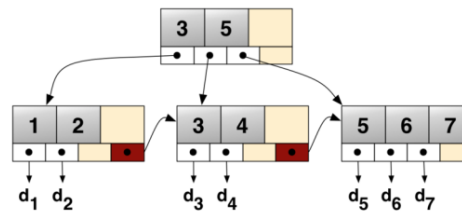


Figura 3 – Árbol B+

3.2 Demanda de datos

Para el módulo de visualización se definieron patrones de acceso que coinciden con los ejes del plano tridimensional x , y , z ; siguiendo el esquema implementado en [6], es decir, para un instante de tiempo t_i se cargaran en memoria solo los datos que conforman la superficie del volumen mostrado en ese instante y para el instante t_{i+1} se restringe la visualización a los datos que son vecinos a los obtenidos para el tiempo t_i . Los datos que no hayan sido cargados en memoria principal serán demandados posteriormente por la capa *out-of-core*, una vez que los datos que se encuentran en memoria principal hayan generado una nueva textura y se actualice el polígono correspondiente.

3.3 Implementación del caché

Como los datos deben almacenarse para facilitar su recuperación y reemplazo se escogió una estructura de datos basada en tabla de *Hash* con reemplazamiento LRU (*Least Recently Used*, Menos usada recientemente), la cual al agregar un nuevo elemento estando llena la tabla, ésta sustituirá en la caché al dato que ha sido consultado menos recientemente por el módulo de visualización. De esta forma se mantienen en memoria los datos que más han sido solicitados.

La biblioteca utilizada se conoce como *lru-cache* [7] en Google Code, la cual proporciona operaciones rápidas de inserción, recuperación y consulta de tiempo constante.

3.4 Estrategia de búsqueda

Cuando el usuario se desplaza en el volumen sísmico, los datos en la caché deben ser actualizados con la finalidad de anticipar la demanda de datos y disminuir el número de búsquedas en disco; es por ello que se implementó un algoritmo de pre-búsqueda que tiene como finalidad predecir los datos que a futuro serán solicitados por el módulo de visualización y que serán almacenados en la caché, logrando así que los accesos a disco sean reducidos casi en su totalidad. Este esquema de búsqueda requiere que el algoritmo se ejecute en segundo plano, por lo tanto se implementó un algoritmo basado en hilos que permite realizar la búsqueda de nuevos datos en el disco mientras se realiza el proceso de visualización.

4. RESULTADOS

Las pruebas fueron realizadas sobre un procesador *intel core i5* a 1.60 Ghz, 8 GB de RAM DDR3, tarjeta gráfica NVIDIA 560GTX con 1.025 GB, velocidad de núcleo (*core clock*) del GPU 1104 MHz, ancho de banda de memoria de 128.2 GB/s, y un disco duro Western Digital de 1 TB con 64 MB de caché, interfaz SATA 6 Gb/s, tasa de transferencia de 106 GB/s, tiempo promedio de lectura 89,6 MB/s una velocidad de rotación de 7200 rpm bajo el sistema operativo GNU/Linux, Kernel 3.7.10. El proceso se encuentra en fase de desarrollo, por lo que las pruebas sobre los volúmenes de datos se encuentran en su punto de ejecución, sin embargo se ha podido llevar a cabo el intercambio de información entre los módulos *out-of-core* implementando la organización de los datos en disco e intercambiando los datos desde la caché que almacena los datos en memoria principal, se observan mejoras significativas en la velocidad de respuesta de la aplicación al implementar técnicas avanzadas *out-of-core*. En la tabla 1 se muestran los tiempos que tarda la carga de los datos implementando o no las técnicas *out-of-core*, donde se evidencia una disminución de los tiempos de carga en disco.

Tabla 1. Carga de SEG-Y

Tamaño de SEG-Y	Sin <i>out-of-core</i>	Con <i>out-of-core</i>
166 MB	02.770 seg	02.510 seg

La tabla 2 se muestra la carga en memoria de los datos sin la utilización de la caché, se evidencia una disminución en la reservación de recursos para el correcto funcionamiento.

Tabla 2. Memoria sin caché

Tamaño de SEG-Y	Sin <i>out-of-core</i>	Con <i>out-of-core</i>
166 MB	1215 MB	830 MB

La tabla 3 se muestra la carga en memoria de los datos utilizando la caché, se evidencia una disminución en la reservación de recursos debido a que se están almacenando datos de las coordenadas para reducir el acceso a disco.

Tabla 3. Memoria con caché

Tamaño de SEG-Y	Sin <i>out-of-core</i>	Con <i>out-of-core</i>
166 MB	1215 MB	1073 MB

La tabla 4 se muestra los tiempos que se tarda el módulo de visualización mostrar un gráfico de corte de tres planos con las técnicas pero comparando el uso y no uso de la caché.

Tabla 4. Tiempo de dibujado de corte de tres planos

Tamaño de SEG-Y	Con caché	Sin Caché
166 MB	0.3 seg	0.6 seg

5. CONCLUSIÓN

En la investigación se diseñó una capa para el manejo de datos con soporte *out-of-core* con el fin de acelerar la visualización 2D y 3D de volúmenes sísmicos para la industria petrolera que excedan la capacidad de memoria disponible en la plataforma de procesamiento. El acceso a disco es el principal causante de retardos en el desempeño de la aplicación, sin embargo a través del diseño de una buena estrategia para el manejo de la demanda de los datos, se mejora significativamente el desempeño de la aplicación permitiendo incluso manipular el área de visualización de forma interactiva. A través de la buena organización de los datos con un algoritmo de pre-búsqueda basada en hilos y de una implementación de caché se ha podido reducir el tiempo requerido para recuperar los datos de disco y por ende se ha podido reducir los tiempos de espera para visualizar los datos. La pre-búsqueda de los datos es vital para reducir los accesos a disco, por lo que se seguirán analizando diferentes algoritmos de pre-búsqueda que permitan mantener en memoria principal los datos que serán más solicitados.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología por el co-financiamiento de este trabajo mediante el Proyecto PEII No. 201200180.

REFERENCIAS

- [1]. Chiang, Y., Correa, W., Silva, C., El-sana, J., & Lindstrom, P., Out-of-core Algorithms for Scientific Visualization and Computer graphics. Survey paper for a Tutorial Course in IEEE Visualization Conference 2002 (Vis '02), Boston, MA, 2002.
- [2]. Rhodes, P. J., Tang, X., Bergeron, D., & Sparr, T. M. Out of core visualization using iterator aware multidimensional prefetching. *SPIE proceedings series*, Vol.5669, pp.295-306, 2005.
- [3]. Sulatycke, P., & Ghose, K., A Fast Multithreaded Out-of-Core Visualization Technique. In *Proc. 13th International Symposium on Parallel Processing*, pp. 569-575, USA, 1999.
- [4]. Chiang, Y., & Silva, C., External Memory Techniques for Isosurface Extraction in Scientist Visualization. In Abello, J. & Vitter, J.S., eds, *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, AMS, vol. 50, pp. 247--277, 1999.
- [5]. <http://fallabs.com/tokyocabinet/>
- [6]. Valencia, F., Rodríguez, J., Castellanos, J., & Larrazábal, G., Out-of-core Visualization for 3D large Seismic Data. *Conferencia Latino Americana de Computación de Alto Rendimiento*, Brasil, 2010.
- [7]. <https://code.google.com/p/lru-cache-cpp/>

RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES NO LINEALES PRESENTES EN EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES CONSIDERANDO ROTURA PLANA

Norly Belandria

Roberto Ucar

Francisco Bongiorno

nbelandria@ula.ve

robertoucar@gmail.com

frabon@ula.ve

Grupo GIGA, Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad de Los Andes, Venezuela.

Francisco León

fleon@ula.ve

Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes, Venezuela

Miguel Díaz

dmiguel@ula.ve

Grupo DIMMA, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes, -Venezuela

Jhonnathan Arteaga

arteagajt@gmail.com

Departamento de Cómputo Científico y Estadística, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Resumen. *En la presente investigación se aplican métodos numéricos en la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales. Dichas ecuaciones son producto de emplear las ecuaciones de equilibrio a la cuña deslizante de un talud o una ladera, la cual está dividida en rebanadas y determinar el esfuerzo normal, el factor de seguridad y coordenadas del centro geométrico, utilizando las técnicas de cálculo variacional e integración numérica. Se aplica el método iterativo de Newton Rhapson usando paquetes computacionales como el ESS, Maple y MatLab los cuales se comparan con los método de rotación de ejes y simulación por Slide. Para ello, se asume conocida en el talud la rotura de tipo plana con geometría sencilla, y sus propiedades geomecánicas. El factor de seguridad y los esfuerzos normales obtenidos por los diferentes programas y métodos arrojan valores muy semejantes, mientras que las coordenadas del centro geométrico de la superficie de rotura, por los*

programas utilizados arroja valores muy diferentes, los cuales tienden ajustarse a una línea recta, satisfaciendo el sistema de ecuaciones no lineales.

Palabras claves: Ecuaciones, Talud, Equilibrio, Esfuerzos, Integración.

1. INTRODUCCIÓN

El movimiento de una masa rocosa en la superficie de un talud, debido a la acción de la gravedad, junto al debilitamiento progresivo de los materiales, consecuencia de la meteorización y a la actuación de otros fenómenos naturales y ambientales, hacen que los movimientos del terreno sean relativamente habituales en la masa rocosa que conforma el talud. La investigación está basada en la resolución de las ecuaciones no lineales presentes en el estudio de la estabilidad de taludes asumiendo para este primer caso conocida la superficie de rotura plana y aplicando el método iterativo de Newton Rhapsom para resolver las ecuaciones obtenidas con el propósito de obtener la solución más aproximada al compararla con el método analítico de rotación de ejes. Las soluciones son obtenidas usando paquetes computacionales como el ESS, Maple y MatLab.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Son muchos los investigadores que se han dedicado al estudio de la estabilidad de taludes aplicando técnicas matemáticas con el propósito de determinar la superficie de rotura crítica que permita obtener el factor de seguridad mínimo para la realización de un buen diseño de taludes. Una de las técnicas es el método de equilibrio límite [1], ampliamente investigado en el campo de la geotecnia. Así mismo el método analítico de rotación de ejes [2]. Dichos métodos poseen limitaciones debido a las suposiciones que se requieren para la obtención del factor de seguridad (FS), además de que la superficie estudiada no necesariamente es la crítica.

La aplicación del cálculo variacional en el estudio de estabilidad de taludes en principio fue propuesta por Baker & Garber [3], quienes asumieron terreno homogéneo, ausencia de presiones intersticiales y de cargas aplicadas, para encontrar la combinación crítica de la línea de rotura $y(x)$ y el esfuerzo normal $\sigma(x)$, satisfaciendo todas las ecuaciones de equilibrio. Posteriormente Chen [4], propuso un método basado en el equilibrio global, pero minimiza el peso de la masa deslizante. Castillo & Revilla [5] aplican el cálculo de variaciones a la estabilidad de taludes, generalizando las ecuaciones de Euler, las condiciones naturales de contorno y de transversalidad para determinar la línea crítica. Después, Luceño & Castillo [6] realizaron un análisis crítico de todos los métodos variacionales aplicados hasta el momento señalando las limitaciones de cada uno. Finalmente, Ucar [7] en su manual de anclajes realiza un capítulo de la aplicación del cálculo de variaciones en la estabilidad de taludes, obteniéndose un sistema de ecuaciones no lineales, en el cual el factor de seguridad y las tensiones normales actuando sobre la superficie potencial de falla deben obtenerse a través de métodos numéricos.

Todas estas investigaciones permiten plantear un avance de la resolución del sistema de ecuaciones no lineales aplicados a la estabilidad de taludes. Para esto, en principio la superficie de rotura se considera plana facilitando la comparación con los métodos analíticos e ir chequeando las ecuaciones no lineales [7].

3. METODOLOGÍA

Aplicando las ecuaciones de Ucar [7] y considerando conocida la superficie de rotura plana, con terreno homogéneo, "Fig. 1":

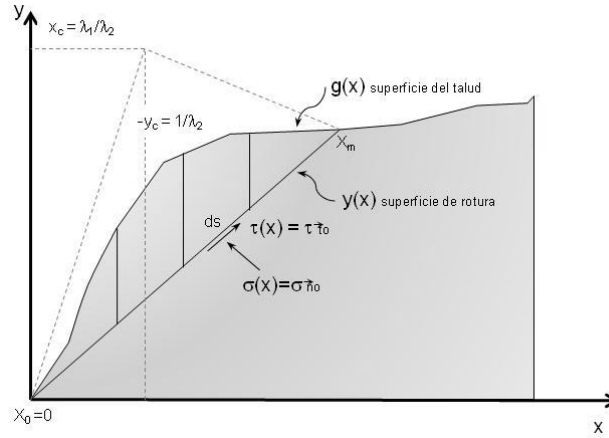


Figura 1- Talud considerando la superficie de rotura plana, pasando por el pie del talud.

La ecuación de equilibrio expresada vectorialmente considerando la figura anterior:

$$J_1 = \int (\tau \vec{t}_0 + \sigma \vec{n}_0) ds + \int_{x_0}^{x_m} \frac{\vec{q}}{\cos \beta_t} dx - (1 + K_v) \int_{x_0}^{x_m} [g(x) - y(x)] \vec{j} dx - \gamma K_h \int_{x_0}^{x_m} [g(x) - y(x)] \vec{j} dx \quad (1)$$

Donde: $\tau = \tau(x)$ = la tensión tangencial [kN/m^2] y $\sigma = \sigma(x)$ = la tensión normal [kN/m^2] ambos actúan sobre $y(x)$. γ = peso unitario del suelo o roca, [kN/m^3]. ds = diferencial de longitud de la superficie potencial de rotura. $g(x)$ = función de la superficie del talud [m]. $y(x)$ = función de la superficie de rotura [m].

Luego, se obtienen las ecuaciones de equilibrio considerando la "Fig. 1" donde al realizar la sumatoria de fuerzas horizontales, verticales y de momentos, resulta:

$$\int_{x_0}^{x_m} \left\{ C + (\sigma - u) \tan \phi - FS \left[\sigma y'(x) + K_h \gamma (g(x) - y(x)) - \frac{q_x}{\cos \beta_t} \right] \right\} dx = 0 \quad (2)$$

$$\int_{x_0}^{x_m} \left\{ [C + (\sigma - u) \tan \phi] y'(x) + FS \left[\sigma + \frac{q_y}{\cos \beta_t} - \gamma (1 + K_v) (g(x) - y(x)) \right] \right\} dx = 0 \quad (3)$$

$$\int_{x_0}^{x_m} \left\{ [C + (\sigma - u) \tan \phi] [y(x) - x y'(x)] - FS \left[\begin{aligned} &\sigma (x + y(x) y'(x)) + \frac{1}{\cos \beta_t} (x q_y - q_x g(x)) \\ &-\gamma (1 + K_v) (g(x) - y(x)) + \gamma K_h \left[\frac{g(x)^2 - y(x)^2}{2} \right] \end{aligned} \right] \right\} dx = 0 \quad (4)$$

integrar las ecuaciones (2), (3) y (4) se aplica el método de integración compuesta abierta de Newton Cotes (regla compuesta del punto medio). Además se considera en este estudio la geometría de un talud ideal tal como se muestra en la "Fig. (2)", [8].

Para dar solución y agrupar las ecuaciones de equilibrio (2), (3) y (4), se utilizan los multiplicadores de Lagrange, de acuerdo con la ecuación (5):

$$G = \sum F_h + \lambda_1 \sum F_v + \lambda_2 \sum M \quad (5)$$

$$G = \left[C + (\sigma - u) \tan \phi - FS \left[\sigma y' + K_h \gamma (g(x) - y(x)) - \frac{q_x}{\cos \beta_t} \right] \right] \\ + \lambda_1 \left[\left[C + (\sigma - u) \tan \phi \right] y' + FS \left[\sigma + \frac{q_y}{\cos \beta_t} - \gamma (1 + K_v) (g(x) - y(x)) \right] \right] \quad (6) \\ + \lambda_2 \left[\left[C + (\sigma - u) \tan \phi \right] [y(x) - X y'(x)] - FS \left[\begin{array}{l} \sigma (X + y(x) y'(x)) + \frac{1}{\cos \beta_t} (X q_y - q_x g(x)) \\ -\gamma (1 + K_v) (g(x) - y(x)) + \gamma K_h \left[\frac{g(x)^2 - y(x)^2}{2} \right] \end{array} \right] \right]$$

Teniendo en cuenta, la ecuación diferencial de Euler:

$$\frac{\partial G}{\partial y} = \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial G}{\partial y'} \right) \quad (7)$$

Luego, sustituyendo dichas derivadas en la "Ec. (7)", y además considerando, $y_c = -\left(\frac{1}{\lambda_2}\right)$; $x_c = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)$, se obtiene,

$$\left[\tan \phi (x - x_c) + FS (y - y_c) \right] \left(\frac{d\sigma}{dx} \right) - (x - x_c) \left[\left(\frac{du}{dx} \right) \tan \phi + \gamma (1 + K_v) FS \right] + 2C \\ + 2(\sigma - u) \tan \phi + FS K_h \gamma (y - y_c) = 0 \quad (8)$$

Al aplicar la "Ec. (8)", se obtienen tantas ecuaciones como rebanadas se han planteado en el talud a estudiar. . Con la ayuda de los paquetes computacionales ESS, Maple y MatLab se resuelve el sistema de ecuaciones no lineales, los cuales se comparan con el Método de rotación de ejes [2] y el método de las rebanadas propuesto por Fellenius [1].

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la aplicación de las ecuaciones (2), (3), (4) y (8) y resolución del sistema de ecuaciones no lineales se considera un talud sencillo cuyas características geométricas se observan en la "Fig. 2" y las propiedades geomecánicas utilizadas son: cohesión (C) = 20 kN/m², ángulo de fricción interna (ϕ) = 22,6 °, peso unitario (γ) = 20 kN/m³, presión de poros (U) = 0, ángulo de rotura (α) = 56,3 °

A continuación, se presenta en la tabla 1 el cuadro comparativo de los diferentes valores de los esfuerzos normales a la superficie de rotura (σ) para cada rebanada, el factor de

seguridad (FS), y los valores de x_c y y_c , los cuales se obtienen aplicando las diferentes métodos.

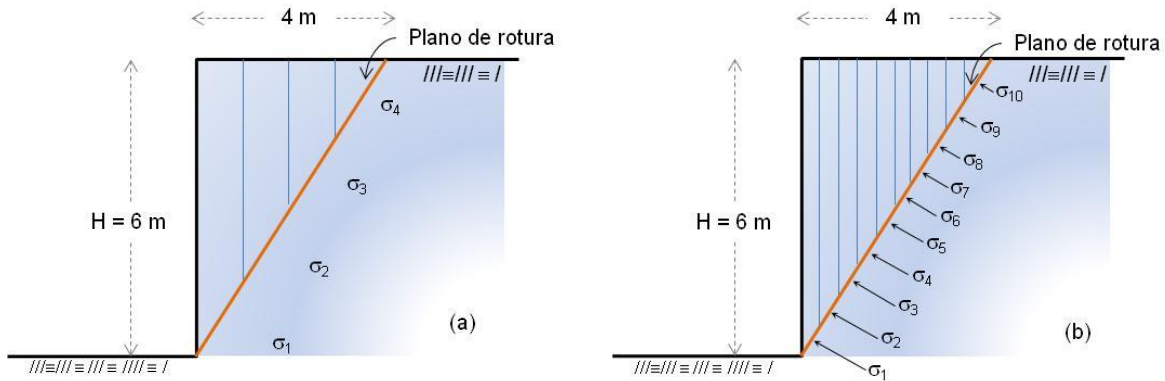


Figura 2: Representación del talud a estudiar, señalando las características geométricas y los esfuerzos a determinar en cada rebanada (a) Talud con 4 dovelas (b) Talud con 10 dovelas

Tabla 1. Cuadro comparativo del sistema de ecuaciones no lineales con el método de equilibrio límite, y el método analítico

Esfuerzo (kPa) y x_c, y_c (m)	Sistema de ecuaciones			Analítico	Equilibrio límite
	MatLab	ESS	Maple (n=0)	Rotación de ejes	(fellenius ordinario)
σ_0				36.9231	
σ_1	32.3382	32.31	32.3078	32.3077	32.3077
σ_2	23.0464	23.08	23.0767	23.0769	23.0769
σ_3	13.8157	13.85	13.8459	13.8461	13.8461
σ_4	4.6457	4.615	4.6155	4.6153	4.61538
σ_5				7.492E-15	
FS	0.9998	0.9997	0.9997	0.9997	0.9983
x_c	342.929	1.919E6	59682.043		
y_c	-883.640	-4.957E6	-1.5415E5		

Tabla 2. Cuadro en función del número de rebanadas, a través del programa Maple

Esfuerzo (kPa) x_c, y_c en (m)	Maple rebanadas=4	Maple rebanadas=6	Maple rebanadas=8	Maple rebanadas=10
σ_0				
σ_1	32,3077	34,0977	34,6163	35,0787
σ_2	23,0765	27,6405	30,0001	31,3852
σ_3	13,8457	21,3380	25,3841	27,6920
σ_4	4,6154	15,1865	20,7685	23,9991
σ_5		9,1828	16,1531	20,3065
σ_6		3,3233	11,5380	16,6141
σ_7			6,9232	12,9221
σ_8			2,3087	9,2304
σ_9				5,5390
σ_{10}				1,8479
x_c	53642,01558	61,5166	18104,9489	11283,9515
y_c	-138557,275	-156,7956	-46763,6311	-29144,7259

Asimismo se presenta en la tabla 2, los valores obtenidos del esfuerzo normal para cada rebanada, factor de seguridad (FS) y x_c e y_c variando el número de rebanadas o dovelas aplicando el programa de Maple.

Cabe destacar que los resultados obtenidos por los diferentes métodos son muy semejantes en cuanto al valor del esfuerzo y factor de seguridad, sin embargo los valores de x_c y y_c son muy dispersos y variados cuando se resuelve el sistema de ecuaciones por los diferentes programas y variando el número de rebanadas o dovelas. Esta discrepancia permite de alguna manera buscar una relación de x_c y y_c , por cuanto, es importante señalar que dichos valores se relacionan ajustándose a una línea recta con pendiente constante (y_c/x_c), es decir, la relación de $(-1/\lambda_1)$ es la pendiente de la recta el cual da como resultado valor constante que indica todos los probables valores que puede tener x_c e y_c los cuales se relacionan mediante la ecuación lineal $y_c = -2,583x_c + 2,134$.

5. CONCLUSIONES

Al aplicar los diferentes métodos para buscar una solución del sistema de ecuaciones no lineales es importante resaltar que para el caso considerando superficie de rotura plana no es la más desfavorable y la superficie crítica no necesariamente pasa por el pie del talud, solo se busca trabajar el comportamiento de las ecuaciones no lineales para el caso donde se pueda comparar con los métodos analíticos y un talud con geometría sencilla, y por ende, chequear el sistema de ecuaciones dando la validez requerida. Los esfuerzos normales (σ) obtenidos por los diferentes programas, al compararlos con el método analítico y la simulación por Slide arroja valores muy semejantes, indicando que el procedimiento llevado a cabo para resolver el sistema de ecuaciones es acertado. Las coordenadas del centro geométrico de la superficie de rotura (x_c , y_c), por los programas utilizados arroja valores muy diferentes, por tanto se consigue una relación entre dichos valores ajustándose a una línea recta los cuales satisfacen el sistema de ecuaciones no lineales.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Fellenius, W. Calculation of Stability of Earth Dams. Transactions, *Second Congress, Large Dams*, 4, 445 p, 1936.
- [2]. Belandria, N., Ucar, R., & Bongiorno, F. Determinación de expresiones matemáticas para el cálculo de los esfuerzos aplicados a la estabilidad de taludes. *Ciencia e Ingeniería*, 32(3), 115-122, 2011.
- [3]. Baker, R., & Garber, M. Variational Approach to slope stability. *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, 2, págs. 9-12. Tokio, 1977.
- [4]. Chen, W.-F. Limit Analysis and soil plasticity. New york: *Elsevier Scientific Publishing Company*, 1975.
- [5]. Castillo, E., & Revilla, J. Una aplicación del cálculo de variaciones a la estabilidad de taludes. *Boletín de información del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo*, 3-23, 1976.
- [6]. Luceño, A., & Castillo, E. Análisis crítico de los métodos variacionales aplicados a la estabilidad de taludes. *Boletín de información del Laboratorio de Carreteras y Geotecnia*, 3-14, 1980.
- [7]. Ucar, R. Manual de Anclajes en Ingeniería Civil (1 ed., Vol. 1). Madrid, España: Universidad Politecnica de Madrid, 2004.
- [8]. Burden, R., & Faires, D. Análisis Numérico. México: Internacional Thomson Editores, 2002.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA TRINCHERA 41+000 A 41+240 DE LA AUTOPISTA SAN CRISTÓBAL – LA FRÍA EMPLEANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Jesús Torres

Roberto Torres

j.torres@ula.ve

thorj@ula.ve

Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez, Edificio de Ingeniería, Ala Oeste, Tercer Nivel, Mérida-Venezuela.

Resumen. *Los análisis de estabilidad de taludes se efectúan con la finalidad de alargar la vida útil de determinado proyecto de ingeniería, estos pueden realizarse por dos métodos, el método de equilibrio límite y el método de elementos finitos. Ésta investigación analiza la estabilidad de una trinchera encontrada en el subtramo San Juan de Colón – San Félix de la Autopista San Cristóbal – La Fría, empleando el Método de Elementos Finitos; para ello en primer lugar se realiza una investigación documental y una fotointerpretación que sirve de base a la etapa de campo, donde se toman los datos necesarios para el análisis y se recopilan las muestras que se estudian en la etapa de laboratorio; los resultados de estos ensayos, junto con el modelo geológico establecido, son la base del análisis de estabilidad como tal. Los taludes en análisis están conformados por perfiles de suelos transportados, los cálculos de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos indican que los mismos podrían resultar inestables, producto de las elevadas alturas y pendientes, aunado a la baja cohesión de los materiales.*

Palabras claves: Análisis de estabilidad, Talud, Suelo, Propiedades Geomecánicas, Método de Elementos Finitos.

1. INTRODUCCIÓN

Las obras de ingeniería civil generan cambios en la geometría de las laderas, debiendo aplicarse la ingeniería geológica, específicamente la geotecnia, para lograr que los taludes sean estables. Actualmente los estudios de estabilidad se basan en los métodos de equilibrio límite, sin

embargo en los últimos tiempos se ha incrementado significativamente el uso del método de los elementos finitos, que considera las relaciones esfuerzo – deformación.

Esta investigación analiza la estabilidad de una trinchera del tramo San Félix – San Juan de Colón de la Autopista San Cristóbal – La Fría, obra estratégica para el occidente del país, por lo que la investigación representa un aporte significativo para el desarrollo y construcción de la misma.

2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área en estudio se encuentra entre las poblaciones de San Juan de Colón y San Félix del Municipio Ayacucho del Estado Táchira, entre las coordenadas UTM 0802458N, 0895520E y 0802906N y 0893999E, progresivas 41+000 y 41+240 de la autopista (Fig. 1).

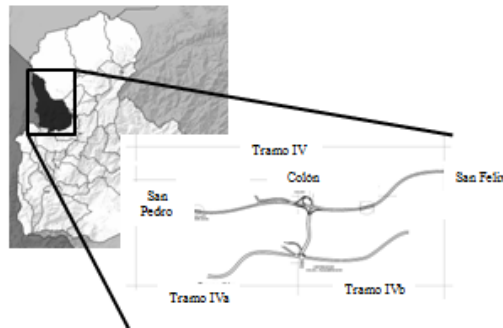


Figura 1- Ubicación Referencial del Área de Estudio

3. METODOLOGÍA

3.1 Estudios previos

Consiste en la búsqueda de toda la información disponible sobre el proyecto y la zona en estudio. En esta etapa se analizaron las fotografías aéreas del área comprendida entre San Félix y San Juan de Colón, pertenecientes a la misión 0102127 del año 1978, escala 1:5000.

3.2 Levantamientos geológicos – geotécnicos de campo

En esta etapa, se verifica la información obtenida en previamente, además de identificar los factores intervinientes en la estabilidad. Posteriormente, se recopilan los datos geológicos-geotécnicos del talud, para su caracterización a detalle y se realiza la toma de muestras para los correspondientes ensayos de laboratorio.

3.3 Etapa de laboratorio

Se procesaron las muestras para obtener las propiedades geomecánicas: contenido de humedad natural, peso específico relativo de los sólidos, análisis granulométrico, límites de consistencia, peso unitario, corte directo y compresión simple. Los datos e interpretaciones se realizan según lo propuesto por autores como Casteletti [1], Ugas [2] y Bowles [3].

3.4 Análisis de estabilidad por el método de elementos finitos

Según Chandrupatta y Belegundo [4] un análisis por elementos finitos es una interacción lógica de tres etapas: pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

El pre-procesamiento implica la preparación de datos tales como la geometría, las condiciones de frontera y la información sobre las cargas y el material. La etapa de procesamiento conlleva la generación y modificación de la matriz de rigidez así como la solución de las ecuaciones planteadas. Por último, la etapa de post-procesamiento versa sobre la presentación e interpretación de resultados; aquí se muestra y analiza la distribución de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones.

Geometría. El modelo consiste en secciones bidimensionales ubicadas en las progresivas 41+000 y 41+180, basándose en cambios significativos en el espesor de la terraza o cambios en la altura y pendiente de los taludes.

Para la división del modelo en elementos finitos se utilizaron elementos triangulares de seis nodos, cuidando las relaciones de aspecto para garantizar la confiabilidad de los resultados, se realizaron refinamientos puntuales en las caras libres y en los estratos de pequeño espesor.

Comportamiento mecánico de los suelos. El comportamiento mecánico es idealmente plástico. El criterio de rotura se basa en la propuesta de Mohr-Coulomb, la cual es la más aceptada para los suelos y asume una envolvente de rotura lineal en función de la cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ) del material (Casteletti [1]; Das [5]).

Cargas y condiciones de borde. En todos los modelos fueron considerados los pesos propios de cada material, en condición húmeda. No fueron aplicadas cargas adicionales por el hecho que el talud se encontraba libre de casas, vías de comunicación, entre otras.

Las condiciones de frontera consistieron en la restricción de los desplazamientos horizontales y verticales, así como los momentos en la base del modelo; en cuanto a las condiciones laterales se trató de no restringirlas debido al escaso ancho de la terraza. Sin embargo, cuando el ancho superaba el área afectada se restringieron los desplazamientos horizontales en los laterales del modelo.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Ensayos de laboratorio

En la Tabla 1 se muestran las propiedades empleadas en los análisis numéricos, éstas se consideran isótropas para cada estrato. Las propiedades provienen de los resultados de laboratorio y de los informes realizados por el Consorcio Beta Ingeniería – GEOTENSA [6, 7 y 8].

Tabla 1. Propiedades geomecánicas utilizadas para el análisis de estabilidad.

Material	γ_h (T/m ³)	E (MPa)	ν	ϕ (°)	C (KPa)
A2	2,16	40	0,48	38,81	17,65
A3	1,81	40	0,4	40,43	19,61
Arena	2,00	40	0,3	45	19,61
Terraza y Coluvio	2,10	40	0,3	45	19,61

4.2 Simulación Numérica

Distribución de Esfuerzos. Se tiene que los mayores valores de esfuerzos (Fig. 2) se ubican en la base del modelo. El mayor valor registrado es $1.55 \times 10^3 \text{KN/m}^2$ a compresión, en la sección 41+000. La distribución de los esfuerzos relativos de corte indica que existe una posibilidad de plastificación, con el riesgo de falla asociado, los valores mínimos se ubican en los taludes de menor altura considerados.

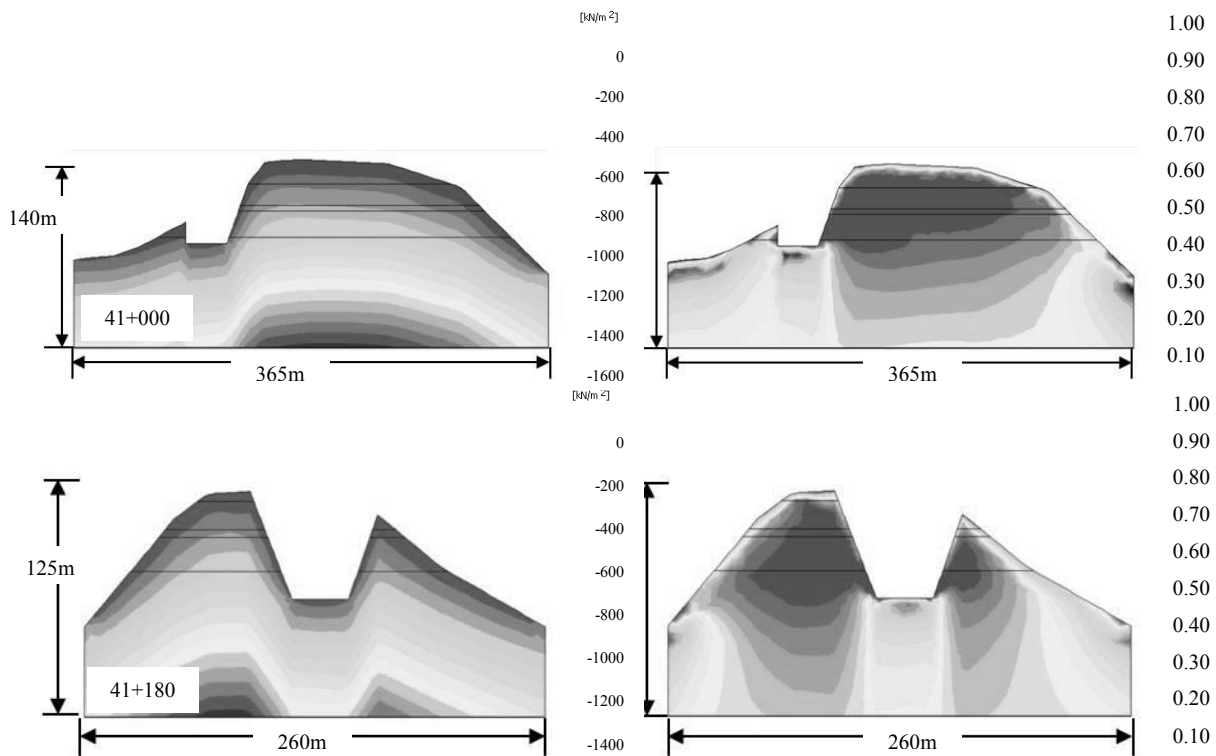


Figura 2- Distribución de Esfuerzos (izq. esfuerzos efectivos, der. esfuerzos relativos de corte)

Distribución de los desplazamientos. En la Fig. 3 se observa la distribución de los desplazamientos horizontales, es posible identificar que entre las progresivas 41+000 y 41+160 los desplazamientos más importantes se ubican en el talud sureste, mientras que entre las secciones 41+180 y 41+240, los valores extremos se ubican en el talud noroeste.

Al observar la distribución de los desplazamientos totales, se aprecia que los valores más altos se ubican en el talud de mayor altura (talud sureste entre las progresivas 41+000 a 41+160 y talud noroeste entre las progresivas 41+180 a 41+240). La distribución de los mismos indica la posibilidad de una falla completa del talud.

Deformaciones de corte. En la Fig. 4 es posible observar las deformaciones de corte. Los valores extremos se ubican en zonas cercanas a los taludes, describen una superficie curva y continua en la mayoría. Es un área potencialmente inestable puesto que las deformaciones alcanzadas son plásticas. Respecto a las distribuciones inconclusas, se debe considerar que el proceso de cálculo se detuvo por la rotura del material en el otro talud de la trinchera, por lo que se puede suponer la posibilidad de falla en ambos taludes.

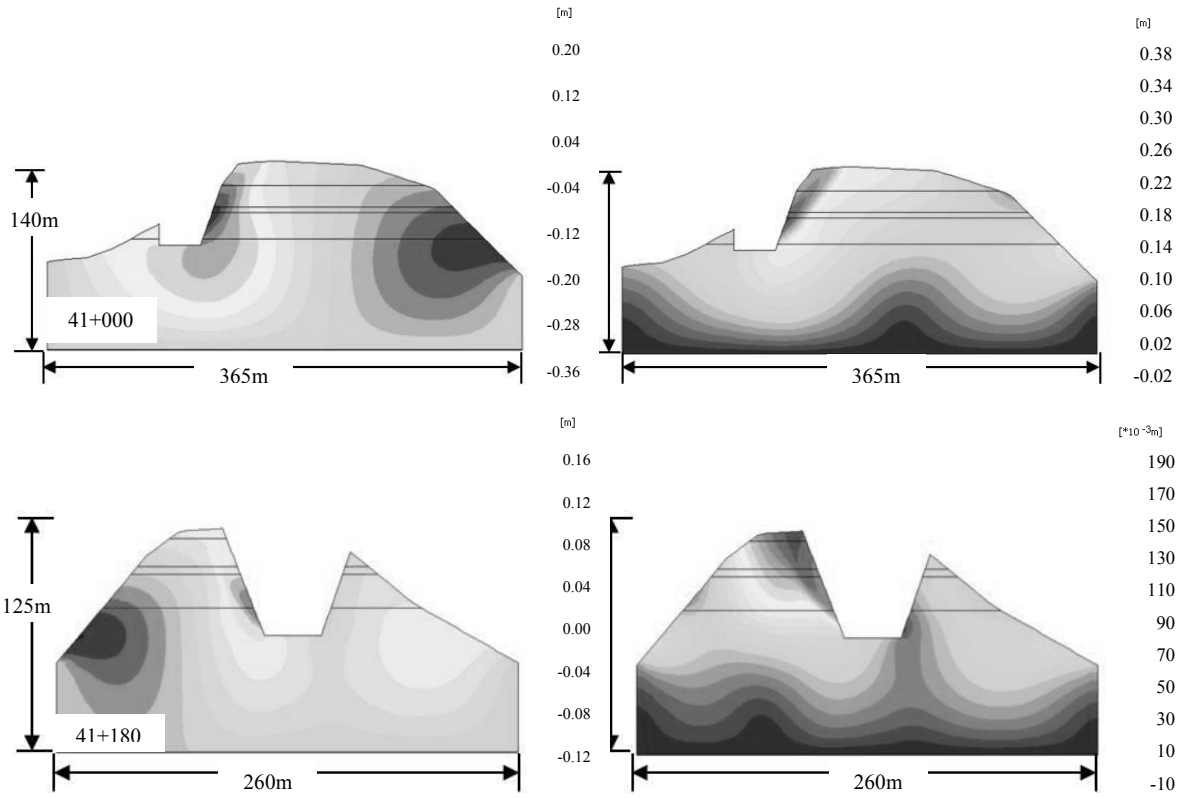


Figura 3- Distribución de desplazamientos (izquierda: horizontales, derecha: totales)

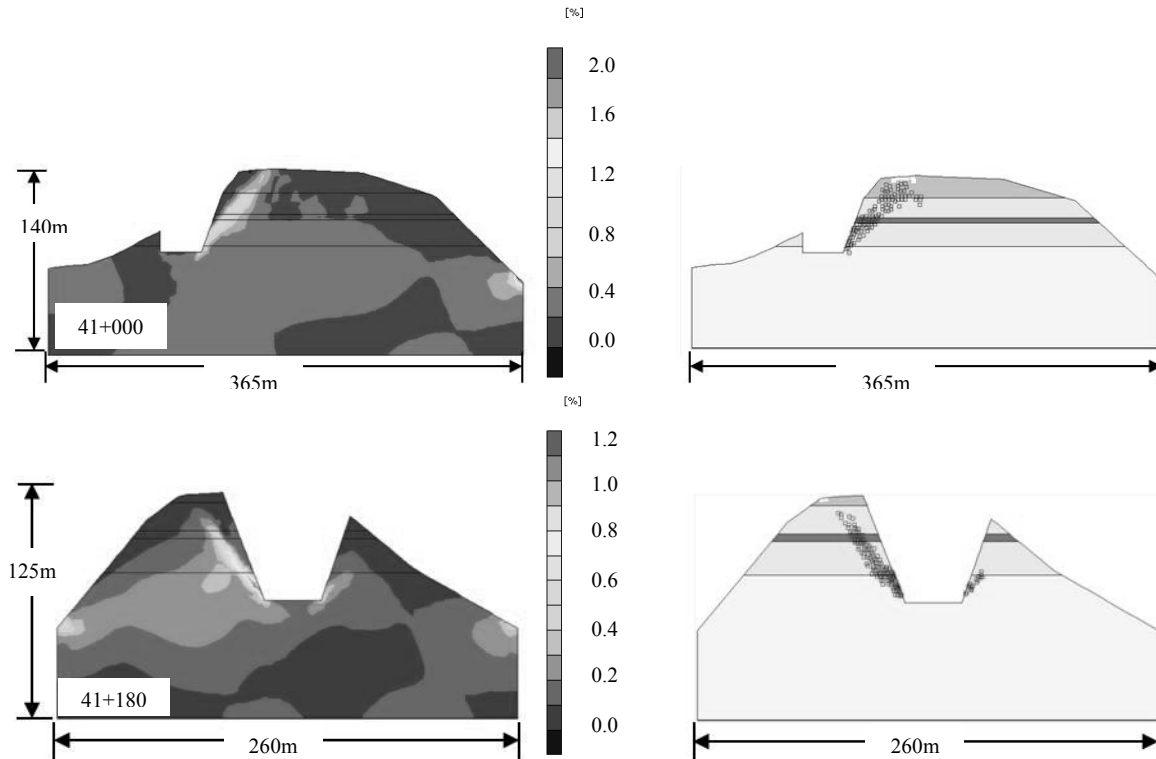


Figura 4- Distribución de las deformaciones de corte y puntos plásticos.

En resumen, las deformaciones de corte, distribución de puntos plásticos y desplazamientos de las secciones que componen el talud señalan que existen grandes posibilidades que se produzca rotura de los materiales en ambos taludes, especialmente cuando éstos alcanzan grandes alturas, esto en función de que en las secciones 41+000 y 41+240 sólo se producen las grandes deformaciones plásticas en los taludes de mayor altura. Nótese que la posible superficie de falla se extiende desde la cresta del talud hasta la base del mismo, describiendo una superficie curva, por lo que de presentarse la rotura se afectaría la totalidad del talud.

5. CONCLUSIONES

El cálculo del esfuerzo relativo de corte, sugiere la cercanía del punto estudiado con la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb. Estos perfiles, junto con la distribución de puntos plásticos sugieren la posibilidad de falla.

Las magnitudes de las deformaciones de corte son altas, indicando la posibilidad de rotura, su distribución dentro del modelo sugieren la superficie típica para los suelos.

Los desplazamientos calculados, son cónsonos con los factores mencionados, puesto que están limitados por la superficie potencialmente inestable. Éstos son un indicativo del posible movimiento de masa y sugieren desde un deslizamiento puntual en algunos estratos, hasta la falla general de ambos taludes, en función de su altura.

La intercalación de materiales, la baja cohesión de los mismos, junto a diferencias en el escogimiento, compactación y composición de la matriz son los factores condicionantes de la estabilidad; mientras que la geometría del corte, la modificación de un paleodeslizamiento, los factores climáticos y las cargas dinámicas son los factores que podrían generar o acelerar el proceso de falla de los taludes.

REFERENCIAS

- [1] Casteletti JI. 1996. Nociones de Mecánica de Suelos. Consejo de Publicaciones de la Universidad de los Andes. Mérida Venezuela.
- [2] Ugas C, 1985, Ensayos de Laboratorio en Mecánica de Suelos, discusión-evaluación y procedimiento, Tercera Edición, Caracas.
- [3] Bowles J., 1980, Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil, Arrieta, A., y Tamayo, J. (Trads.), Mc Graw-Hill, Bogotá.
- [4] Chandrupatta, TR, Belegundo, AD. 1999. Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería. (Alonso, J.E. trad., Ríos Sánchez, MA. colab.) 2da Ed. Pearson Educación. México.
- [5] Das B., 2001, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Thomson Learning, México.
- [6] Consorcio Beta Ingeniería - GEOTENSA (Geotecnia y Tensores S.A). 2005. Estudio Geológico Preliminar del estribo sur del Viaducto La Colorada. Informe Interno del Instituto Autónomo de Vialidad del Estado Táchira. 11 Pp. San Cristóbal, Venezuela.
- [7] Consorcio Beta Ingeniería - GEOTENSA (Geotecnia y Tensores S.A). 2006a. Cimentación definitiva y accesos del viaducto La Colorada. Informe Interno del Instituto Autónomo de Vialidad del Estado Táchira. 2 Pp. San Cristóbal, Venezuela.
- [8] Consorcio Beta Ingeniería - GEOTENSA (Geotecnia y Tensores S.A). 2006b. Estudio Geotécnico para la cimentación del viaducto La Colorada. Informe Interno del Instituto Autónomo de Vialidad del Estado Táchira. 6 Pp. San Cristóbal, Venezuela.

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO POR MEDIO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Roberto Torres-Hoyer

Jesús Torres-Hoyer

thorj@ula.ve

j.torres@ula.ve

Grupo de Investigación en Geología Aplicada, GIGA

Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica,

Departamento de Geomecánica. Núcleo La Hechicera, Edificio de Ingeniería, Ala Oeste, Nivel II.

Mérida, Venezuela.

Resumen. *Para realizar el análisis de riesgo sísmico por medio del Método de Elementos Finitos se debe hacer un compendio de acciones necesarias para poder formular una respuesta acorde a la problemática. Por ende se deben verificar parámetros de vulnerabilidad en las edificaciones, para definir el nivel de amenaza, y con ello obtener los valores que conforman parte del riesgo que podría existir al momento de un sismo y tomar todas las previsiones posibles al caso. El presente consta de elementos de análisis de las estructuras vulnerables, que posteriormente de acuerdo al nivel de importancia se le asigna un valor acorde. Por otra parte la amenaza es lograda por medio del Método de Elementos Finitos, que se debe realizar en conformidad al modelo a interpretar y con los valores de desplazamientos calculados por el programa, asignándosele valores al mismo y calificando la amenaza sísmica y con la ecuación del Riesgo se multiplican las topologías en un programa de Sistema de Información Geográfica compilando ambas respuestas y obtener un mapa de riesgo sísmico.*

Palabras claves: Uo wrck»p"I gqo ge^aplec."Grgo gpvqu"Hpkqu."Uko q."Tkgui q."Xwrgtcdkrf cf."
Co gpc| c."Vqr qmji ¶cu

1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos sísmicos son una problemática que ha azotado a la humanidad desde sus inicios; las consecuencias que trae consigo como desprendimientos de masas, fracturas, grietas, deslizamientos, daños en las edificaciones, vialidad, entre otras; son variables difíciles de determinar. El método permite, realizar un análisis de un conjunto de variables geológicas, geofísicas y geotécnicas, para posteriormente alimentar el programa que aplique el Método de Elementos Finitos conociendo parámetros de desplazamientos obtenidos en la simulación. La idea general del Método de los Elementos Finitos es la división de un continuo por medio de un conjunto de elementos pequeños interconectados por nodos, generándose ecuaciones que rigen el comportamiento, pasando de un sistema de infinitos grados de libertad a uno con finitos grados de libertad regido por ecuaciones diferenciales lineales y/o no lineales.

Con parámetros de desplazamiento y en conjunto al análisis de las diferentes estructuras, revisar la vulnerabilidad de las mismas, susceptibles ante un sismo, y con ello, si donde se encuentra fundada una edificación colapsa o falla seguramente la estructura queda completamente en riesgo ante esta situación, con lo que en conjunto se revisara el riesgo presente ante alguna eventualidad que pueda presentarse, bajo este caso.

2. GENERALIDADES

Según Astorga A. & Rivero P [1] aproximadamente el 80% de la población habita en regiones sísmicamente activas, donde se han generado terremotos devastadores inclusive en tiempos recientes. Es por ello la necesidad de hacer un conjuntos de estudios que favorezcan en la toma de decisiones al momento de construir nuevas edificaciones, evaluando todo el riesgo que pueda estar implícito ante un sismo. La presente metodología pretende aportar datos valiosos para el análisis del riesgo debido a sismos, combinando la posible ocurrencia de un evento de este tipo (amenaza) y sus consecuencias negativas sobre las personas y sus bienes (vulnerabilidad). Para la determinación de los efectos de sitio se emplea el Método de Elementos Finitos, el cual es una herramienta que ayuda a resolver problemas complejos de ingeniería utilizando modelos matemáticos que representan situaciones físicas reales.

3. METODOLOGÍA.

En primer lugar se procede a realizar un conjunto de análisis de referencias bibliográficas, desde el punto de vista geológico-estructural, del cual se consideran variables que intervienen en la sismología histórica del lugar, a la actividad sísmica e intensidad de la misma. Luego se procede a realizar una serie de análisis geofísicos de la zona en estudio determinando parámetros importantes que alimentara el modelo a simular por el Método de Elementos Finitos, tales como velocidad de onda, tanto las corpóreas como las superficiales, que en conjunto a ellas se determina la densidad y parámetros como módulo de Young y relación de Poisson, que en aunado a ensayos de laboratorio parámetros físicos del suelo y del material aflorante como el peso específico, contenido de humedad y relación de vacíos, y con la geología del lugar se generan cortes geológicos que van a ser utilizados en los modelos a simular, y distribuidos en forma de cuadrícula para poder interpolar entre si y generar una respuesta de amenaza sísmica, con el parámetro a considerar.

Con los parámetros físicos y mecánicos obtenidos de los ensayos de laboratorio para suelo y roca, y con la información previa recolectada en la etapa anterior, se realiza la simulación

geomecánica con el empleo del Método de Elementos Finitos, del cual se obtuvo los desplazamientos y deformaciones de las unidades geológicas presentes en la zona de estudio con la aplicación del sismo.

En los modelos realizados se toma en cuenta las cargas sobre el terreno de las edificaciones presentes en la zona norte, atravesadas por los perfiles o cortes, en donde de manera general se considera para su evaluación en la etapa de campo, el número de pisos, los materiales constitutivos (cargas permanentes) y el uso de la edificación (cargas variables), en conjunto a un acelerograma introducido al modelo, junto a todas las propiedades físicas y mecánicas del medio, y analizando los valores que se obtienen, para que de manera precisa se interpolan los valores entre cada uno de los modelos que van a conformar una cuadrícula en superficie, colocándole un valor o número y un color al rango de desplazamiento, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 1. Amenaza sísmica en función a los desplazamientos obtenidos en la simulación.

Amenaza	Rango	Valoración
Baja	$d=25\text{cm}$	1
Media	$25\text{cm} < d < 1\text{m}$	2
Alta	$d>1\text{m}$	3

Por otro lado, para la obtención de la vulnerabilidad de las construcciones civiles, se hace la caracterización visual externa de las edificaciones presentes en la zona en estudio, tomando en consideración los siguientes parámetros: el Tipo de Edificación según la cantidad estimada de personas presentes, en un rango de la A – D; el Tipo de Elemento Estructural que conforma la edificación, pudiendo o no tener diseño ingenieril (Estructura Especial, de Concreto Armado, Metálica y Mixta); la Geometría en Planta y Elevación, siendo estas simples o complejas; la Desproporción de la Edificación, Tanques de Agua o Excentricidades de Masa en el tope de la misma, Porches o Balcones, Vigas en un Sentido, Planta Baja Libre, Cercanía a Talud o Drenaje, Sobre Terreno con una Pendiente Suave (entre $0-15^\circ$), Media ($> 15^\circ$ hasta 30°) o Alta ($> 30^\circ$); con los que se logra construir el mapa de vulnerabilidad física externa de las edificaciones considerando la geotecnia y geomorfología presente en el sector. Finalmente con la unificación de criterios y de la superposición de información (multiplicación de los valores de vulnerabilidad y amenaza), se digitalizaron los mapas de riesgo debido a sismos en la zona norte de la ciudad de Mérida según la magnitud de varios eventos sísmicos; en donde las posibles combinaciones generadas de la multiplicación de la vulnerabilidad y la amenaza se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Riesgo debido a sismos para la zona norte de la ciudad de Mérida y su valoración.

Riesgo	Amenaza x Vulnerabilidad	Valoración
Bajo	$1(\text{baja}) \times 1(\text{baja})=1$ $1(\text{baja}) \times 2(\text{media})=2$ $2(\text{media}) \times 1(\text{baja})=2$	1 y 2
Medio	$1(\text{baja}) \times 3(\text{alta})=3$ $2(\text{media}) \times 2(\text{media})=4$ $3(\text{alta}) \times 1(\text{baja})=3$	3 y 4
Alto	$2(\text{media}) \times 3(\text{alta})=6$ $2(\text{media}) \times 3(\text{alta})=6$ $3(\text{alta}) \times 3(\text{alta})=9$	6 y 9

En resumen, se tiene el siguiente esquema que explica el procedimiento, tomando en consideración los parámetros que pueda generar errores al momento de simular retroalimentándose.

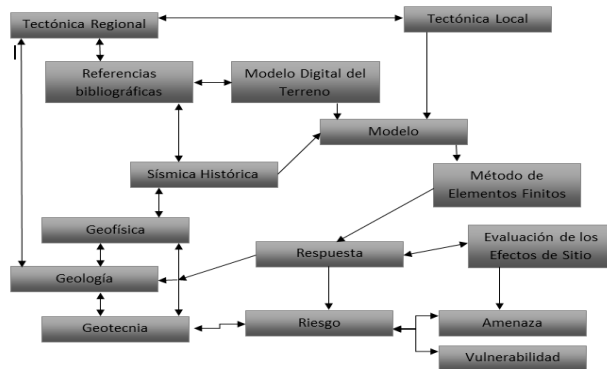


Fig. 1 Esquema Metodológico.

4. MODELOS DE SIMULACION

La simulación geomecánica constituye una herramienta de gran importancia. Durante los últimos años se ha empleado el concepto de simulación para diversas aplicaciones. En el área de la Ingeniería Geológica, las simulaciones aplicables son de dos tipos, la Geoestadística referida al análisis de datos distribuidos espacialmente y la Geomecánica referida a la aplicación de modelos matemáticos a elementos continuos. Este estudio considera esta última aplicando la hipótesis de que las propiedades mecánicas de los suelos son homogéneas e isotropas, solo existen cambios de las propiedades mecánicas obtenidas por la geofísica mejorando la calidad de los modelos considerablemente. La geometría de los taludes estudiados fue realizada considerando longitudes y composición del terreno, verificado en mapas y en campo, considerando longitudes y mediciones in situ e identificando las zonas de mayor peligrosidad, tomando modelos bidimensionales con características de suelo y roca de los medios naturales y que se intersectan entre si logrando interpolar valores de desplazamiento en superficie generando un plano de amenaza.

5. RESULTADOS

En primer lugar se analiza la geomorfología, la geología y en conjunto al catastro de la zona, determinando potenciales deslizamientos y zonas susceptibles a derrumbes o colapsos, entre otras, como se puede apreciar en la fotografía aérea analizada.

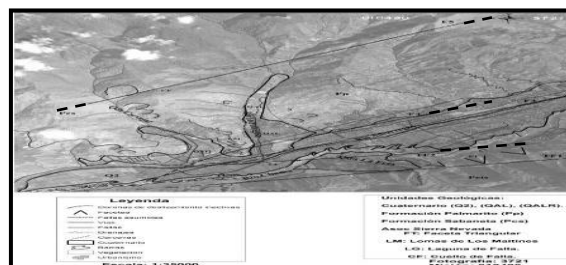


Fig 2 Análisis fotogeológico y de catastro de la zona en estudio

Luego se seleccionan los cortes geológicos para generar los diferentes modelos bidimensionales de los cuales los valores de desplazamientos se encuentran enmarcados en la tabla 1 y de allí se procede al análisis correcto de la amenaza sísmica acorde a histórica en el sitio en función a la escala de Mercalli o Richter respectivamente obteniéndose desplazamientos como se muestran en las figura 3.

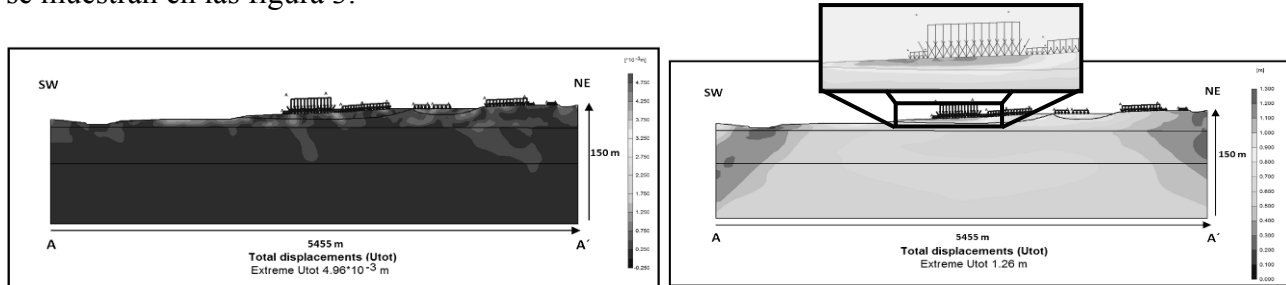


Fig 3 Resultados de los desplazamientos en dos de los diferentes modelos perpendiculares entre sí para generar la interpolación entre ellos para culminar con el plano de amenaza sísmica.

Haciendo la respectiva interpolación al conjunto de simulaciones se tiene el plano de desplazamientos que es utilizado como resultado por el sismo inducido en el modelo

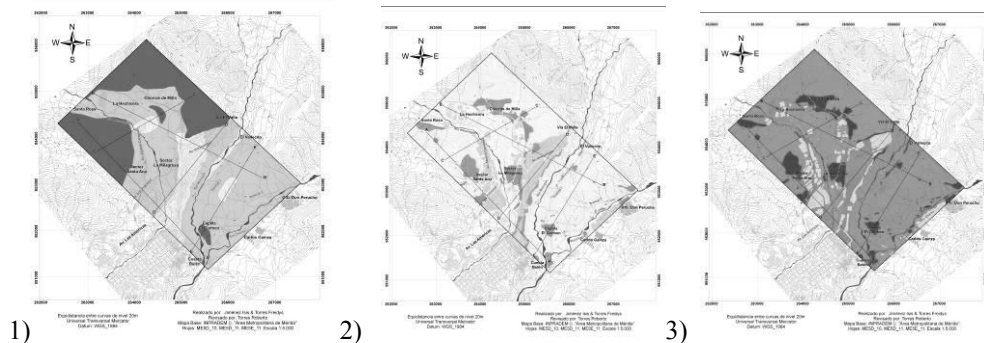


Fig 4. 1) plano de resultado de Amenaza. 2) plano de análisis de Vulnerabilidad. 3) plano de Riesgo

6. CONCLUSIONES

La metodología propuesta para el estudio de efectos de sitio con la aplicación de un acelerograma, a taludes, se basa en la obtención de parámetros geomecánicos de muestras tomadas in situ y posteriormente ensayadas en laboratorio. Con estos valores de laboratorio, se procede al análisis por Elementos Finitos donde se obtienen las respuestas en diversas zonas de los taludes, verificando los efectos de sitio tales como desplazamiento, que van a conformar la amenaza dentro de la variable riesgo, de igual manera con la evaluación de las estructuras se puede realizar un plano de vulnerabilidad que en conjunto nos asigna un valor de riesgo sísmico utilizando el Método de Elementos Finitos como herramienta fundamental.

7. REFERENCIAS

[1] Astorga A. & Rivero P. (2009) Vulnerabilidad de la Estructura Física de las Escuelas. Módulo III – Sección III. CIGIR (Centro de Investigación en Gestión Integral de Riesgo). Mérida – Venezuela.

- [2] Elberg, M. (2002). Proceso Automatizado de refinamiento H- Adaptativo basado en índices de energía de deformación. Trabajo de grado presentado para optar al título de Magister Scientiae en Ingeniería Estructural. Mérida, Venezuela.
- [3] Estévez, R. y Laffaille, J. (1997). Sismicidad y prevención sísmica en los Andes. Seminario sobre el Terremoto de Caracas. Caracas, Venezuela. Página web. Disponible en: <http://www.funvisis.gob.ve/archivos/www/terremoto/Papers/Doc029/doc029.htm>
- [4] Feriche, M. (1994). Daños producidos por Sismos. Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos. España.
- [5] FUNVISIS (2002). La Investigación Sismológica en Venezuela. Capítulo II: Geología Sísmica y Riesgo Geológico. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. Caracas – Venezuela.
- [6] González, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C. (2004). Ingeniería Geológica. Editorial PEARSON. Madrid – España.
- [7] Grisolia, D. (1999). Introducción a la Ingeniería Sísmica. Segunda Edición. Mérida – Venezuela.
- [8] INGEOMIN (2009-2010). Gestión Integral de Riesgo en Espacios Urbanos, Municipio Libertador, Estado Mérida. Instituto Nacional de Geología y Minería. Proyecto. Región Los Andes, Mérida –Venezuela.
- [9] Mena, U. (2002). Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Barcelona -España.
- [10] Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Cartografía Nacional (1975). Mapas Topográficos de Mérida y Tabay. Hojas 5941 I NO y 5941 I NE. Escala 1:25.000. Mérida - Venezuela.
- [11] Norma Venezolana COVENIN 1756:2001-1 (2001). Edificaciones Sismorresistentes, Requisitos y Comentarios. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Ministerio de Infraestructura. FUNVISIS. Caracas – Venezuela.
- [12] Organización Panamericana de la Salud (2004). Fundamentos para la Mitigación de Desastres en los Establecimientos de Salud. Serie Mitigación de Desastres. Segunda Edición. Washington D.C. 20037, EUA.
- [13] Tarbuck, E. & Lutgens, F. (2005). Ciencias de la Tierra. Prentice Hall. Madrid – España.

ELEMENTOS FINITOS APLICADOS AL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE INTERCALACIONES DE LUTITA Y ARENISCA

María Elisa Elberg

Carmemaria Hernández

Lorna Ojeda

mariael@ula.ve

cmaria838@gmail.com

lornab_2409@hotmail.com

Escuela de Ingeniería Geológica. Facultad de Ingeniería
Universidad de Los Andes. Mérida –Venezuela

Resumen. *El principal objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de estructuras geológicas compuestas por la intercalación de lutitas y areniscas que forman los taludes ubicados en el sector El Playón del estado Mérida. Se aplica una metodología donde se realiza trabajo de campo y de laboratorio obteniendo primero muestras de suelo y roca para analizarlos después con ensayos de densidad y compresión simple obteniendo módulo de Young y relación de Poisson. Con los datos obtenidos se realiza la simulación geomecánica utilizando geometrías elaboradas con base a mapas geológicos y topográficos. Los resultados muestran los valores de deformaciones, desplazamientos y esfuerzos entre las capas analizadas constituidas por areniscas y lutitas. El medio queda caracterizado al cuantificar los valores de los efectos de las cargas litostáticas donde se incluyó carga vehicular puesto que los taludes analizados forman parte del corte para el Ramal 07. Los resultados muestran que las deformaciones mínimas principales ocurren en los estratos de areniscas con valores de $1.04E-6$ y las lutitas presentan el mayor esfuerzo con $1.05E4$ MPa. Los desplazamientos generales mayores corresponden a 4.08 cm en el talud total. Las conclusiones indican que los valores obtenidos con el análisis numérico coinciden con los problemas que actualmente se presentan en el sector relacionados con los movimientos de masa generándose diferentes grados de susceptibilidad relacionados con desprendimientos de roca y deslizamientos.*

Palabras clave: Geología, Método de Elementos Finitos, Geomecánica, Taludes

1. INTRODUCCIÓN

El sector El Playón, perteneciente al Municipio Libertador del Estado Mérida, ha sido afectado de manera directa por la actividad geológica, generando problemas de circulación en el eje vial. Uno de los taludes presentes en la zona, realizados con la finalidad de construir la carretera vía El Valle y La Culata, ha presentado en los últimos años importantes deslizamientos que obstruyen el normal tránsito de la vía, formando simultáneamente fallas de borde que afectan la carretera. Esta situación es debida a los factores externos, tanto geológicos como antrópicos, que afectan los taludes y la calzada.

Las fallas de borde y los taludes son factores que perturban notablemente el buen funcionamiento de la carretera, por esto resulta importante su estudio, para lograr aminorar los costos de índole social y económico en caso de derrumbes y obstrucción de la vía.

En este trabajo se utiliza la simulación numérica basada en la aplicación del Método de Elementos Finitos para las fallas de borde y los taludes a través de modelos bidimensionales que permiten cuantificar esfuerzos, desplazamientos y deformaciones para establecer el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y del suelo, cuya actividad geológica afecta de manera directa la circulación vehicular en el área de estudio, la cual representa una de las principales vías de comunicación terrestre de la ciudad de Mérida con los sectores de El Valle y La Culata.

El Método de Elementos Finitos realiza ecuaciones matemáticas simultáneamente, las cuales son generadas y resueltas por medio del computador, para así estudiar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos de los taludes del macizo rocoso de la carretera del sector El Playón. La simulación geomecánica se llevará a cabo mediante el programa comercial ABAQUS, que permite simular bidimensional el comportamiento de estructuras y cuerpos sometidos a cargas y a otras condiciones externas.

2. GENERALIDADES.

Esta investigación establece el comportamiento geomecánico de taludes en el Ramal 07, sector El Playón, Municipio Libertador, Estado Mérida, para así detectar los puntos susceptibles a desplazamientos que ocasionan la obstrucción del paso vehicular.

El área seleccionada fue georeferenciada utilizando el sistema WGS 84, cuyas coordenadas UTM son: N954684 E265843, N954660 E265869, N954635 E265820 y N954550 E265722.

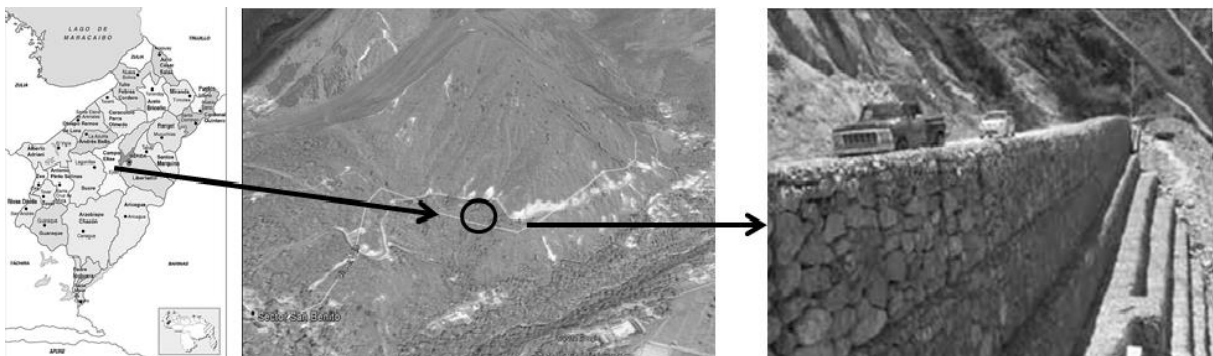


Figura 1. Estado Mérida, vía El Valle-La Culata y fotografía del talud y muro de contención

3. METODOLOGÍA

Se lleva a cabo la aplicación de una metodología sistemática basada en cuatro etapas fundamentales, las cuales se visualizan a continuación:

Etapa 1. Etapa preliminar: Se basó en la recopilación y revisión de toda la información disponible sobre el tema de investigación, la cual se realiza antes de entrar a la fase de trabajo en campo y sirve como referencia para tener un conocimiento general. En particular esta etapa se subdivide en dos fases: recopilación y revisión bibliográfica la que a su vez se encuentra dividida en otras dos etapas que detallan la forma en que se deben desarrollar las cuales son: antecedentes históricos y recolección cartográfica y finalmente el reconocimiento previo del área de estudio.

Etapa 2. Etapa de campo: Esta etapa se basó en las observaciones geológicas directas en campo, con la finalidad de correlacionar la información geológica disponible y obtenida durante la etapa previa de revisión, además de la toma de datos y muestras utilizadas en estudios posteriores.

Etapa 3. Etapa de laboratorio: Se realizaron los ensayos de laboratorio a las muestras de suelo y/o roca recolectados anteriormente en la etapa de campo con el propósito de determinar las características físicas desde el punto de vista geológico. Los ensayos aplicados son los siguientes:

Para suelos: Peso unitario, contenido de humedad, granulometría, límites de consistencia y corte directo; para así determinar el tipo de suelo y sus propiedades.

Para rocas se realizó el ensayo de compresión simple y densidad, con el fin de obtener el los valores del módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

Etapa 4. Etapa de simulación: El modelado del talud se realizó mediante el Método de Elementos Finitos. Este método constituye un análisis que permite obtener los esfuerzos y deformaciones de los taludes, tomando en cuenta las propiedades físicas presentes.

El modelado es la primera fase del proceso de simulación, se define, diseña y crea la geometría de los elementos que se deseen simular, se crean los materiales que constituyen los elementos y se le asignan sus propiedades correspondientes, se realiza ensamblaje de las partes, se establecen las condiciones de borde, se aplican las cargas y establece el tamaño y tipo de elementos constituirán el mallado.

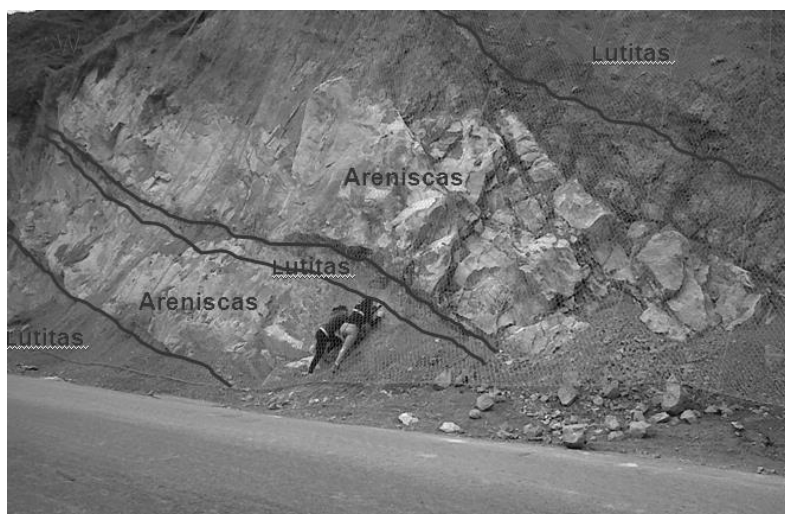


Figura 2. Vista de la Formación Mucujún aflorando en el talud de la carretera, en la cual se observan las intercalaciones de lutitas con areniscas.

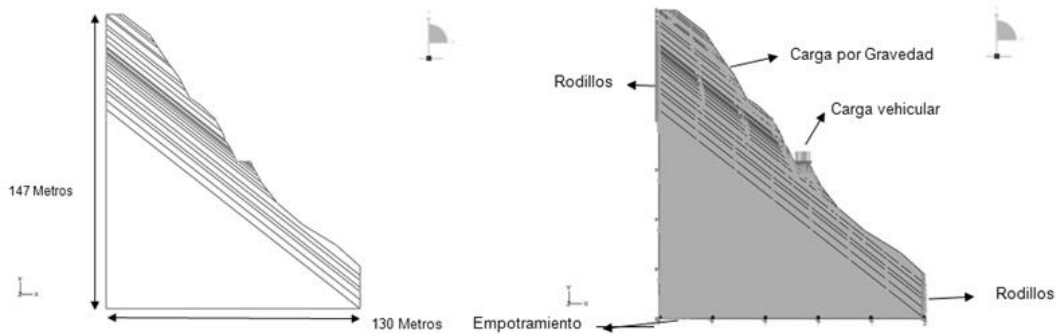


Figura 3. Geometría del modelo. Cargas aplicadas y condiciones de borde.

Tabla 1. Parámetros Geomecánicos de las propiedades de los materiales

Material	Módulo de Elasticidad (E)	Coefficiente de Poisson ν	Densidad γ
Arenisca	$3,21 \times 10^{10}$ Pa	0.16	2199.38 Kg/m ³
Lutitas	3×10^8 Pa	0.25	2300 Kg/m ³

3. RESULTADOS

Los resultados muestran de manera gráfica los valores de las principales deformaciones, esfuerzos y desplazamientos ocurridos en los perfiles de los taludes adyacentes a la calzada, bajo un sistema de coordenadas bidimensional X-Y. Los resultados que el programa proporciona son representados en una escala de degradación de colores, donde el color rojo y el azul representan los valores máximos y mínimos de las variables. Para saber cuál mallado es el que más se adapta a la geometría se realizó una calibración del mismo para cada modelo principal, considerando como el mejor aquel en el cual las variables insertadas al programa tienden a ser constantes, indicando la convergencia de los resultados con su respectiva gráfica.

Deformaciones

Las deformaciones máximas principales se dan en su mayoría en los estratos de lutitas, alcanzando un valor máximo de $8,146E-4$; mientras que la deformación mínima se encuentra en las areniscas, registrando una magnitud de $-1,040E-6$. Estos valores afirman que los estratos de lutitas son los que sufren mayor deformación dentro de macizo rocoso.

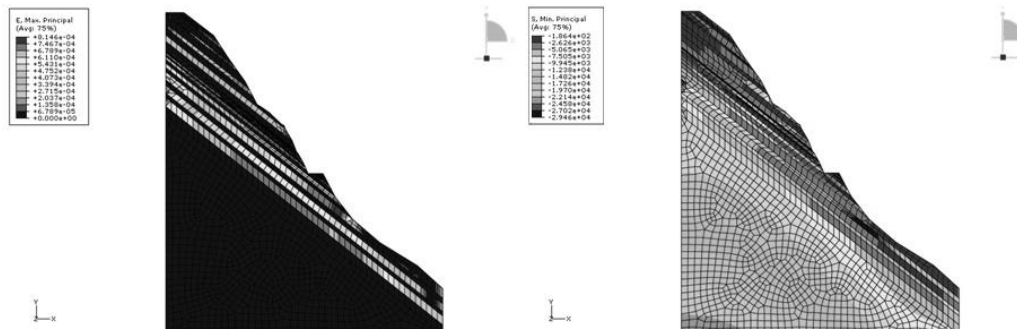


Figura 4. Deformaciones Principales y Esfuerzo Mínimos Principales

Esfuerzos

Los esfuerzos mínimos se localizan en la parte superior del talud, al descender verticalmente se observa que aumenta el esfuerzo debido a la presión litostática. Las lutitas reflejan un mayor esfuerzo ya que son rocas menos resistentes que las areniscas. El esfuerzo máximo de la zona es de $1,056E4$ MPa.

Desplazamientos

El mayor valor de la magnitud de desplazamiento es de 4,087cm, donde su mayor desplazamiento horizontal se ubica justo en los taludes superiores e inferiores de la carretera con una estimación de 1,029 cm. El Eje Y muestra desplazamiento en sentido negativo cuyo valor máximo es 4,087 cm, situado en la cima del perfil. Estos valores se presentan en las figuras a continuación.

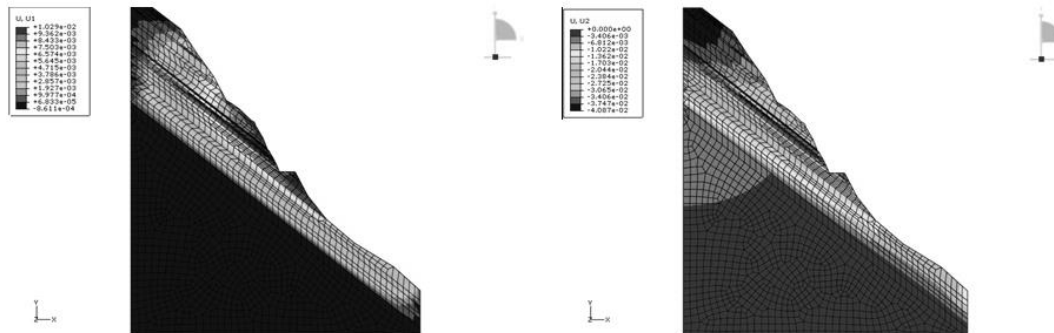


Figura 5. Desplazamientos horizontales y Desplazamientos verticales

4. CONCLUSIONES

Los cortes de los taludes en sentido del buzamiento de los estratos generan las caídas de materiales presentes en la zona, ya que deja actuar la gravedad a su favor. Uno de los factores geológicos que influyen notablemente en los movimientos en masa dentro del área de estudio son las condiciones estructurales, agravando la problemática debido a la incidencia de las fallas geológicas cercanas, en especial la falla de La Hechicera, provocando cizallamientos en las rocas, meteorizándolas y fragmentándolas, facilitando así los deslizamientos de roca y suelo.

Los materiales constituyentes de los taludes muestran un bajo índice de resistencia, el cual se dedujo a través de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, lo que produce mayor vulnerabilidad a la zona.

Según los datos recolectados a lo largo de esta investigación y mediante un detallado análisis de los esfuerzos y deformaciones de cada modelo a través del programa ABAQUS se logró determinar diferentes factores en relación a movimientos en masa, tales como desprendimientos de roca y deslizamientos; lo que permite conocer el comportamiento en cada punto estudiado de la carretera.

La carga vehicular aplicada en la calzada no afectó de manera significativa el comportamiento de los modelos. Con el uso de la simulación numérica se logró establecer que la carga máxima aproximada que puede soportar la carretera es de 1.000.000 Kg, lo que equivale a 1.000 Toneladas.

Las regiones que presentan deformaciones y desplazamientos corresponden con los mismos puntos que se habían identificado previamente en el reconocimiento de la zona, las cuales se habían catalogado como áreas propensas a sufrir movimientos de masa, por lo que mediante la

simulación se corrobora que dichas áreas pueden presentar , en cualquier momento, este tipo de procesos.

Como medida correctiva a la problemática se implantó una malla de acero de unos 5 cm de diámetro, para sostener los materiales que se movilizan a causa de los desprendimientos de roca. La desventaja de esta malla es que sólo retiene a clastos superiores a su diámetro, es decir, mayores a 5 cm. Las pantallas ancladas son una buena alternativa para evitar la erosión y crear soporte al material, pero su elevado costo resulta como limitante para los entes gubernamentales. Otra opción son los muros de contención ya que se encuentra disponible el espacio físico para su construcción e impide el paso de los escombros de cualquier tamaño hacia el paso vehicular, además su costo es más accesible.

5. REFERENCIAS

- [1] Elberg, M.; Vivas, J.; Fernández, V.; Sosa, G. y González, L. (2011). “Análisis numérico de las discontinuidades del macizo rocoso de la autopista Rafael Caldera en Venezuela”. Departamento de Geomecánica. Grupo de Investigación en Geología Aplicada, GIGA Escuela de Ingeniería Geológica. Facultad de Ingeniería. ULA. Mérida, Venezuela.
- [2] González de Vallejo Luis. (2002). Ingeniería Geológica. Editorial Pearson. España.
- [3] Marquina M. y Martínez M (2012). Simulación Geomecánica de subsuelo ante movimientos sísmicos en las adyacencias de los tanques de agua potable al Norte de la ciudad de Mérida. Mérida. Venezuela.
- [4] Ogaya, Noelia y Elberg Maria (2010). “*Simulación Geomecánica mediante el Método de Elementos Finitos de taludes del Complejo Hidroeléctrico José Antonio Páez, Santo Domingo, Estado Mérida*”. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida, Venezuela.
- [5] Sosa, G.; Alam, M. y Elberg, M. (2008). “Simulación Geomecánica de las zonas de riesgos geológicos en la franja costera del Estado Carabobo a partir de modelos elásticos”. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida. Venezuela.

REDES NEURONALES ARTIFICIALES APLICADAS AL ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA ENERGÍA DE DEFORMACIÓN DE LA ZONA SÍSMICA SUDAMERICANA

María Elisa Elberg

mariael@ula.ve

Escuela de Ingeniería Geológica. Facultad de Ingeniería
Universidad de Los Andes. Mérida -Venezuela

Francklin Rivas

rivas@ula.ve

Escuela de Ingeniería de Sistemas. Facultad de Ingeniería
Universidad de Los Andes. Mérida -Venezuela

Resumen. *La principal zona sísmica de América del Sur, se encuentra ubicada en los límites convergentes de las placas tectónicas Nazca y Sudamericana, afectando de manera directa las costas de Chile, Perú, Bolivia y Colombia con el Océano Pacífico. Esta investigación tiene como objetivo principal utilizar las redes neuronales artificiales para analizar la relación que existe entre la ocurrencia de los sismos y la energía de deformación calculada en la zona de estudio utilizando modelos geomecánicos con base al método de elementos finitos. La metodología utilizada se basa primero en la selección de información sobre la tectónica de placas, materiales constitutivos, dirección de movimiento y procesos de subducción, para luego la realización de los modelos en dos y tres dimensiones que permiten calcular la energía de deformación utilizando el método de elementos finitos. Seguidamente, son utilizadas las redes neuronales artificiales para encontrar la relación existente entre energía, magnitud de los sismos y fecha de ocurrencia del sismo, en cada caso utilizando hasta cuatro retardos. Los resultados obtenidos indican que el rendimiento logrado corresponde a un 77.78%, mejorando a un 83.33% con el uso de todas las variables. De igual manera, al no usar la energía de deformación como dato de entrada muestra un rendimiento de 0.18 catalogado como bueno, con una correlación de 0.98 y un error de 0.14, a diferencia de resultados con el uso de energía de deformación que logran rendimiento y correlación perfectos de 0.00 y 1.00 respectivamente y un error de $1.14E-16$. La principal conclusión de este trabajo señala que el uso de métodos numéricos y técnicas inteligentes de computación permiten cuantificar la relación que existe entre la energía, la magnitud y el tiempo de ocurrencia de sismos, logrando la obtención de mínimos errores en la predicción de nuevas concentraciones de energía en la zona sísmica sudamericana.*

Palabras clave: Redes neuronales artificiales, elementos finitos, zona sísmica sudamericana

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta investigación es utilizar las Redes Neuronales Artificiales (RNA) para estudiar la relación existente entre la ocurrencia de sismos y la energía de deformación concentrada en la zona, la cual es calculada en esta investigación utilizando modelos geomecánicos con base al Método de Elementos Finitos (MEF).

El uso de RNA y MEF en conjunto es una metodología nueva, la cual es utilizada dependiendo de los modelos numéricos que se realicen, las variables que se calculen en las simulaciones, las entradas para entrenamiento de la red, los patrones que sean reconocidos y las salidas que se soliciten en función de la alimentación de los experimentos.

Las RNA son una sub rama de la Inteligencia Artificial y simulan el comportamiento fundamental del cerebro humano. Es decir, una neurona artificial presenta una analogía con la biológica, ya que simula sus características fundamentales. Es una unidad de procesamiento de información donde se reciben las señales de otras neuronas, que son procesadas a través de una función de transferencia, para ser enviadas a otra neurona.

De igual manera como se encuentran las neuronas en un cerebro biológico, una RNA se compone de un conjunto paralelo de unidades de proceso muy simples interconectadas, conexiones en las que se basa la distribución de la inteligencia en la red.

Una red neuronal artificial está constituida por un elemento básico de procesamiento, denominado neurona, la cual está conformada por un conjunto de entradas (X_i), que serán multiplicadas por un peso sináptico (W_i), luego, estos productos se sumarán para proceder a la aplicación de una función de activación que dará como resultado las salidas Y .

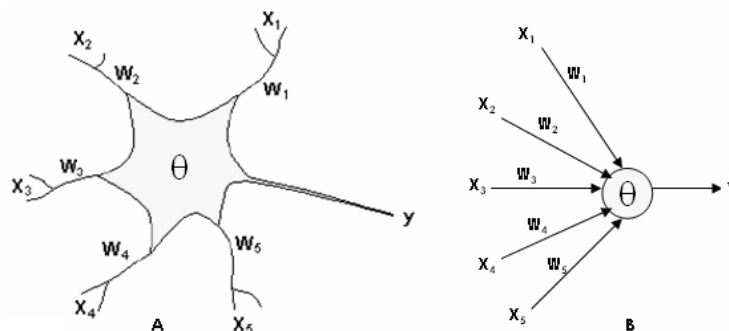


Figura 1. A- Representación de neurona biológica. B- Representación de neurona artificial.

Por otro lado, el MEF es utilizado para realizar modelos geomecánicos, modelando principiante las placas tectónicas causantes de los eventos sísmicos en la zona de Sudamérica estudiada, esto es, la costa del pacifico en Chile, Perú, Bolivia y Colombia principalmente.

La figura 2 muestra la ubicación relativa de la zona de estudio, entre el contacto de las placas Nazca y Sudamericana. Las placas tectónicas son las unidades en que la litosfera terrestre, o parte externa de nuestro planeta, está dividida y se mueven como bloques rígidos sin que ocurra deformación interna sobre la astenósfera, es decir, el manto exterior o superior de la Tierra. Los contactos entre las placas son muy activos, marcándose la ocurrencia de sismos en estos bordes. Estos límites pueden ser de tipo convergente cuando los esfuerzos son compresivos, divergentes si los esfuerzos actuantes son distensivos o transcurrentes donde las placas se desplazan de manera paralela en diferentes direcciones. Las placas que se estudian en este trabajo son de tipo convergente generándose grandes cantidades de energía en el contacto o colisión y actuación de los esfuerzos de compresión que permanentemente actúan en la zona.

Los modelos geonuméricos de las placas tectónicas Nazca y Sudamericana fueron estudiados y analizados con base a la energía de deformación y su relación con el

levantamiento de Los Andes (Elberg *et al*, 2013). Los datos de la energía de deformación son obtenidos del mismo trabajo considerando las actividades sísmicas mas importantes de la zona.

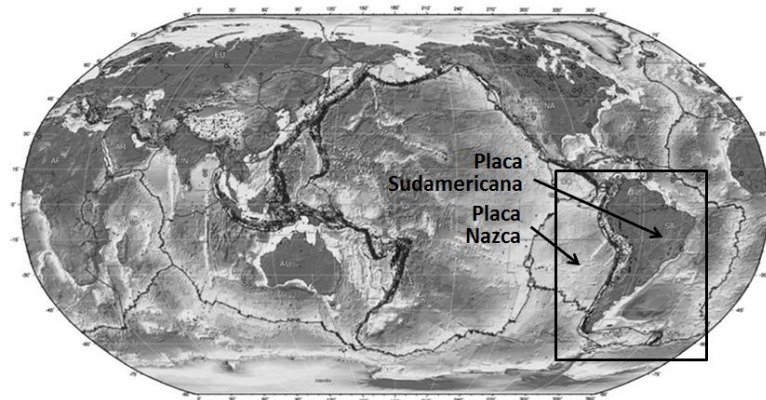


Figura 2. Ubicación del área de estudio. Placas Nazca y Sudamericana.

2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS POR REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Para crear los experimentos por RNA, son utilizados los valores de energía de deformación para el entrenamiento de las redes, variable denominada S_n . La variable fecha es utilizada como fecha juliana, F_j , la cual se representa como el número de días transcurridos desde el mediodía del 1° de enero del año 4713 a. C.

Los experimentos para entrenamiento, prueba y validación son realizados utilizando retardos correspondientes al uso de las tablas de datos obtenidas de la página web principal de la U. S. Geological Survey.

Se realizan 36 experimentos utilizando retardos para generar mas tablas de datos y combinatoria simple para diseñar estudiar los efectos de entradas y salidas, con y sin la energía de deformación.

Los retardos son llamados K-1, K-2, K-3 y K-4. Cada uno representa el la creación de un grupo de datos mas, desplazando las filas dejando un dato sin utilizar para el caso de un retardo, dos líneas en el caso de dos retardos y así respectivamente hasta cuatro retardos, generando cuatro grupos mas de datos para ser utilizados por la red.

La tabla 1 muestra 18 de los 36 experimentos, señalando los experimentos solamente hasta el segundo retardo, de los 4 totales. Los experimentos A1 y A2 no incluyen la energía de deformación y en ambos casos los datos de entrada son la magnitud y la fecha, utilizando un retardo. Para A1 se solicita la magnitud y para A2 se solicita la fecha. Los experimentos A3, A4 y A5 incluyen como datos de entrada la energía de deformación, la magnitud y la fecha todos con un retardo. Y para cada caso se solicita una sola variable de salida, magnitud en A3, fecha en A4 y energía para A5. Los experimentos A6, A7 y A8 tienen las mismas entradas que los anteriores, pero en este caso se solicitan dos variables de salida. Para A6 se pide magnitud y fecha, para A7 se solicita magnitud y energía, y en A8 se pide fecha y energía. El experimento A9 incluye las tres entradas con un solo retardo y solicita las tres variables de salida, magnitud, fecha y energía. Los experimentos A10 y A11 corresponden al uso como variables de entrada a magnitud de fecha sin usar energía ambos con dos retardos, siendo un total de cuatro entradas. De igual manera se hace la combinatoria para dos, tres y cuatro retardos.

Tabla 1. Experimentos para entrenamiento, prueba y validación de las RNA. Se utiliza la magnitud (Mg), la fecha (Fj), la energía de deformación (Sn). Se muestran 18 experimentos de 36 realizados.

EXPERIMENTO	ENTRADAS	SALIDAS
A1	Mg(K-1), Fj(K-1)	Mg(K)
A2	Mg(K-1), Fj(K-1)	Fj(K)
A3	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1)	Mg(K)
A4	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1)	Fj(K)
A5	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1)	Sn(K)
A6	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1)	Mg(K), Fj(k)
A7	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1)	Mg(K), Sn(K)
A8	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1)	Fj(K), Sn(K)
A9	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1)	Mg(K), Fj(K), Sn(K)
A10	Mg(K-1), Fj(K-1), Mg(K-2), Fj(K-2)	Mg(K)
A11	Mg(K-1), Fj(K-1), Mg(K-2), Fj(K-2)	Fj(K)
A12	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1), Mg(K-2), Fj(K-2), Sn(K-2)	Mg(K)
A13	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1), Mg(K-2), Fj(K-2), Sn(K-2)	Fj(K)
A14	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1), Mg(K-2), Fj(K-2), Sn(K-2)	Sn(K)
A15	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1), Mg(K-2), Fj(K-2), Sn(K-2)	Mg(K), Fj(k)
A16	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1), Mg(K-2), Fj(K-2), Sn(K-2)	Mg(K), Sn(K)
A17	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1), Mg(K-2), Fj(K-2), Sn(K-2)	Fj(K), Sn(K)
A18	Mg(K-1), Fj(K-1), Sn(K-1), Mg(K-2), Fj(K-2), Sn(K-2)	Mg(K), Fj(K), Sn(K)

3. RESULTADOS

La tabla 2 muestra 18 resultados de los 36 experimentos realizados y analizados con el programa Statistica Neural Network para los datos sísmicos ubicados en la zona estudiada siendo una de las principales zonas sísmicas del planeta.

Se utilizan como variables la magnitud, la fecha y la energía de deformación calculada por MEF.

Se muestra el rendimiento, la correlación, el error, el número de redes probadas, el tipo de la mejor red, el número de entradas utilizadas y el número de capas ocultas por red.

El análisis del rendimiento se basa al asignar el valor cero (0) a un rendimiento perfecto y valores de uno (1) corresponde a un rendimiento nulo.

El rendimiento hace referencia a la tasa de reconocimiento de la red, es decir, cómo la red valida los resultados. Se representa con valor inverso, es decir, un valor cercano a uno (1) implica un rendimiento pobre, mientras que uno cercano a cero (0) representa un rendimiento excelente.

El error representa el cuadrado de la diferencia que existe entre el valor teórico y el valor calculado. Es por esto, que para la interpretación del error es fundamental el conocimiento de las variables que se están estudiando.

El programa presenta dos opciones para el entrenamiento y obtención de resultados de las redes que se utilizan. La primera opción es la selección automática de variables, llamado de

esta manera pues el programa, en forma automatizada, escoge las variables que son representativas para cada proceso que se ejecuta. Sin embargo estas variables son definidas inicialmente desde el diseño del experimento. Esto es apropiado puesto que se pueden verificar cuales son las variables que se ajustan mejor para el entrenamiento y validación de resultados. La segunda opción, no activa la selección automática de variables, esto es, el programa usa de todas las variables de entrada definidas en los diseños de experimentos en el capítulo VII. En esta investigación se utilizan las dos opciones para diferentes experimentos.

Tabla 2. Resultados de 18 experimentos de los 36 realizados en total. Se muestra el rendimiento, la correlación, el error, el número de redes probadas, el tipo de la mejor red, el número de entradas utilizadas y el número de capas ocultas por red. Si se utiliza selección automática de variables representativas en cada experimento, son utilizadas todas las variables.

EXPERIMENTO	RENDIMIENTO	CORRELACIÓN	ERROR	REDES PROBADAS	MEJOR RED	NUMERO DE ENTRADAS	CAPAS OCULTAS	
A1	muy bueno	0.1460097	0.98	0.114872	60	MLP	1	21
A2	excelente	0.004156	0.99	44.06657	60	GRNN	2	1071
A3	bueno	0.2053607	0.97	0.164862	59	GRNN	3	1071
A4	excelente	0.005076	0.99	52.24469	59	GRNN	3	1071
A5	bueno	0.2339891	0.97	47.888815	59	GRNN	3	1071
A6	bueno	0.1834481	0.98	0.202988	59	GRNN	3	1071
A7	bueno	0.1847085	0.98	0.204004	59	GRNN	3	1071
A8	excelente	0.0000716	1	0.03818	59	GRNN	3	1071
A9	bueno	0.1976023	0.98	0.273965	59	GRNN	3	1071
A10	excelente	0.003026	0.99	0.002308	58	GRNN	4	1071
A11	excelente	0.0001413	1	1.4809	58	GRNN	4	1071
A12	excelente	0.006028	0.99	0.004578	58	GRNN	6	1071
A13	excelente	0.006998	1	1.427031	58	GRNN	6	1071
A14	excelente	0.006998	0.99	1.427031	58	GRNN	6	1071
A15	excelente	0.003522	0.99	0.003775	58	GRNN	6	1071
A16	excelente	0.004703	0.99	0.005084	58	GRNN	6	1071
A17	excelente	0.003082	1	0.004049	58	GRNN	6	1071
A18	excelente	0.003082	0	0.004049	58	GRNN	6	1071

Los resultados obtenidos indican que el rendimiento logrado corresponde a un 77.78%, mejorando a un 83.33% con el uso de todas las variables. De igual manera, al no usar la energía de deformación como dato de entrada muestra un rendimiento de 0.18 catalogado como bueno, con una correlación de 0.98 y un error de 0.14, a diferencia de resultados con el uso de energía de deformación que logran rendimiento y correlación perfectos de 0.00 y 1.00 respectivamente y un error de 1.14E-16.

4. CONCLUSIONES

La principal conclusión de este trabajo señala que la variable energía de deformación es una variable de gran influencia en los resultados. Por otro lado el uso de métodos numéricos y técnicas inteligentes de computación permiten cuantificar la relación que existe entre la energía, la magnitud y el tiempo de ocurrencia de sismos, logrando la obtención de mínimos errores en la predicción de nuevas concentraciones de energía en la zona sísmica sudamericana.

Tabla 3. Resultados de 18 experimentos de los 36 realizados en total. Se muestra el rendimiento, la correlación, el error, el número de redes probadas, el tipo de la mejor red, el número de entradas utilizadas y el número de capas ocultas por red. No se utiliza selección automática de variables representativas en cada experimento, son utilizadas todas las variables.

EXPERIMENTO	RENDIMIENTO	CORRELACIÓN	ERROR	REDES PROBADAS	MEJOR RED	NUMERO DE ENTRADAS	CAPAS OCULTAS	
As1	bueno	0.207467	0.978498	0.157074	62	GRNN	2	1071
As2	excelente	1.36E-16	1	1.45E-12	60	GRNN	2	1071
As3	bueno	0.193751	0.981143	0.153079	62	GRNN	3	1071
As4	excelente	0.003707	0.999993	40.04664	62	GRNN	3	1071
As5	bueno	0.197511	0.980383	41.98885	62	GRNN	3	1071
As6	bueno	0.167155	0.986124	0.193022	62	GRNN	3	1071
As7	bueno	0.176139	0.984775	0.199893	62	GRNN	3	1071
As8	excelente	0.004674	0.999989	63.26138	62	GRNN	3	1071
As9	bueno	0.177932	0.984141	0.24808	62	GRNN	3	1071
As10	excelente	0.002682	0.999996	0.00206	62	GRNN	4	1071
As11	excelente	0.000122	1	1.256973	62	GRNN	4	1071
As12	excelente	0.002529	0.999997	0.002012	62	GRNN	6	1071
As13	excelente	0.000108	1	1.154237	62	GRNN	6	1071
As14	excelente	0.015395	0.999882	3.440545	62	GRNN	6	1071
As15	excelente	0.003575	0.999994	0.003951	62	GRNN	6	1071
As16	excelente	0.002458	0.999997	0.002684	62	GRNN	6	1071
As17	excelente	0.00011	1	2.391073	62	GRNN	6	1071
As18	excelente	0.00305	0.999995	0.004179	62	GRNN	6	1071

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. Elberg, M., González, L., Hidrobo, F. y Aguilar, J. 2013. *Análisis numérico del levantamiento de Los Andes en Sudamérica con base a energía de deformación*. Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 33, No. 1, pp. 43-52, diciembre-marzo. ISSN 2244-8780
- [2]. Elberg M., Rivas F., Andrade W. y Aguilar J. 2012. *Redes neuronales artificiales aplicadas a la estimación del comportamiento de la falla de Boconó*. Capítulo GG-54. Avances en simulación computacional y modelado numérico. E. Dávila, G. Uzcátegui, M. Cerrolaza. (Editores). Venezuela
- [3]. Elberg, M. y Sosa G. 2008. *Estudio de la energía de deformación entre las placas sudamericana, nazca y caribe con la aplicación del método de elementos finitos*. Capítulo MS-61. Desarrollo y avances en métodos numéricos para ingeniería y ciencias aplicadas. L. Martino, V. Carrera, G. Larrazábal y M. Cerrolaza (Editores). Venezuela.
- [4]. Tarbuck y Lutgens. (1999). *Ciencias de la Tierra una introducción a la Geología Física*. Sexta Edición. Madrid. España.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD A POSTERIORI DEL DESLIZAMIENTO LAS GONZÁLEZ, MUNICIPIO SUCRE, ESTADO MÉRIDA-VENEZUELA, APLICANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

José Gregorio Gutiérrez Chacón

jose.gutierrez@ula.ve

Centro de Investigación en Matemáticas Aplicadas (CIMA)

Escuela Básica de Ingeniería. Facultad de Ingeniería

Universidad de Los Andes. Mérida –Venezuela

María Laura Monsalve Hurtado

marialauramonsalve@gmail.com

Resumen. Los análisis de estabilidad de taludes, generalmente tienen como objetivo resolver problemas de inestabilidad, y de esta manera, tratar de diseñar medidas de corrección en función de las características propias de cada talud. Esta investigación plantea analizar la estabilidad a posteriori del deslizamiento “Las González” a través del Método de Elementos Finitos (MEF), para ello se comenzó con la revisión bibliográfica y análisis fotogeológico, posteriormente, se realizó la etapa de campo que incluyó reconocimiento del área y la captación de muestras de suelo, seguidamente se llevaron a cabo ensayos de laboratorio de las muestras tomadas; la metodología seguida permitió construir un modelo geomecánico del deslizamiento, el cual fue analizado a través de herramientas computacionales. Se escogieron cuatro cortes geológicos constituidos únicamente por suelos en su estado natural, y así, evaluar el comportamiento de la masa deslizante. Los valores de desplazamientos obtenidos con la simulación, se corresponden con los valores observados en campo por lo que la aproximación del MEF con las condiciones geológicas del medio estudiado se consideran acertadas.

Palabras Claves: *perfil, suelo, talud, análisis de estabilidad, métodos de elementos finitos, simulación.*

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son peligros geológicos que causan serios daños materiales y pérdida de vidas. Su ocurrencia puede minimizarse adoptando medidas de prevención teniendo un buen conocimiento de las características de su evolución y los factores que intervienen en su desarrollo. El deslizamiento “Las González,” actualmente muestra evidencias de encontrarse activo afectando dos sectores socioeconómicos importantes: viviendas construidas sobre las cabeceras del deslizamiento y la arteria vial Mérida-El Vigía en el tramo “Las González”, municipio Sucre, estado Mérida. Por lo tanto, es necesario determinar mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos, empleando programas de simulación, los desplazamientos que pudiesen originarse en el deslizamiento, y de esta manera, definir las zonas más susceptibles a sufrir movimientos de masa.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Analizar la estabilidad del deslizamiento “Las González”, municipio Sucre, estado Mérida, mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos.

2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar la información bibliográfica y estudios preliminares.
- Realizar el análisis fotogeológico y levantamiento geológico de superficie del área en estudio.
- Identificar los factores externos e internos que afectan la estabilidad del área en estudio.
- Determinar las propiedades geomecánicas de las muestras de suelo extraídas en campo.
- Elaborar un modelo numérico elástico 2D del deslizamiento “Las González”, municipio Sucre, estado Mérida, mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos.

3. UBICACIÓN

El área en estudio está ubicada en el sector “Las González” perteneciente al municipio Sucre del estado Mérida, hacia el noroeste de la ciudad de Mérida (ver figura 1), en un segmento que comunica a las ciudades de Mérida y El Vigía.

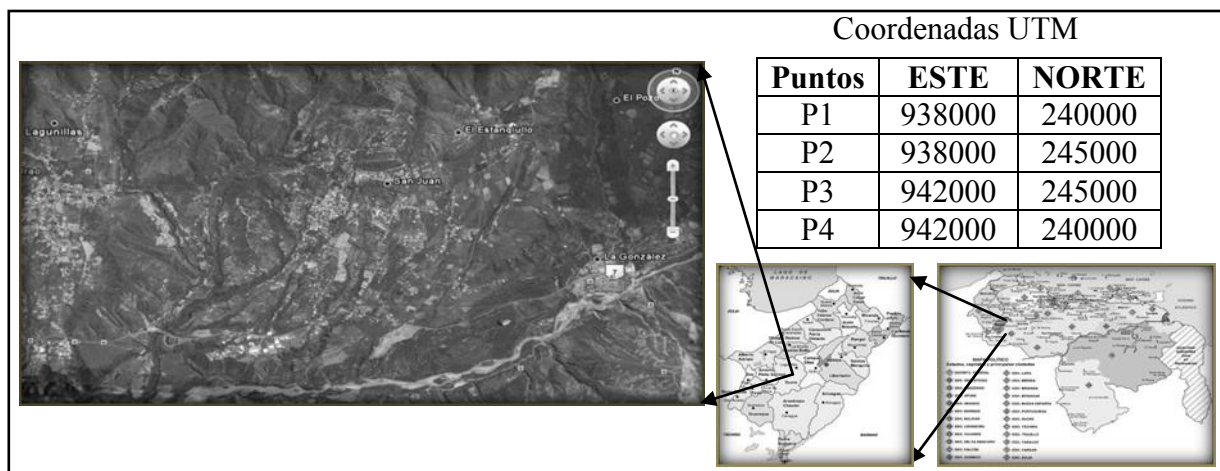


Figura 1. Ubicación del área en estudio [1].

4. METODOLOGÍA

4.1 Estudios Preliminares

Consiste en la búsqueda de toda la información previa y necesaria de la zona de estudio, como: mapas topográficos y geológicos, fotografías aéreas y fotointerpretación de las mismas y, por último, artículos relacionados con el tema de investigación. Adicionalmente, se debe adoptar la búsqueda de temas en los que se ha aplicado el Método de Elementos Finitos (MEF) a problemas de índole geológico, mediante herramientas computacionales como ABAQUS™ [2][3].

4.2 Reconocimientos Generales

Comprende la descripción de características como: relieve y geomorfología, tipos de suelo, aspectos hidrogeológicos, procesos actuantes, modificaciones por procesos naturales y antrópicos y, finalmente, tipo de movimiento de masa [4].

4.3 Estudio de Procesos

Reside en la clasificación de los factores que estarían causando el desequilibrio de la masa deslizante, es decir, los factores encadenantes y desencadenantes [4].

4.4 Investigaciones a Detalle

Esta etapa consiste en realizar los ensayos de laboratorio correspondientes, a las muestras de suelo extraídas en campo, para determinar las propiedades geomecánicas necesarias al momento de llevar a cabo el proceso de simulación de los perfiles en estudio [4].

4.5 Análisis de Estabilidad

Este análisis consiste en la creación de la geometría de los taludes, asignación de las propiedades de los materiales, establecer las condiciones de borde, cargas aplicadas y generar el mallado en cada uno de los perfiles de estudio, y de esta manera, adaptar el proceso de simulación a las condiciones geológicas “reales” del medio.

4.5.1 Generalidades de los Modelos

Para iniciar el análisis de estabilidad, se seleccionan y se trazan en el mapa geológico y topográfico, las secciones longitudinales en las áreas de mayor interés, denominados Perfil 1, Perfil 2, Perfil 3 y Perfil 4 (ver figura 2). Los perfiles mencionados anteriormente, se realizan en un plano bidimensional (x,y), representando toda la información presente en el mapa geológico, y la recolectada en campo. Los modelos utilizados consisten en 4 cortes geológicos, tres de ellos con dirección NW-SE (Perfil 1, 2 y 3) y el último con dirección N-S (Perfil 4).

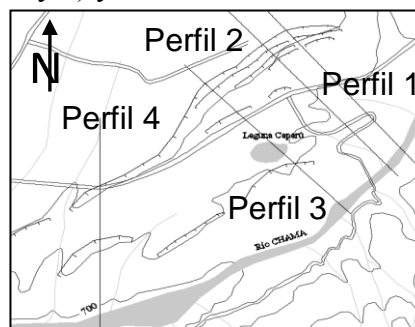


Figura 2. Secciones Longitudinales.

4.5.2 Método de Elementos Finitos

La aplicación de este método puede ser dividida en tres etapas [6]:

Pre-Procesamiento:

Durante esta etapa, se introduce en los diferentes módulos del programa los datos iniciales de la simulación como: geometría, propiedades, ensamblaje, tipo de análisis, interacciones, cargas aplicadas, condiciones de borde y mallado.

Procesamiento:

Es la fase en el cual el programa realiza las iteraciones correspondientes basándose en las ecuaciones del Método de Elementos Finitos.

Post-Procesamiento:

Consiste en la ilustración gráfica de los resultados obtenidos, así como también, la interpretación y convergencia de los mismos.

5. RESULTADOS**5.1 Fotointerpretación**

De manera general, la zona está caracterizada por la presencia de la corona principal del deslizamiento, así como también un gran número de coronas secundarias del mismo. Otro de los rasgos morfológicos importantes que se observan son los lomos de solifluxión, lomos basculados, procesos de carcavamiento, grietas de tracción y zonas de empujes (ver figura 3).

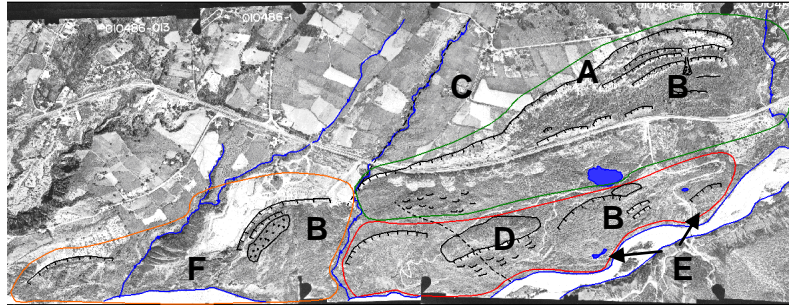


Figura 3. A: Corona Principal. B: Coronas Secundarias. C: Falla El Estanquillo. D: Lomos Basculados. E: Zonas de Empuje. F: Cárcavas.

5.2 Reconocimientos Generales**5.2.1 Relieve, Geomorfología**

Topográficamente los alrededores del sitio en análisis, se caracteriza por ser una zona montañosa. Específicamente, en la zona del deslizamiento hay unos cambios de pendiente muy abruptos, producto de los escalones que se han originado a lo largo de la evolución y características del mismo.

5.2.2 Tipos de Suelos

En base a las tres calicatas realizadas, se observaron suelos arcillosos de tipo CL según el Sistema Unificado de Suelos (SUCS)). Según la Clasificación de Suelos de la AASHTO, los suelos presentes se clasificaron como A-6 (calicata N° 1 y N°2) y A-2-4 (calicata N° 3).

5.2.3 Aspectos Hidrológicos

El cauce principal es el río Chama. Entre sus afluentes podemos mencionar: el río Las González y la quebrada La Sucia. Otras de las masas de agua presentes es la Laguna de Caparú.

5.2.4 Procesos Actuales.

La acción de procesos tectónicos está representada principalmente por la falla de Boconó hacia el sur, la falla el Estanquillo hacia el noroeste, alineamientos representados por lomos basculados y otras microestructuras que evidencian una zona tectónicamente activa. El efecto de los procesos de meteorización y erosión, está reflejado por: cárcavas, procesos de tubificación, precipitación de carbonatos y, las llamadas pirámides de tierra. Las infiltraciones de agua que se originan en la corona principal del deslizamiento (debido al sistema de riego empleado por los agricultores de la zona), así como también, la red de aguas subterráneas presentes, son consideradas un proceso actuante de gran importancia, ya que disminuyen la resistencia al corte del suelo.

5.2.5 Modificaciones por Procesos Naturales y Antrópicos

La acción de los procesos actuantes (en su mayoría naturales), trae consigo cambios en la pendiente del talud, acentuándola en algunos sectores y suavizándola en otros, así como también, cambios en la geometría del mismo. Entre las modificaciones antrópicas se puede

mencionar, la extracción de volúmenes de suelo durante la construcción de la arteria vial Mérida-El Vigía, ocasionando el desequilibrio de los taludes, los cuales a su vez, son afectados por fuerzas estáticas externas como consecuencia de la construcción de viviendas sobre la corona principal del deslizamiento. Las condiciones hidrológicas también han sido modificadas por la intervención humana debido al desempeño de las actividades agrícolas del sector.

5.2.6 Reconocimiento de Movimiento de Ladera

El deslizamiento “Las González” es un movimiento de masa rotacional incoherente múltiple, con generación de movimientos asociados de tipo subsidencias ó hundimientos, solifluxión, reptación, basculamientos y derrumbes; en el cual el componente rotacional es el determinante de la dinámica y el control estructural es el predominantemente regidor del movimiento [5].

5.3 Estudio de Procesos

5.3.1 Factores Internos

La estructura geológica, puesto que existen varios planos de debilidad (corona principal y coronas secundarias), a través de los cuales el agua se infiltra. El comportamiento hidrogeológico debido a la red de aguas subterráneas que presenta e infiltraciones que sobre la cabecera del deslizamiento se originan. Las propiedades geomecánicas ya que la acción del agua causa, en primer lugar, una disminución de la resistencia al corte debido a la generación de presiones intersticiales, y en segundo lugar, aumenta los esfuerzos de corte debido al incremento del peso del terreno. El estado tenso-deformacional debido a que el deslizamiento se encuentra ubicado en la cuenca Pull Apart de “Las González”.

5.3.2 Factores Externos

Precipitaciones y Condiciones Climáticas, ya que durante los ciclos húmedos las precipitaciones son intensas y, debido a la falta de vegetación, planos de debilidad y materiales sueltos, la infiltración de agua es rápida. Procesos erosivos ya que el río Chama socaba el pie del deslizamiento, originado el desequilibrio del mismo. Vibraciones del Terreno por la actividad sísmica y las cargas dinámicas, que de forma esporádica y diferencial, contribuyen al desequilibrio del terreno. Acciones Antrópicas por la construcción de viviendas en la cabecera del deslizamiento y modificación de la geometría y extracción de volúmenes de suelo durante la construcción de la arteria vial Mérida-El Vigía. Cambio de las condiciones hidrológicas debido al desempeño de las actividades agrícolas del sector, principalmente en las cabeceras del talud.

5.4 Investigaciones a Detalle

En la tabla I se muestran el resumen de las propiedades geomecánicas más importantes consideradas durante el proceso de simulación.

Tabla I. Propiedades Geomecánicas de los Materiales.

Materiales	Peso Unitario γ_h (Kpa/m)	Cohesión (c) (Kpa)	Ángulo de Fricción Interna (ϕ)
M1	18,5	50	19,3°
M2	18,5	50	28,6°
M3	18,1	15	33,0°

5.5 Análisis de Estabilidad

5.5.1 Características Generales

En la figura 4 se muestran las características en cuanto al número de elementos y litología de cada perfil. El mallado de los cuatro perfiles se realizó con elementos triangulares CPS6 de la librería de ABAQUSTM (ver figura 4).

En cuanto a las condiciones de borde, fueron restringidos los movimientos horizontales y verticales en la base y borde lateral izquierdo de cada perfil, mientras que la cara expuesta de cada talud no tiene ninguna restricción. La única carga considerada fue la gravedad (ver figura 4).

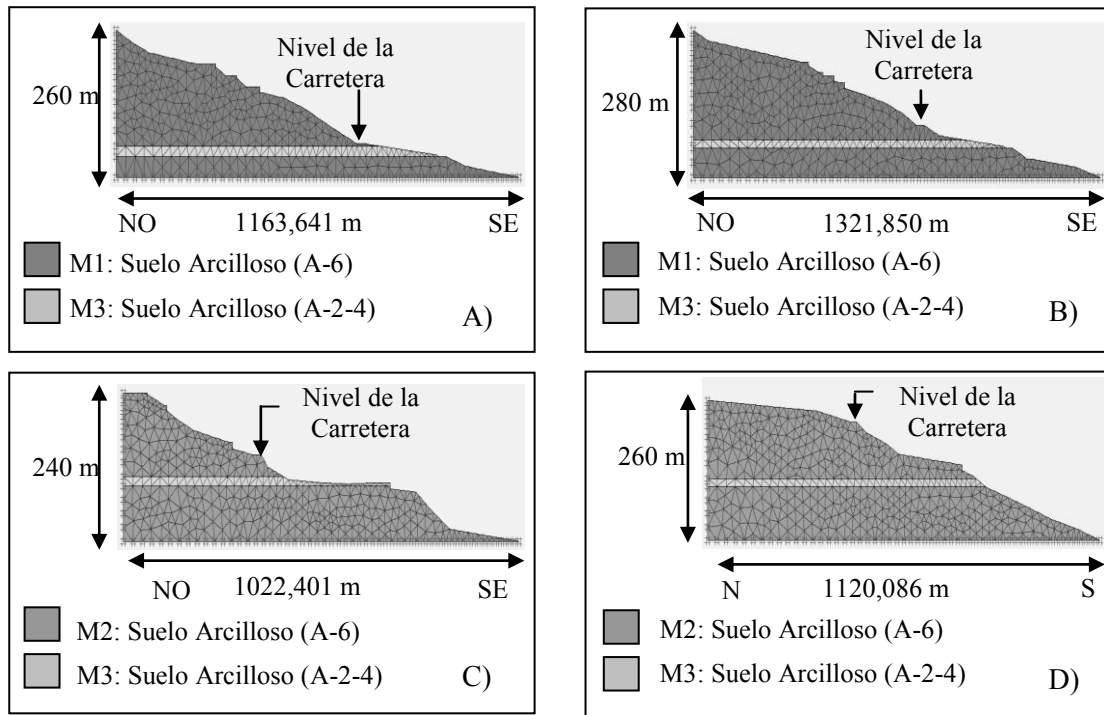


Figura 4. Características Generales de cada perfil. A) Perfil 1 (697 elementos), B) Perfil 2 (987 elementos), C) Perfil 3 (1086 elementos), D) Perfil 4 (1038 elementos)

5.6 Método de Elementos Finitos

A continuación se ilustran los resultados de distribución de desplazamientos totales en metros (U), los cuales se llevaron a cabo mediante el uso de la herramienta computacional ABAQUS™ a través de la licencia del servidor del Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes (CeCalCULA).

La distribución de desplazamientos totales (U_t), se enmarcan en una amplia zona “P” común a los cuatro perfiles, registrándose los valores máximos en el escarpe principal y los escarpes secundarios del deslizamiento debido a los planos de debilidad preexistentes. A su vez, hacia la base y borde lateral izquierdo del perfil, los desplazamientos son nulos (tonos grises más oscuros), resultados que también se esperaban debido a las restricciones de grado de libertad que se hicieron previo a la simulación (ver figura 5).

6. CONCLUSIONES

El sector “Las González”, es una zona potencialmente inestable, enmarcada en una cuenca de tracción, sometida a la acción de diversos procesos geológicos, los cuales se ven reflejados por las diferentes geformas observadas.

Los factores internos y externos juegan un papel importante en el deslizamiento en análisis, ya que la acción de estos (de manera individual o conjunta), contribuyen al desequilibrio de la masa deslizante.

La distribución de los desplazamientos coincide de manera idónea con el comportamiento del deslizamiento en estudio, ubicándose los valores máximos (entre 1,455 y 1,935 m) sobre la cabecera del deslizamiento y los mínimos hacia la base y borde lateral de cada perfil.

Dos sectores importantes están siendo afectados: las viviendas construidas sobre la cabecera del deslizamiento y la arteria vial Mérida-El Vigía, ya que la construcción de éstas edificaciones fueron realizadas en las áreas más desfavorables del deslizamiento en las que se ubican las posibles superficies de falla, convirtiéndose en zonas potencialmente inestables que pudiesen sufrir grandes daños socioeconómicos

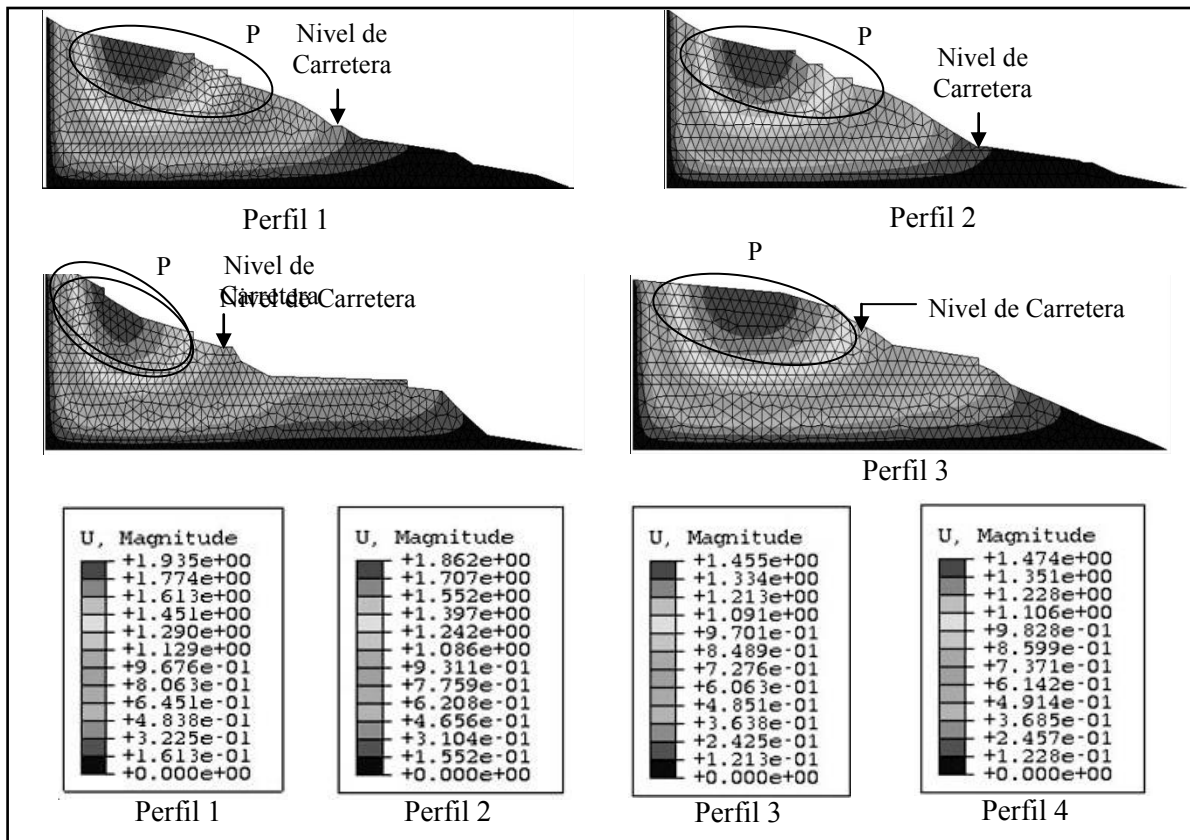


Figura 5. Distribución de desplazamientos totales (en metros)

7. REFERENCIAS

- [1] <http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/estados/merida.html> ; Google Earth
- [2] Gutiérrez, J. y Elberg, M. (2012). *Análisis Numérico de la Orogénesis del Himalaya*. Modelos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones. ISBN: 978-980-7161-03-9 E. Dávila, G. Uzcátegui, M. Cerrolaza (Editores). Isla de Margarita, Venezuela.
- [3] Gutiérrez, J. Torres, J y Elberg, M. (2010). *Uso de elementos finitos en el análisis numérico de la formación del Himalaya por el contacto entre las placas tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe*. Modelos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones. ISBN: 978-980-7161-02-2 R. Chacón, F. León, V. Duarte, O. Verastegui (Editores). Mérida, Venezuela.
- [4] Vallejo, L. Ferrer, M. Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Editorial Pearson Educación. España.

- [5]Ávila, J. y Morales, M. (2006). *Estudio geológico integrado de los movimientos de masa del sector “Las González”, Estado Mérida*. Tesis de Grado, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica, Mérida- Venezuela.
- [6]Chandrupatla, T. y Belegundo, A. (1999). *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería*. Editorial Prentice Hall. México.

SIMULATION STUDY OF GRANULAR LEIDENFROST EFFECT

Ilich V. Idler

vidler@usb.ve

Departamento de Física, Universidad Simón Bolívar

Sartenejas, Baruta, Edo. Miranda, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela

Abstract. *The Leidenfrost effect is a phenomenon in which a liquid, in near contact with a mass significantly hotter than the liquid's boiling point, produces an insulating vapor layer which keeps that liquid from boiling rapidly. In perturbed granular media it is possibly to see a similar effect: a vibrated granular bed under vertical vibrations could, for certain values of amplitude and frequency, present a disperse phase (granular gas), supporting a denser phase or bulk and preventing it for touching the cell's bottom. What is more, if we study the bed's granular temperature, we will see that the granular gas is much hotter than the bulk, making us think that we are in fact in presence of a leidenfrost effect for grains. In this work we present a computational study of a vertically vibrated granular bed, using Molecular Dynamics, in the presence of the granular leidenfrost effect. Also, we study for what values of the vibration parameters this effect appears and we compare our results with experimental results for semi-2D systems. Also, we study certain characteristics of the bed under the effect.*

Keywords: Granular media, leidenfrost effect, complex fluids, granular temperature.

1. INTRODUCTION

Granular systems can display a wide variety of behaviors ranging from solid-like to gas-like and a great deal of work has been devoted to grains in steady states. As an example, under vertical vibration the granular bed will present a well defined compact area (bulk), and a more fluidized area on the top [1]. There is, however, a special case case of granular system where, under strong vibrations, the bulk is supported by a diluted layer of grains. This phenomenon have being called density inversion and granular leidenfrost effect [2]. The latter is based in the leidenfrost effect

in liquids, in which a liquid drop, in near contact with a plate significantly hotter than the liquid's boiling point, produces an insulating vapor layer which keeps that liquid from boiling rapidly [3].

An important characteristic in the ordinary leidenfrost effect is that the vapor layer is much hotter than the liquid drop. Also, the rate of transmission of thermal energy from the plate to the drop decreases. For granular system under vibration, we can define a granular temperature as the kinetic energy of the grains. It have been shown [1] that the granular temperature of a granular bulk is much lower than the temperature of the granular gas. So it is logic to assume that, in the case of granular density inversion, we will have a "hot" phase supporting a "colder" phase. Obviously, we prefer the name granular leidenfrost.

Experimentally, this phenomenon have being studied for semi-2d systems [2]. In such systems, it was considered a regime of low amplitude (A) and high frequency (f), obtaining states where the bulk and granular gas are almost steady (constant height, temperature, etc) and found that a good control parameter to characterize the transition from the normal vibrated phase to the leidenfrost phase was the dimensionless shacking strength:

$$S \propto (A \cdot \omega)^2 \quad (1)$$

with $\omega = 2\pi f$. However, a common quantity that defines vibrated systems is the dimensionless maximum acceleration (g is the gravity acceleration):

$$\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g} \quad (2)$$

In this work, we are interested in the case of high values of both amplitude and frequency, including the effect of the interstitial air on the grains. In such cases, we can't assume that the bulk or diluted phase are in a steady state, as shown by [4]. Being the amplitude big in comparison with the grain radius, the height of the bulk wont be constant and neither will be the temperature.

2. COMPUTATIONAL MODEL

We use three-dimensional molecular dynamics simulations of soft spheres. The implementation is thoroughly described in [1]. In it the interaction between particles is defined as a viscoelastic force, where small superposition between particle is allowed. The interaction contact force is given by:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{ij} = & \left\{ k_n (R_i + R_j - r_{ij}) - \gamma_n m (\mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{n}}) \right\} \hat{\mathbf{n}} \\ & - \text{sgn}(v_{rel}) \left\{ \min(\gamma_s m |v_{rel}|, \mu_f |\mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{n}}|) \right\} \hat{\mathbf{s}} \end{aligned} \quad (3)$$

where R_i is radius of the i th particle, $\vec{r}_{ij} = r_{ij} \hat{\mathbf{n}}$ is the vector connecting the centers of the i th and j th particle, $v_{rel} = \mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{s}}$, and $\hat{\mathbf{s}}$ is an unitary vector perpendicular to $\hat{\mathbf{n}}$. $m = m_i m_j / (m_i + m_j)$ is the reduced mass, k_n is the elastic constant of the particles, γ_n and γ_s are constants that assure inelasticity in the collisions and μ_f is the standard static friction coefficient. The vibration was included as an sinusoidal external force over the particles. The effect of interstitial air over a grain is introduced as a drag force related to the local porosity of the granular media surrounding it. This

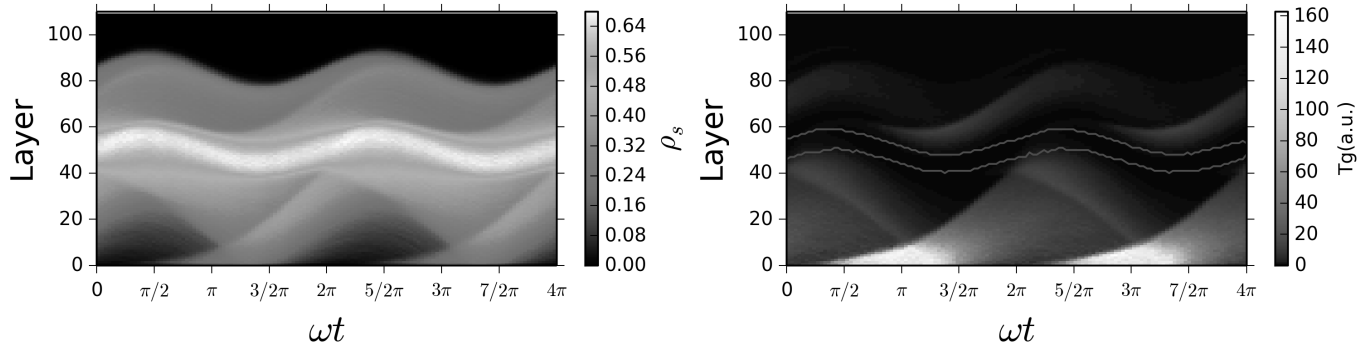


Figure 1: Profiles for density (left) and granular temperature (right), in presence of the leidenfrost effect, for $A = 14\text{mm}$ and $f = 26.66\text{Hz}$. Grey lines in the temperature profile marks the top and bottom of the bulk, for sake of comparison.

porosity is calculated considering the granular medium as a instantaneous porous medium in each iteration pass, and including the grain's first neighbors. The air force over a grain have the form:

$$\vec{F}_i^a = -\frac{\mu}{\kappa(\rho_s)\rho_n}(\vec{v}_a - \vec{v}_i) \quad (4)$$

where v_i is the vertical velocity of the particle, v_a the velocity of the gas outside the granular bed, ρ_n the numeric density, ρ_s the packing fraction, κ the local permeability and μ is the air viscosity.

Our system consists of a rectangular container with periodic boundary conditions in the horizontal axes and hard walls in the vertical one. The horizontal size was $12d \times 12d$, with d the mean grain diameter, and we simulated 9000 particles of 2 mm diameter and density 220 kg/m^3 . Our amplitudes ranged from 6 to 40 millimeters and the frequencies from 5 to 43 Hertz.

3. RESULTS

In Fig. 1 we can see typical density and temperature profiles for beds under the leidenfrost effect. For the temperature we use arbitrary units, as those are the used in the code and there is not much information we could get if put in S.I. units and the density showed is the packing fraction, ρ_s ¹. A layer have height a grain diameter. This profile is obtained averaging several simulation passes and we show two cycles so we can better observe the bed's behavior. We can clearly see a bulk with density $\rho_s \geq 0.6$ that is in between low density areas (gas). The height of the bulk oscillates with the container oscillation, though its amplitude is no the same. Something important is that the bulks density is almost constant while the gas varies constantly, both with height and time, showing that we are far from a steady state scenario. In the granular temperature profile we see that the area under the bulk does not have a constant temperature either. The temperature varies from a very high value in the bottom, to almost zero. The bulk's temperature is not zero but very low (in all cases less than 10, in most cases less than 1) and very constant, though we can't see it with our resolution. In fig. 1 the max temperature is hundreds of times higher than the bulk

¹the bed density is $\rho_m = \rho_g \cdot \rho_s$, with ρ_g the density of a grain.

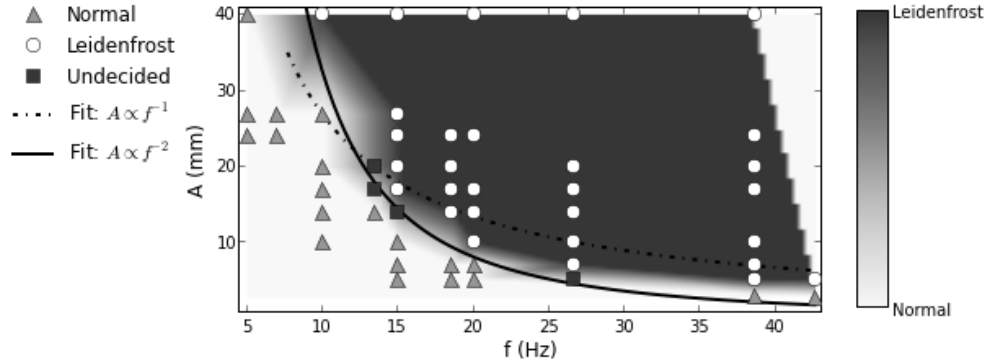


Figure 2: Phase diagram for granular leidenfrost. The colored zones correspond to a linear interpolation, where normal phase have value 0 and leidenfrost have value 1.

temperature, but for higher amplitudes and frequencies it was even thousands times higher. We see too that the gas reaches it's higher temperature periodically and this happens when the majority of the grains in the lower layers collide with the bottom, so it is related to the oscillation.

We divided our results in tree groups: normal fluidized phase, when the bulk is in the lower part of the bed (see ref. [1]); leidenfrost phase, when the bulk is supported by a granular gas, and a undecided phase, where there was a bulk apparently supported over the gas, but in some part of the vibration cycle it got so close to the container bottom that appeared a lower density bulk between the main bulk and the bottom. Huerta et. al. [2] showed that the transition from a fluidized to leidenfrost phase was continual, so the undecided phase must be a phase where the other two coexist. We can see the phase diagram of amplitude vs. frequency in Fig. 2 (markers). We can see a clear division between the phases. So an obvious questions is how to determine a phase diagram when we have a limited number of points. For this, we assigned numbers to the normal phase (0) and the leidenfrost phase (1) (letting out the undecided points), and interpolated our data using the package SciPy [5]. This package triangulates the data using the Quickhull algorithm [6], and on each triangle performs a linear barycentric interpolation, obtaining a continuum data that varies from 0 to 1. We can see this in the colored areas of the Fig. 2. Clearly, the normal phase (red) is separated from the leidenfrost phase (violet) by a narrow strip where the transition must occur. Also, we see that the undecided points, though not included in the data for the interpolation, are inside this strip. Once we had defined our zones, we could determine what order parameter better characterized the transition. For this we considered a curved formed by the points in the middle of the transition strip (which corresponds to a value of 0.5), and fitted those point to curves $S = constant$ ($A \propto f^{-1}$) and $\Gamma = constant$ ($A \propto f^{-2}$). We see that the transition is well defined by the $\Gamma = constant$ curve except for values of low amplitudes and very high frequency ($A = 6\text{mm}$ and $f > 35\text{Hz}$). This makes us think that, for high amplitudes, it is Γ , and not S , the order parameter to be considered.

Following the spirit of [2], we plotted the mean height of the bulk in function of $\Gamma - \Gamma_c$, with Γ_c the critical value for the apparition of the leidenfrost phase. However, as we have amplitudes of order of magnitude higher than the grains diameter, in the normal phase there should appear a gap, so the mean height of the bulk in this case is not zero. Also, we obtained that the height was the same

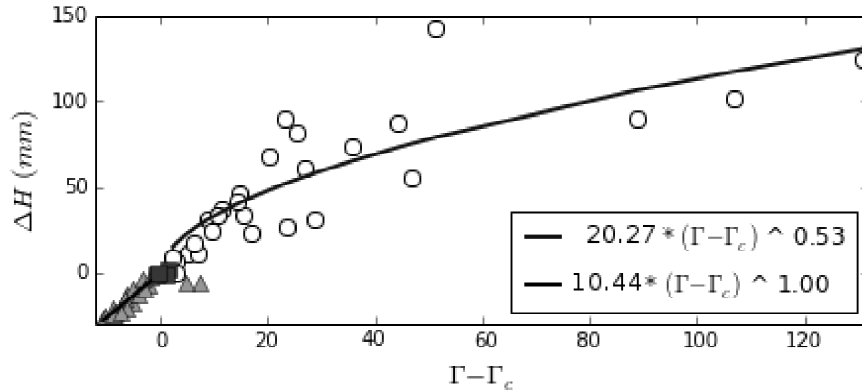


Figure 3: Height of the bulk minus the transition height vs. Γ minus the value of Γ the transition. The different symbols represent the same phases as in Fig. 2.

for all points in the undecided (transition) phase. So we subtracted this height from the mean, as we can see in Fig. 3. We can see that there is a different behavior between both phases, passing from a linear fitting to a square root. Huerta et. al. found two that the height of the bulk (called by them the inversion height) have a square root fitting for points in the leidenfrost phase. Also, there are two points for the the normal phase that are not included in the fitting ($\Gamma - \Gamma_c > 0$), as those are the same points of low amplitude and high frequency that didn't followed our $\Gamma = \text{constant}$ model. Is clear that we must have different behaviors for high and low amplitude.

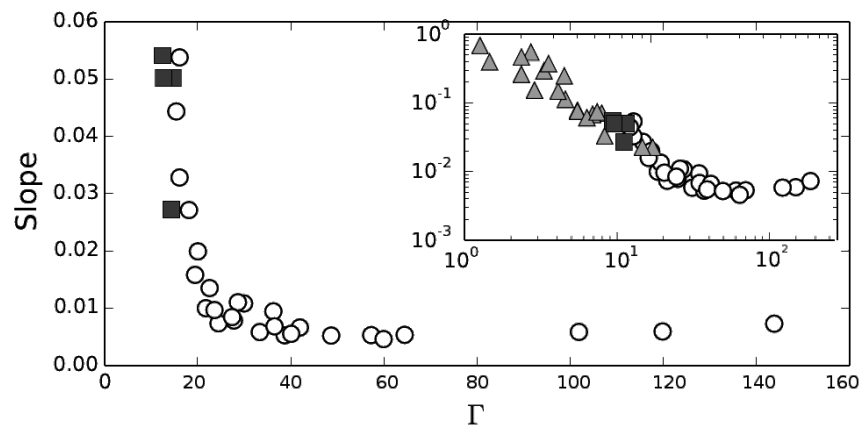


Figure 4: Dimensionless normalized slope of the waves of energy propagation, vs. Γ , for the leidenfrost and undecided phases. Inset: log-log graph that includes the normal phase for comparison. The different symbols represent the same phases as in Fig. 2.

Finally, we wanted to study the energy transmission rate from the bottom layers of the gas to the bulk. In Fig. 1 we saw that the gas presents a density and a temperature wave. This wave starts from the hotter zone of the gas, and are related with the collision of the grains in the lower layers with the bottom of the container; in fact, we can see that the temperature wave starts a little before the density wave, so there is a high increase of kinetic energy in the bottom layers even

before the grains have started compacting. We have seen that there is not appreciable interchange of grains from the bottom to the upper layers, so those waves represents the principal mechanism for energy transmissions, and the slope of the wave front could be considered a good candidate for obtaining a rate of transmission of energy. We can see in Fig. 4 the dimensionless normalized slopes of the wave fronts, that is, the slope of the granular temperature wave fronts, divided by the mean height of the gas (so the energy is traveling the same normalized distance, and we use the same dimensionless time unit $\omega \cdot t$ for all slopes). We can see that the energy transference rate decreases rapidly, reaching an asymptote nearly $5 \cdot 10^{-3}$. It's interesting that, as high values of Γ means higher energy inserted to the system, but that energy travel slower through the gas, and for very high values of Γ this rate is constant. Finally, in Fig. 4 inset we can see a log-log plot for all phases, showing that, in the normal phase, there is also a decreasing of the energy transmission rates, but it behaves as a simply power law, without any asymptote.

4. CONCLUSION

We have shown molecular dynamics simulations of a vibrated granular bed, including the effect of the interstitial gas and presenting a phase where the bulk is supported by a layer of granular gas. We showed that, just as in the leidenfrost effect in liquids, this gas have very high temperature (or its analog, the granular temperature). We demonstrated that, for high amplitudes, is the dimensionless acceleration the best order parameter, instead the dimensionless shacking force as proposed for low amplitudes. We show that the height of the bulk behaves differently in the normal fluidized and in the leidenfrost phase, showing that there is a continuous transition. Also, we showed that the normalized rate of energy transference decreases rapidly with Γ .

REFERENCES

- [1]. I. V. Idler, I. Sanchez, R. Paredes, G. Gutirres, L. I. Reyes, and R. Botet. *Physical Review E*, 79:051301, 2009.
- [2]. D. A. Huerta and J. C. Ruiz-Surez. *Phys. Rev. Lett.*, 92:114301, 2004.
- [3]. J. G. Leidenfrost. University of Duisburg, Duisburg, Germany, 1756.
- [4]. J. Bougie, V. Policht, and J. K. Pearce. Time dependence and density inversion in simulations of vertically oscillated granular layers. *Phys. Rev. E*, 86:020302, Aug 2012.
- [5]. E. Jones, T. Oliphant, P. Peterson, et al. SciPy: Open source scientific tools for Python, 2001.
- [6]. C. B. Barber, David P. Dobkin, and H. Huhdanpaa. The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM TRANSACTIONS ON MATHEMATICAL SOFTWARE*, 22(4):469, 1996.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FUERZA DE FRICCIÓN CINÉTICA GRANO-PARED EN UN SILO

J. R. Darías

jrdarias@usb.ve

Laboratorio de Óptica y Fluidos, Universidad Simón Bolívar, Apartado Postal 89000, Caracas 1080-A, Venezuela.

G. Gutiérrez

gustav@usb.ve

Laboratorio de Sistemas Complejos, Universidad Simón Bolívar, Apartado Postal 89000, Caracas 1080-A, Venezuela.

Resumen. *Presentamos resultados experimentales sobre el comportamiento de un material granular contenido en un silo el cual es descargado por gravedad. Se midió la fuerza de fricción cinética que ejercen los granos sobre la pared del silo durante la descarga, utilizando granos de diferentes tamaños y densidad material. Mostramos que esta fuerza de fricción cinética puede ser modelada haciendo una extensión de la teoría de Janssen para el caso de un silo estático. De los resultados obtenidos, encontramos que el cociente entre el esfuerzo radial y axial sobre las paredes del silo, depende de la densidad aparente y tamaño de los granos, lo cual es contrario a lo establecido para el caso estático, donde el cociente es constante.*

Palabras claves: Material granular, Silo, Caudal, Fricción.

1. INTRODUCCIÓN

Los silos son los dispositivos más antiguos contruidos por el hombre para almacenar grandes cantidades de granos y son ampliamente utilizados en la industria [1]. El comportamiento del material granular dentro de un silo, es sustancialmente diferente al de un líquido. Los líquidos son almacenados en contenedores poco profundos, debido a que la presión que ejerce sobre las paredes del contenedor es uniforme y aumenta linealmente con la profundidad. En el caso de un material granular, este está conformado por un conjunto de elementos discretos macroscópicos altamente disipativos (granos), a través de los cuales, el esfuerzo no se distribuye de manera uniforme sobre las paredes del contenedor. Esto se debe, a que la interacción grano-grano rompe la simetría impuesta por la gravedad [2], dando origen a la formación de cadenas de fuerza no isótropas, que convierten parte del esfuerzo axial en esfuerzo radial [3].

En 1885 Janssen [4], llevó a cabo experimentos donde estudió cómo variaba la presión ejercida por granos de maíz sobre las paredes de un silo sin descargar (caso estático), y formuló un modelo simple, considerando el material granular como un medio continuo que es parcialmente sostenido por las paredes del silo. Janssen planteó dos hipótesis, la primera es que parte del esfuerzo axial producido por el peso del material granular, se convierte en esfuerzo radial. Esta relación está dada a través de la constante de *Redirección del esfuerzo vertical*, K , y tiene la forma

$$\sigma_{rr}(z) = K\sigma_{zz}(z). \quad (1)$$

Esta relación establece un vínculo entre los esfuerzos “principales” axial σ_{zz} y radial σ_{rr} , donde el valor de la constante K puede ser menor o mayor que la unidad, dependiendo de cual de los dos esfuerzos es el mayor (caso pasivo o activo) [5]. Como segunda hipótesis, Janssen utiliza la relación de Coulomb para la fricción entre sólidos, $\sigma_{rz}(z) = \mu_s\sigma_{rr}(z)$, donde σ_{rz} , es el esfuerzo de corte que ejercen los granos sobre la pared del silo y μ_s es el coeficiente de fricción estático entre ambos. Utilizando estas hipótesis y un esquema de rebanadas diferenciales, Janssen encuentra que la relación funcional entre el esfuerzo axial σ_{zz} y la profundidad del material granular z para un silo de diámetro D (Ley de Janssen) es

$$\sigma_{zz}(z) = \rho_b g \lambda [1 - e^{-z/\lambda}], \quad (2)$$

donde ρ_b , es la densidad aparente del material granular, g , es la magnitud de la aceleración de gravedad y $\lambda = D/4K\mu_s$, es una longitud característica del sistema. Para valores de $z \ll \lambda$, el esfuerzo axial toma la forma funcional $\sigma_{zz}(z) = \rho_b g z$, lo cual indica que el comportamiento es hidrostático. Para valores de $z \gg \lambda$, el esfuerzo axial alcanza el valor de saturación $\sigma_{zz}(z) = \rho_b g D/4K\mu_s = \rho_b g \lambda$, donde el material granular deja de comportarse como un líquido. Este valor de saturación es el valor del esfuerzo en la base del silo.

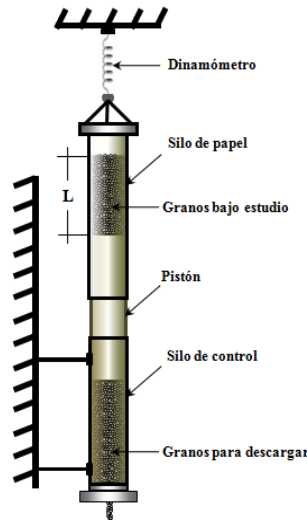


Figura 1: Esquema del montaje experimental. El silo de control es un cilindro de vidrio de diámetro $(40,0 \pm 0,5) \text{ mm}$ y altura $(300 \pm 1) \text{ mm}$, que está unido a un soporte que lo mantiene inmóvil. El extremo inferior posee un orificio central de descarga de diámetro fijo $(15,0 \pm 0,5) \text{ mm}$.

La Ecuación 2 ha sido corroborada en numerosos experimentos y simulaciones [6, 7, 8] y ha sido ampliamente utilizada en el diseño de silos a escala industrial [9]. Sin embargo, esta aproximación fue derivada para describir el comportamiento de los granos en el silo sin descargar (caso estático) y no se ha probado su validez para el caso en que el silo es descargado por gravedad (caso dinámico). En este trabajo, se estudia cómo varía la fuerza de fricción efectiva entre los granos y las paredes de un silo cilíndrico, cuando la columna de granos se desplaza con respecto a la pared, y se hace un estudio del comportamiento del producto de las constantes $K\mu_k$, como función del tamaño y densidad aparente del material granular a través de una extensión de la teoría de Janssen para el caso estático.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

La Figura 1, muestra el esquema del montaje experimental utilizado para medir la fuerza de fricción cinética efectiva grano-pared. En la parte superior del montaje, se tiene un silo cilíndrico hecho de papel Bond de diámetro $D = (40,00 \pm 0,05) \text{ mm}$ y altura $(200 \pm 1) \text{ mm}$. Sobre este silo se mide la fuerza de fricción cinética producida por los granos de diámetro d y densidad aparente ρ_b , depositados en su interior, cuando estos están en movimiento. La fuerza es medida como función de la altura de llenado L , utilizando un dinamómetro mecánico que está unido al silo en uno de sus extremos. El movimiento de los granos bajo estudio se produce por que están acoplados con los granos que están en el interior del silo de control (parte inferior del montaje) a través de un pistón de plexiglás. El silo de control es utilizado para producir descargas a rapidez constante en virtud de lo establecido en la Ley de Beverloo [10].

Todas las descargas de granos para este experimento se hicieron llenando el silo de control hasta una altura de $(210 \pm 3) \text{ mm}$ con esferas de vidrio de $(1,50 \pm 0,05) \text{ mm}$ de diámetro y densidad aparente $\rho_b = (1,7 \pm 0,2) \text{ g/cm}^3$. Esta escogencia permite producir descargas a una rapidez constante $v = (2,57 \pm 0,02) \text{ cm/s}$, lo cual corresponde a un caudal en masa constante $Q = (55,9 \pm 0,1) \text{ g/s}$, medido a través del orificio de descarga.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2, se muestra la variación de la fuerza de fricción cinética efectiva con la altura de llenado L , para granos monodispersos de vidrio. La fuerza de fricción aumenta con la altura y con la disminución del diámetro de los granos, esto es consecuencia del aumento de la densidad de contactos grano-pared. Utilizando la Ec. (2) y el vínculo entre el esfuerzo radial y axial dado por la relación de Coulomb para el caso dinámico $\sigma_{rz}(z) = \mu_k \sigma_{rr}(z)$, obtenemos la siguiente expresión para la fuerza de fricción cinética efectiva como función de la altura de llenado L

$$\vec{F}_\mu(L) = - \left[\frac{\pi D^2 \rho_b g}{4} L - \frac{\pi D^2 \rho_b g \lambda_k}{4} (1 - e^{-L/\lambda_k}) \right] \hat{z}. \quad (3)$$

Las líneas continuas en la Fig. 2, representan los ajustes de los datos experimentales a través de esta ecuación, dejando como parámetro libre el producto $K\mu_k$, contenido en λ_k , ya que el resto de los parámetros quedan determinados de las condiciones experimentales.

En la Figura 3, se gráfica el parámetro de ajuste $K\mu_k$, como función del diámetro de los granos normalizado, d/D . Para valores de $d/D \rightarrow 0$ el valor de $K\mu_k$, tiende a un valor constante alrededor

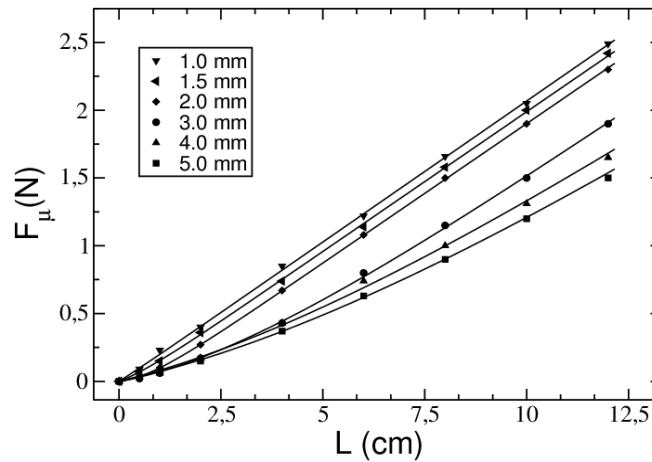


Figura 2: Variación de la magnitud de la fuerza de fricción cinética efectiva, F_{μ} , con la altura de llenado L para granos monodispersos con tamaños entre $1,0 \text{ mm}$ y $5,0 \text{ mm}$ y densidad aparente $(1,55 \pm 0,05) \text{ g/cm}^3$.

de 1,2, comportamiento que indica en este extremo posiblemente nos estamos acercando al “límite continuo”, donde K puede considerarse constante. Un ejemplo ilustrativo de este efecto, es que los silos a escala industrial poseen diámetros del orden de los metros y en ellos se almacenan granos de tamaño del orden de los milímetros, esto implica que $d/D \sim 10^{-3}$, lo explica el éxito de la aproximación de Janssen Ec. (2) para el caso estático, donde el medio granular se considera un continuo y K se considera constante.

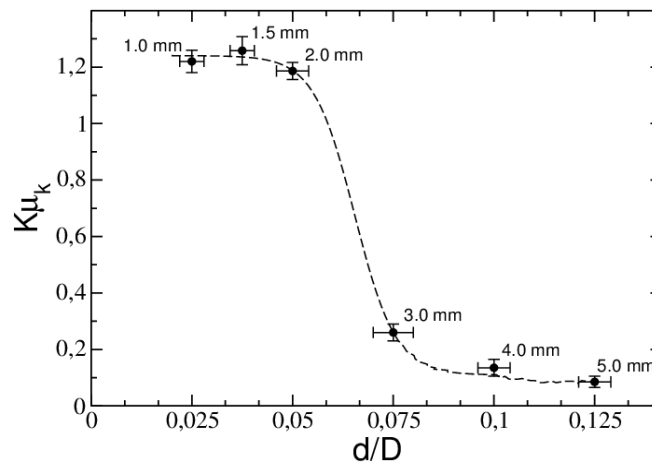


Figura 3: Parámetro de ajuste, $K\mu_k$, como función del diámetro de granos normalizado con el diámetro del silo.

El otro extremo de la curva, donde $d/D \rightarrow 1$, el valor de $K\mu_k$ decrece, tomando un valor igual a 0,1 para el caso de $d = 5 \text{ mm}$. En este extremo, el efecto de tamaño finito es más relevante y en principio el valor de $K\mu_k$, podría disminuir sustancialmente para valores del diámetro de granos mayores a 5 mm . Se puede especular, que a medida que el diámetro de los granos aumenta, la redirección del esfuerzo vertical disminuirá, lo cual implica que el esfuerzo radial se haría más pequeño, haciendo que las paredes dejen de ejercer una fuerza considerable sobre el material granular. Este

comportamiento es análogo al que ocurre en columnas delgadas, donde la aproximación dada por la Ec. (1) pierde validez [11].

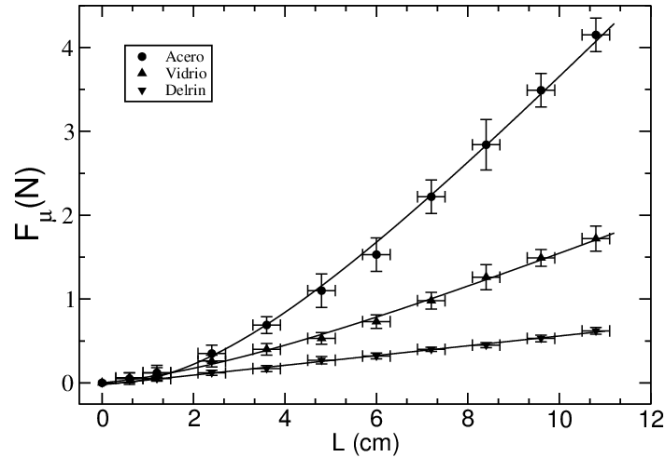


Figura 4: Variación de la magnitud de la fuerza de fricción cinética efectiva, F_{μ} , con la altura de llenado L para granos de 3 mm de Acero (densidad $(4,5 \pm 0,2) g/cm^3$), Vidrio (densidad $(1,55 \pm 0,05) g/cm^3$) y Delrin (densidad $0,79 \pm 0,09 g/cm^3$).

En la Figura 4, se muestra la variación de la fuerza de fricción cinética efectiva con la altura de llenado L , para granos monodispersos de Acero, Vidrio y Delrin. La fuerza de fricción aumenta con la altura y con la densidad material de los granos. Esto es consecuencia del aumento de la densidad de contactos grano-pared y del aumento del peso del material granular a ser redistribuido hacia las paredes.

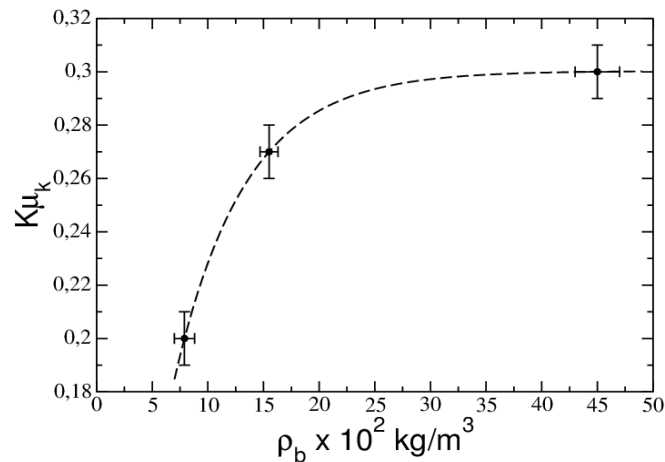


Figura 5: Parámetro de ajuste, $K\mu_k$, como función de la densidad aparente del material granular.

En la Figura 5, se muestra la variación del parámetro de ajuste $K\mu_k$, obtenido de los ajustes de la Fig. 4. $K\mu_k$, aumenta con la densidad aparente del material granular hasta alcanzar un valor constante. Este resultado señala que posiblemente la cantidad de cadenas de fuerza producto de

los contactos entre granos que distribuyen el peso del lecho granular hacia las paredes, saturan en número y por lo tanto el valor de K no cambia.

4. CONCLUSIONES

Se investigó el comportamiento de la magnitud de la fuerza de fricción cinética efectiva F_μ , entre los granos y las paredes de un silo cuando la columna de granos se desplaza verticalmente por efecto de la gravedad. Se obtuvo que la fuerza aumenta con la longitud de llenado del silo, con la densidad aparente del material granular y con la disminución del diámetro de los granos. Los datos experimentales para la fuerza de fricción fueron ajustados haciendo una extensión de la Ley de Janssen para el caso estático, dejando como parámetro libre el producto de la constante de redirección del esfuerzo vertical y el coeficiente de fricción cinético $K\mu_k$. Se encuentra que este producto no es constante, lo cual es contrario a lo propuesto por Janssen en sus hipótesis. De los resultados se observa que sólo para el caso de diámetro de grano pequeño, $K\mu_k$ es constante, mientras que para valores de diámetro de grano grande, la redirección del esfuerzo vertical es débil.

REFERENCIAS

- [1] KNOWLTON, T. M., CARSON, J. W., KLINZING, G. E., & YANG, W. -C., The Importance of Storage, Transfer, and Collection. *Chemical engineering progress*, 17, 44-54, 1994.
- [2] DE GENNES, P. G., Granular matter: a tentative view. *Rev. Mod. Phys.*, 71, 2, s374-2382.
- [3] ASTE, T., DI MATTEO, T., & GALLEANI D'ÁGLIANO, E., Stress transmission in granular matter. *J. Phys.: Condens. Matter*, 14, 2391-2402, 2002.
- [4] JANSSEN, H. A., & VEREINS, Z., Test on grain pressure silos. *Deutsch Ing.*, 39, 1045, 1895.
- [5] NEDDERMAN, R. M., *Statics and Kinematics of Granular Materials*, Cambridge University Press, 1992.
- [6] VANEL, L., CLAUDIN, PH., BOUCHAUD, J.-PH., CATES, M. E., CLÉMENT, E., & WITTMER, J. P., Stresses in Silos: Comparison Between Theoretical Models and New Experiments. *Phys. Rev. Lett.*, 84, 1439-1442, 2000.
- [7] LANDRY, J. W., GREY, G. S., SILVER, L. E., & PLIMPTON, S. J., Confined granular packings: Structure, stress, and forces, *Phys. Rev. E*, 67, 041303, 2003.
- [8] WAMBAUGH, J.F., HARTLEY, R.R., & BEHRINGER, R.P., Force networks and elasticity in granular silos, *Eur. Phys. J. E*, 32, 135, 2010.
- [9] RAVENET, J., *Silos*, Técnicos Asociados, Barcelona (1977).
- [10] BEVERLOO, W. A., LENINGER, H. A., & VAN DE VELDE, J., The flow of granular solids through orifices, *Chem. Eng. Sci.* 15, 260, 1961.
- [11] BRATBERG, I., MALOY, K. J., & HANSEN, A., Validity of the Janssen law in narrow granular columns, *Eur. Phys. J. E* 18, 245, 2005.

MODELADO DE FLUJO EN TUBERÍAS PARA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS

Jean-F. Dulhoste

Marcos L Guillén

Rafael Santos

djean@ula.ve, marcosg@ula.ve, rsantosl@ula.ve

Grupo Termofluidodinámica. Dpto. de Ciencias Térmicas. Escuela de Ing. Mecánica.

Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela.

Gildas Besançon

gildas.besancon@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Département Automatique, GIPSA-lab. INP Grenoble. Saint-Martin d'Herès, Francia.

Resumen. *Este trabajo presenta diversos aspectos en el modelado del flujo en una tubería para detectar y localizar fugas. En el mismo se hace un compendio de varios trabajos elaborados a lo largo de la investigación en la detección de fugas en base a observadores de estado. Se parte del modelo inicial que son las ecuaciones diferenciales parciales de Golpe de Ariete, las cuales se discretizan utilizando el método de diferencias finitas. Se presentan luego las condiciones de frontera utilizables para dicho modelado. En tercer lugar se muestran posibles mejoras en el modelado incluyendo el cálculo de estas condiciones de frontera utilizando ecuaciones que simulan bombas y restricciones de flujo. Y en tercer lugar se presentan los enfoques que se pueden utilizar para tomar en cuenta la fricción en la tubería, con el fin de mejorar el modelo para fines de detección. Para concluir se muestran algunas simulaciones de la tubería y se presenta un ejemplo de detección basado en un observador no lineal construido a partir de un modelo de un número de secciones reducido del modelo presentado.*

Palabras claves: Tubería, detección, localización, observador de estado.

1. INTRODUCCION

La detección y localización de fugas es muy importante para cualquier industria que transporta fluidos ya que una fuga puede causar tanto la pérdida del producto como graves daños ambientales. La investigación en este tema ha generado varios artículos, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes: [1][2][3][4][5][6][7][8][9][10][11]. Estos estudios se pueden clasificar en: Métodos que se basan en un modelo matemático y métodos que no usan modelo

matemático [12]. Los métodos basados en modelos matemáticos permiten calcular parámetros de flujo en diferentes partes de la tubería; como el caudal de una fuga y su posición en la tubería, pero su eficacia depende de la calidad del modelo de tubería.

Los modelos comúnmente utilizados se basan en las ecuaciones de Golpe Ariete [13], discretizadas mediante diferencias finitas. Estos necesitan dos condiciones de frontera para simular la dinámica de flujo en la tubería: presiones o caudales en los extremos. Por ejemplo en [14] se presenta un modelo de fricción para la estimación de fugas utilizando las presiones al comienzo y final de la tubería. En [15] se utiliza el flujo aguas arriba y la presión aguas abajo. Además se propone una mejora del modelo al tomar en cuenta una bomba y dos restricciones en los extremos de la tubería, para reproducir mejor su comportamiento real. En [16], se presenta el uso de un observador tipo filtro de Kalman basado en el modelo de tubería desarrollado, que permite la detección y localización de una fuga con solo dos mediciones en la tubería.

El artículo está organizado como sigue: En el punto 2 se presenta el modelo, en el punto 3 las ecuaciones que definen las condiciones de frontera, en el punto 4 lo referente al modelo de fricción, el punto 5 muestra una validación del mismo, el punto 6 presenta el observador de Kalman y finalmente en el punto 7 las conclusiones.

2. MODELO MATEMÁTICO DE LA TUBERÍA

2.1 Ecuaciones Básicas del Modelo de Tubería

Las ecuaciones de Golpe de Ariete son las representan la dinámica del flujo cuando ocurren cambios en el sistema de tubería [1]. Estas son un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales de tipo hiperbólico [17][18] obtenidas por un balance de masa y energía:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial z} ; \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = -Ag \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{fQ|Q|}{2DA} \quad (1)$$

Dónde: t y z son coordenadas de tiempo y espacio, H es la carga de presión, c es la velocidad del sonido, g aceleración de gravedad, Q flujo en la tubería, D diámetro de la tubería, A área de sección transversal, f coeficiente de fricción.

2.2 Discretización espacial de Q y H

Las derivadas parciales con respecto a z se pueden aproximar utilizando el método de diferencias finitas, haciendo una discretización de la presión (H) el flujo de agua (Q). Si se toman el caudal aguas arriba $Q(0, t)$ y la presión aguas abajo $H(L, t)$, siendo L la longitud de la tubería, se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_i}{\partial t} &= -\frac{c^2}{gA} \frac{Q_{i+1} - Q_i}{z_{i+1} - z_i} \quad \forall i = 1, \dots, n-1 \\ \frac{\partial Q_i}{\partial t} &= -Ag \frac{H_i - H_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} - \frac{f_i Q_i |Q_i|}{2DA} \quad \forall i = 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

El subíndice i en (4) representa a cada una de las variables en la sección i de la tubería.

Otras configuraciones de condiciones de frontera producen ecuaciones diferentes. Se deben definir las condiciones iniciales $Q(z, t)$ y $H(z, t)$ a lo largo de la tubería en el momento $t = 0$.

Para detectar y localizar fugas, el modelo puede ser completado agregando los efectos de las fugas, tomadas como modificaciones del flujo, por lo que el flujo en la posición z de la tubería, donde se produce la fuga se puede escribir como:

$$Q_i = Q_i^* + F(i)\sqrt{H_i} \quad (3)$$

Donde Q_i es el flujo en el punto i , Q_i^* es el flujo después de la fuga, y F_i un coeficiente que permite determinar el caudal de fuga en función de la presión interna de la tubería.

3. CALCULO DE CONDICIONES DE FRONTERA

El valor de las condiciones de frontera se puede calcular agregando la ecuación de una bomba y la ecuación de dos restricciones (Fig. 1).

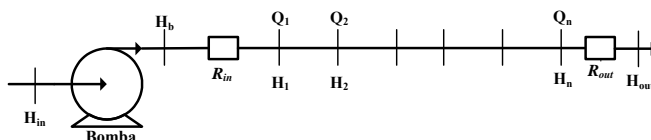


Figura. 1. Sistema de Tubería Real

La ecuación de una bomba centrífuga se escribe de la siguiente manera:

$$H_b - H_{in} = C_2 Q_1^2 + C_1 Q_1 + C_0 \quad (4)$$

Dónde: $H_b - H_{in}$ es la altura de presión manométrica de la bomba, Q_1 es el caudal manejado, C_0 , C_1 y C_2 son los coeficientes de la ecuación de la bomba.

Las restricciones hidráulicas pueden ser modeladas a través de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} R_{in} Q_1^2 &= H_b - H_1 \\ R_{out} Q_n^2 &= H_{out} - H_n \end{aligned} \quad (5)$$

En este caso R (coeficiente de restricción) depende de las pérdidas de presión que ocurren en el tramo de tubería.

4. EL TERMINO DE FRICCIÓN

El termino f de las ecuaciones (1), corresponde al coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, que depende del número de Reynolds (Re) y del coeficiente de rugosidad de la tubería e , y se puede calcular con la relación implícita de Colebrook [19]. En [14] se mostró que se puede utilizar una aproximación explícita conocida como la ecuación de Swamee-Jain, la cual se escribe de la siguiente manera:

$$f = 1.325 \left\{ \ln \left[0.27 \left(\frac{e}{D} \right) + 5.74 \left(\frac{1}{Re} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad \text{para } \begin{matrix} 10^{-8} < e/D < 0.01 \\ 5000 < Re < 10^8 \end{matrix} \quad (6)$$

Debe notarse que en esta formulación del término de la fricción es estacionaria $J_s = \frac{fQ|Q|}{2DA}$, en [14] se evaluó también la posibilidad de utilizar una formulación no estacionaria. En este caso se sustituye el término estacionario J_s por un término que incluye los efectos no estacionarios $J_u = \frac{k}{2A} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + c\Phi_A \left| \frac{\partial Q}{\partial z} \right| \right)$. En donde $\Phi_A = \text{sgn}(Q)$ y k : Coeficiente de Brunone. Sin embargo las conclusiones indican que ésta no aporta ventajas para la detección de fugas.

5. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar este modelo de tubería, se simuló y comparó con los datos reales de un experimento con tres fugas (en los tiempos $t = 100, 400, 700$) realizado en un prototipo real que tiene 85 m de longitud del centro de investigación Mexicano CINVESTAV [20]. En la Fig. 2 se puede ver simultáneamente los datos de simulación H_{ent} , H_{sal} , Q_{ent} , Q_{sal} y las medidas experimentales realizadas en el prototipo h_{ent} , h_{sal} , q_{ent} y q_{sal} .

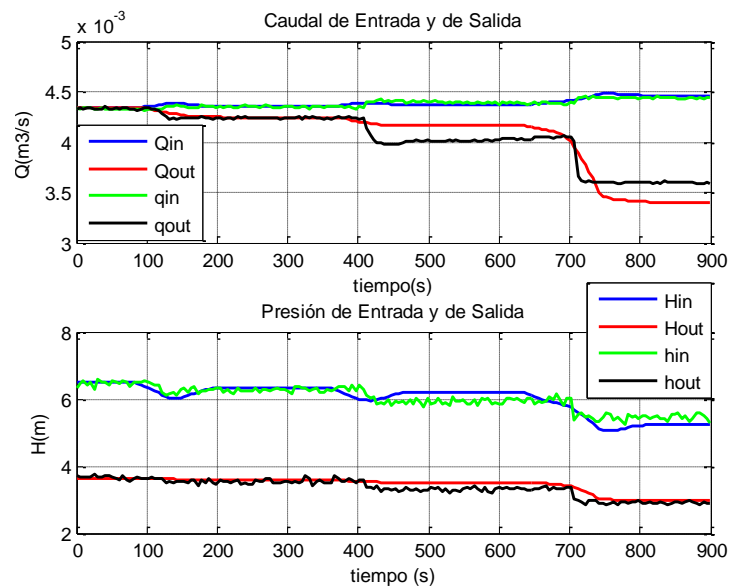


Figura. 2. Comparación entre data simulada y data real cuando se presentan tres fugas.

En [15] se mostró una comparación de estos resultados con los obtenidos mediante otras condiciones de frontera. Es importante resaltar que el comportamiento real, observado en la Fig. 2, no se reproduce sin la bomba y las dos restricciones hidráulicas.

6. DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS UTILIZANDO OBSERVADORES DE ESTADO

En [16] se muestra el uso de un observador no lineal del tipo Kalman extendido [21], basado en el modelo aquí presentado, para determinar la fuga y su posición. Para ello se consideraron solo dos secciones de discretización, siendo, $z_1 = 0$, $z_2 =$ posición de la fuga, y $z_3 = L$ en el modelo del observador. Obteniendo un modelo con cuatro estados $x_1 = H_1$, $x_2 = Q_2$, $x_3 = H_2$ y $x_4 = Q_3$. Este se amplía agregando dos estados más de la manera siguiente: $x_5 = z_2$ que representa la posición de la fuga y $x_6 = F(i)$ que representa el coeficiente de fuga.

Allí se muestra la simulación del observador, para detectar y localizar fugas sobre un modelo con 12 secciones. Los parámetros y condiciones de simulación son: $g = 9.81$ m/s, $C = 373$ m/s, $A = 0.003$ m², $L = 85$ m. $u_1 = Q_1 = 0.0043$ m³/s y $u_2 = 3.5$ m, y las medidas usadas en el observador son contaminadas con ruido blanco. La Fig.4 se puede ver como el observador estima el caudal y la posición de la fuga muy rápidamente y de manera bastante exacta. También se verifico la habilidad del observador para estimar diferentes posiciones de la fuga y diferentes porcentajes de la misma a lo largo de la tubería.

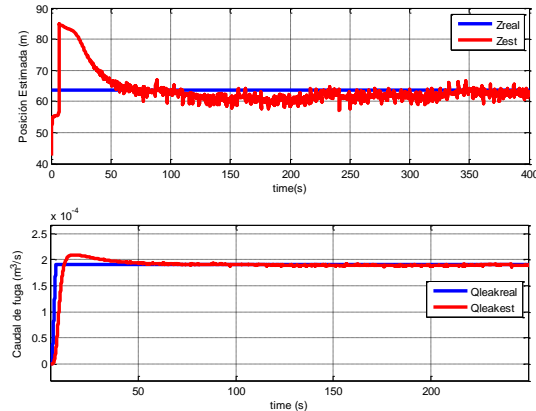


Figura. 3. Estimación de una fuga del 10% de Q_1 y una posición de 63.75 m.

7. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el modelado del flujo en tuberías para detectar y localizar fugas en tuberías con un enfoque basado en observadores de estado. Este enfoque se basó en un modelo de tubería mejorado, al adicionar al modelo de tubería una bomba y dos restricciones. El comportamiento de este modelo se validó comparando su desempeño con datos reales obtenidos de un banco de prueba experimental para fugas. Luego, se presentó un observador de tipo filtro de Kalman extendido con el propósito de estimar de forma simultánea el caudal de fuga y su posición, el cual requiere solamente dos variables medidas, y se observó que estima la posición de la fuga y su caudal muy rápidamente y de manera bastante exacta.

Entre las perspectivas de trabajo futuro se encuentran la estimación de la fuga y su posición en un banco de pruebas real, que está en proceso de construcción.

Agradecimientos

Al programa de colaboración Franco-Venezolano ECOS-Nord V11M02 / PI-2010000303 Fonacit, Fundayacucho Venezuela 2011 quien financio parcialmente este trabajo.

REFERENCIAS

- [1].Souza A.L., Cruz S.L. and Pereira J.F.R. “Leak Detection in Pipelines through Spectral Analysis of Pressure Signals”. *Braz.J. Chem. Eng.*vol.17 n.4-7, 2000.
- [2].Allidina A. Y. and Benkherouf A., “Leak detection and location in gas pipelines,” *Control Theory and Applications*, IEE Proceedings D, vol. 135, no. 2, pp. 142–148, 1988.
- [3].Mpesha W., Chaudry M. N., and GassmaS. n, “Leak detection in pipes by frequency response method,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 127, pp. 137–147, 2001.

- [4]. Brunone B. and Ferrante M., “Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 39, no. 5, pp. 539–547, 2001
- [5]. Wang X. J., “Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128, no. 7, pp. 697–711, 2002.
- [6]. Ferrante M. and Brunone B., “Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state test-1: Harmonic analysis,” *Advanced Water Resources*, vol. 26, no. 1, pp. 95–105, 2003.
- [7]. Covas D., Ramos H., and de Almeida A. B., “Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 131, no. 12, pp. 1106–1116, 2005.
- [8]. Verde C., Visairo N., and Gentil S., “Two leaks isolation in a pipeline by transient response,” *Advances in Water Resources*, vol. 30, no. 8, pp. 1711–1721, 2007.
- [9]. Besançon G., Georges D., Begovich O., Verde C., and Aldana C., “Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines,” in *Proceedings of European Control Conf.*, Kos, Greece, 2007.
- [10]. Castro-Burgos L. and Valds-Gonzalez H., “Leak detection in water pipelines: Proposal based on a bank of filters.” *Revista chilena de ingeniería*, vol. 17, no. 3, pp. 375–385, 2009.
- [11]. Torres L., Besançon G., Navarro A., Begovich O., and Georges D., “Examples of pipeline monitoring with nonlinear observers and realdata validation,” in *8th IEEE International Multi-Conf on Signals Systems and Devices*, Sousse, Tunisia, 2011.
- [12]. Gertler Janos J.. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. New York: Marcel Dekker 1998.
- [13]. Chaudry M.H., *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold Co., 1979.
- [14]. Dulhoste J-F., Besançon G., Torres L., Begovich O. and Navarro A.. “About Friction Modeling For Observer-Based Leak Estimation In Pipelines”. *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*. Orlando, FL, USA, 2011. p.p. 4413-4418.
- [15]. Guillén M., Dulhoste J-F, Besançon G. and Santos R.. “Study of A Flow Model for Detection and Location Of Leaks and Obstructions In Pipes” *9th International Conference of Modeling, Optimization and Simulation-MOSIM'12* June 06-08, 2012 Bordeaux-France
- [16]. Guillén M., Dulhoste J-F, Santos R, Besançon G. and Rubio S. I. “Deteccion Y Localizacion De Fugas Basado En Observadores Utilizando Un Modelo De Tuberia Mejorado”. *XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. La Plata, Argentina, 11 a 14 de noviembre de 2013.
- [17]. García-Serra Jorge, Vela, A.F. *Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión*. Universidad de Coimbra, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de la República Oriental del Uruguay. ISBN: 84-600-9146-5
- [18]. Chapra S. C., Canale R. P. *Métodos Numéricos para Ingenieros*. Editorial: MacGH
- [19]. Potter M. C., Wiggert D. C. *Mecánica de Fluidos*. Thomson. 2002
- [20]. Begovich O., Pizano A., and Besançon G., “Online implementation of a leak isolation algorithm in a plastic pipeline prototype.” *Latin American Applied Research*, vol. 42, no. 2, pp. 131–140, 2012
- [21]. Besançon G., *Nonlinear Observers and Applications. Nonlinear Observers and Applications Series: Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 363 Besançon, Gildas (Ed.) 2007, XII, 224 p. Also available online., Softcover ISBN: 978-3-540-73502-1

SIMULACIÓN EN MATLAB DE PROBLEMAS DE CONTORNO ELÍPTICOS EN UNA DIMENSIÓN EMPLEANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Jorgenson J. Zambrano A.

Dilio A. Godoy B.

jzambrano@fing.luz.edu.ve

diliogodoy@hotmail.com

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad del Zulia.

Escuela de Ingeniería Civil, Universidad del Zulia

Resumen. *Gr'qdlgkxq'f'g'gw'g't'cdclq'h'wg'f'kug°'ct'wpc'j'gttco'k'pvc.'s'wg'f'g'vgt'o'kpctc'rc'iqnwek»p'f'g'wpc'geweck»p'f'k'gt'gpekc'n'gr'f'v'kec'gp'wpc'f'ko'gpuk»p.'cr'kec'pf'q'gr'o'²'v'qf'q'f'g'grgo'gpvqu'h'pkxqu'e'qp" c{wf'c'f'g"O'c'v'cd'{"gr'f'kug°'q'f'g'k'p'v'gt'h'e'gu'f'g'w'w'c't'k'q"°'I'w'k'Ø'H'K'P'K'Q"3'0'g'u'w'p'rt'qi't'co'c's'w'g" t'g'u'w'g'r'x'g'rt'q'd'r'go'cu'gp'wpc'f'ko'gpuk»p"°'g'rgo'gpvqu'h'p'g'c'r'gu.'ew'c'f't'°'v'ke'qu'{"e'À'd'ke'qu'+r'qt'gr'o'²'v'qf'q" f'g'grgo'gpvqu'h'pkxqu.'w'uc'p'f'q'gr'o'²'v'qf'q'f'g'I'c'r'g't'n'k'p"e'q'o'q'et'k'g't'k'q'f'g'q'r'v'ko'k'c'ek»p.'e'q'o'r'c't'c'p'f'q" u'g'e'w'g'p'ek'u'f'g'c'r't'q'z'k'o'c'ek'q'p'g'u'f'q'p'f'g'p'q'j'c'{"u'q'n'w'ek»p'c'p'c'i'f'k'ec'{"e'c'r'e'w'c'p'f'q'gr'g't't'q't'f'g'g'p'g't'i'°'f'{" gr'et'k'g't'k'q'f'g'e'q'p'x'g't'i'g'p'ek'o*

Palabras claves: Elementos finitos, Galerkin, Ecuación elíptica, Matlab, Guía de la interfaz de usuario (GUI).

1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los campos de la investigación científica, surge la búsqueda de la respuesta de un sistema descrito por una ecuación diferencial, de la cual muchas veces no se conoce la respuesta analítica y es allí donde se hace necesario aplicar el método de elementos finitos e implementarlo en un software que posea la capacidad de manejar matrices y grandes cálculos [1], además de una interfaz con el usuario que le permita un trabajo más amigable, debido a esto el Matlab representa una alternativa para cumplir esos propósitos. El objetivo de la presente investigación fue simular en Matlab problemas de contorno elípticos en una dimensión.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

2.1. Tipo de ecuación diferencial utilizada

Se desarrolló un programa que resuelve problemas cuya ecuación diferencial es de tipo elíptica, para dominios de tipo unidimensional como el problema que describe la Ec. (1).

$$-\frac{d}{dx} \left[\alpha(x) \frac{dU(x)}{dx} \right] + \beta(x)U(x) = f(x) \quad (1)$$

dónde: $U(x)$: Representa la variable de la solución; $\alpha(x)$ y $\beta(x)$: Representan las propiedades físicas o materiales del sistema; $f(x)$: Constituye la carga interior. En el desarrollo del software se diseñaron rutinas para tomar en cuenta tres condiciones de borde, a saber: Dirichlet, Newman y Robin o mixta [2].

2.2. Procedimiento general de doce pasos para la solución de ensayo

Está dado por el procedimiento general de 12 pasos que establece Burnett [3], el cual comprende dos etapas: el desarrollo teórico y el desarrollo numérico-computacional. El desarrollo teórico comprende los primeros 6 pasos, desde escribir las ecuaciones residuales de Galerkin [4], integrar por partes y simplificar [5], sustituir la solución de ensayo del elemento, desarrollar expresiones específicas para las funciones de forma utilizando los polinomios de Legendre como lo establecen [6] y [7], sustituirlas dentro de las ecuaciones del elemento como lo establece [8] y preparar las expresiones para el flujo. El desarrollo numérico-computacional comprende los últimos seis pasos, desde especificar los datos numéricos para el problema particular (dentro del programa FINITO 1.2 las mallas se pueden desarrollar de varias maneras; los valores de α y β , se pueden especificar: constantes, variables en cada elemento y como una función; las cargas interiores poseen tres opciones no excluyentes. Todo ello se muestra en los diferentes paneles de la Fig. 1), evaluar los términos internos y ensamblarlos dentro del sistema de ecuaciones, aplicar las condiciones de borde al sistema de ecuaciones por medio del panel que se muestra en la Figura 2, resolver el sistema de ecuaciones, evaluar el flujo, mostrar la solución y estimar la exactitud. Finalmente, se realizan las gráficas de la solución y el flujo. Todos estos pasos se reseñan con más detalle en el trabajo de investigación de Rojas [5].

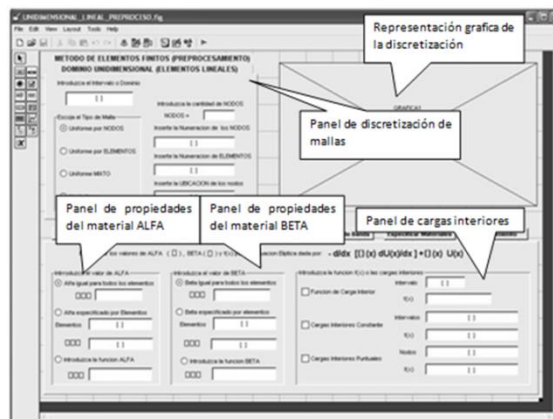


Figura 1. Pantalla de introducción de datos para el caso lineal.

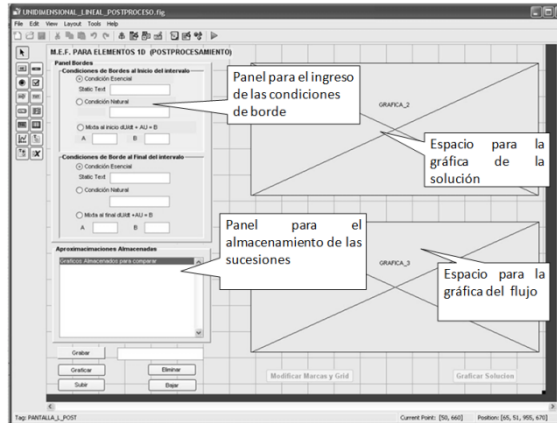


Figura 2. Pantalla de salida para elementos lineales.

2.3. Descripción del programa FINITO 1.2

La pantalla inicial del programa FINITO 1.2 se muestra en la Fig. 3.



Figura 3. Pantalla principal del programa FINITO 1.2.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Ejemplo. La Figura 4 describe un cable de 20 ft estirado horizontalmente con una tensión de 100 lb y sostenido en ambos extremos con una densidad de peso lineal de 0.5 lb/ft. La ecuación diferencial y el dominio se especifican en la Ec. (2).

$$-\frac{d}{dx} \left(T(x) \frac{dW}{dx} \right) = f(x) \quad 0 < x < 20 \quad (2)$$

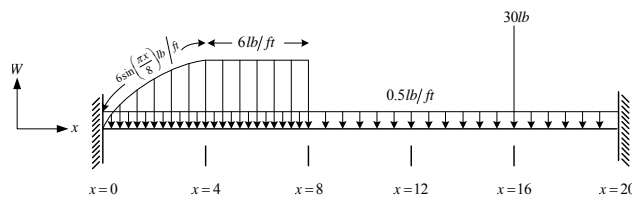


Figura 4. Cargas verticales aplicadas a un cable bajo tensión.

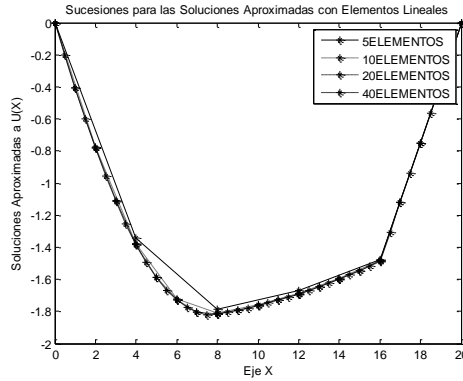


Figura 5. Sucesión de soluciones aproximadas lineales para el ejemplo.

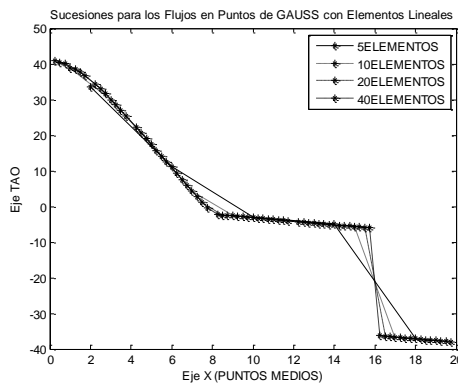


Figura 6. Sucesión de flujos en puntos de Gauss para el ejemplo: elementos lineales.

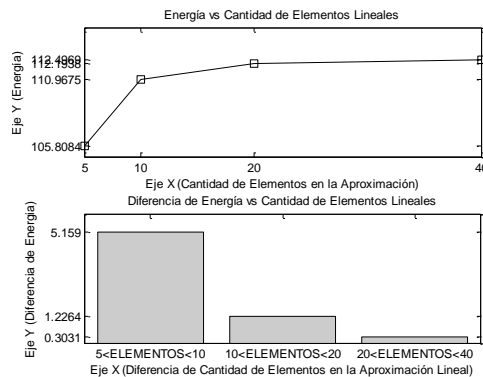


Figura 7. Energía de las soluciones aproximadas lineales para el ejemplo.

Las sucesiones de las soluciones lineales se observan en las Fig. 5 y 6, el error de energía y la diferencia por cada aproximación se muestra en la Fig. 7. Las sucesiones de las soluciones cúbicas (Fig. 8 y Fig. 9), el error de energía y la diferencia por cada aproximación se muestra en la Fig. 10.

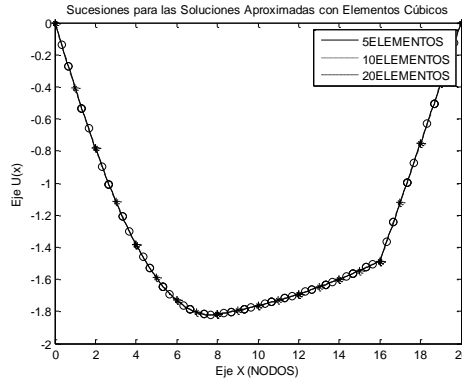


Figura 8. Sucesión de soluciones aproximadas cúbicas para el ejemplo.

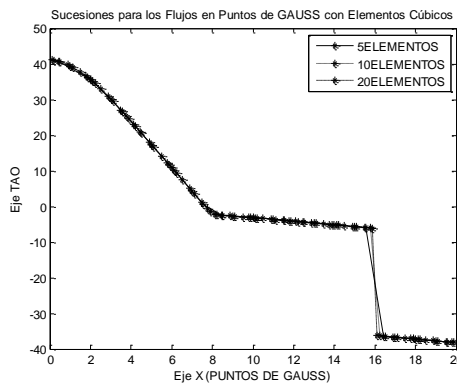


Figura 9. Sucesión de flujos en puntos de Gauss para el ejemplo: elementos cúbicos.

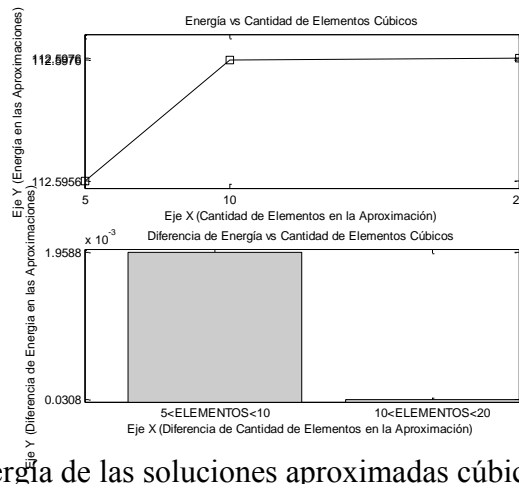


Figura 10. Energía de las soluciones aproximadas cúbicas para el ejemplo.

Otras aplicaciones que podrían validar la herramienta diseñada son las simuladas para el caso del ejemplo 3.1 de la referencia [9], ejemplo 12 de la referencia [10], ejemplo 5.6 de la referencia [11], donde -en cada uno de éstos ejemplos los resultados obtenidos mediante el programa fueron muy precisos.

4. CONCLUSIONES

- Los algoritmos diseñados para la generación de mallas permiten una gran variedad de opciones para la discretización.
- Las interfaces de usuario de Matlab diseñadas para introducir la información del problema y para mostrar la salida del mismo, desarrollan opciones que facilitan la comprensión de los datos de entrada y permiten visualizar las respuestas gráficas de manera más simple.
- Se ha verificado el programa desarrollado utilizando para ello problemas cuya respuesta analítica era conocida, y comparándola con la respuesta numérica, arrojando excelentes resultados.
- Si se resuelven problemas cuya solución analítica no es conocida, el programa FINITO 1.2 puede estimar la solución mediante una sucesión de soluciones aproximadas y calcular la diferencia de errores de energía entre aproximaciones.
- Se ha desarrollado un programa que permite analizar la solución de problemas de contorno elípticos unidimensionales usando para ello las interfaces de usuario gráficas de Matlab.

REFERENCIAS

- [1] Moore, H., *Matlab for Engineers*, Second ed., United States America: Pearson, 2009, pp. 1-2.
- [2] Myint-U, T. and Debnath L., *Linear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers*, Fourth ed., Boston: Birkhauser, 2007, pp. 330-331.
- [3] Burnett, D. *Finite Element Analysis from concepts to applications*, New Jersey: Addison-Wesley, 1988, pp. 97, 119, 223-224, 310-314.
- [4] Segerlind, L. *Applied Finite Element Analysis*, Michigan: John Wiley and Sons, 1984, p. 27.
- [5] Rojas, O. *Estudio del Método de los Elementos Finito Aplicado a Problemas de Contorno Tipo Elíptico*. Maracaibo, 1999, pp. 32-33-34-35-36-37-38-39-40-41-42.
- [6] Lewis, R., Perumal, N., Kankanhally, S. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. England: John Wiley and Sons, 2004, pp. 41-42-43-44.
- [7] Kwon, Y., Bang, H. *The Finite Element Method using Matlab*, United States: CRC Press, 1997, pp. 157, 158 y 159.
- [8] Cheney, W., Kincaid, D. *Numerical Mathematics and Computing*, Sixth ed., Belmont: Thomson, 2008, pp. 230-239.
- [9] Volakis, L., Chatterjee, A., Kempe, L. *Finite Element Method for Electromagnetics*, Canada: IEEE PRESS, 1998, pp. 83-84.
- [10] Liu, G., Quek, S. *The Finite Element Method*, Oxford: Butterworth, 2003, pp. 295-302.
- [11] Hutton, D. *Fundamentals of Finite Element Analysis*, First ed., New York: McGraw Hill, 2004, pp. 152-158.

MOTION OF INTRUDERS WITHIN A VIBRATED GRANULAR BED

Iván Sánchez

ijsanche@ivic.gob.ve

Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Caracas 1020-A,
Venezuela

Karol Asencio

Diego Maza

Iker Zuriguel

Departamento de Física y Matemática Aplicada, Universidad de Navarra, Pamplona 31008, Spain

Abstract. *We present experimental results of the motion of cylindrical and spherical intruders immersed in a bulk of grains contained in a quasi-two-dimensional rectangular box undergoing vertical sinusoidal oscillation. For spherical intruders we study the effect of the container size on the rising/sinking time of intruders with two different densities (greater and lower than the bulk density of the granular material). For cylindrical intruders we study the behavior of intruders with three different densities (above, equal and below the bulk density of the granular material) in a Brazil nut and a reverse buoyancy regime. Studying the intruder's motion inside a single period of oscillation reveals interesting aspects of the segregation behavior. In the Brazil nut regime all three intruders ascend in a non-linear way, with only quantitative differences. In the reverse buoyancy regime, different density intruders show qualitatively different behavior.*

Keywords: granular material, segregation, reverse buoyancy, brazil nut effect

1. INTRODUCTION

Segregation occupies a privileged spot in the study of granular materials due to its importance in industrial applications such as rotating drums, hoppers, mixers, pipes, and in vertically vibrated media (for this last case, Kudrolli's review [1] is a good starting point). There are several mechanisms behind intruder segregation (arc formation, buoyancy, air drag, percolation, inertia, convection and combination of some of the above). The relevance of each mechanism depends on the particular configuration (granular material, container geometry,

vibration frequency and amplitude, and other parameters). Most of the literature studies the intruder displacement over many cycles of vibration (see [1] and references therein) and only a few works [2]–[4] have been able to resolve the motion of the intruder within a single cycle of oscillation. In this work, we present a detailed analysis of the intruder displacement in a single period of oscillation in two well distinguished regimes: a Brazil Nut Effect (BNE) regime where all intruders ascend regardless of their density ρ_i and a Reverse Buoyancy (RB) regime where the value of ρ_i relative to the density ρ_g of the granular bed, determines the motion of the intruders, i.e intruders with $\rho_i > \rho_g$ ascend through the granular bed while intruders with $\rho_i < \rho_g$ sink. Different regimes are obtained using different grain sizes for the granular material, and some test were performed changing the interstitial fluid, using water and silicone oil.

We also show the effect of the container size on two features of the phenomenon of RB: the global rise/sink time of heavy/light intruders and the critical initial height Z_{0c} below which intruders with $\rho_i < \rho_g$ sink, reported in references [2], [3].

Table 1. Intruders' physical characteristics.

Intruder name (material)	Shape	Dimensions* (cm)	Density ρ_i (gr/cm ³)	Relative density ρ_i / ρ_g
A (steel, polished)	Sphere	d = 2,390±0,005	7,7±0,1	5,35
B (iron, unpolished)	Sphere	d = 2,560±0,005	7,6±0,1	5,28
C (plastic)	Sphere	d = 2,555±0,001	0,24±0,01	0,17
D (brass)	Cylinder	d = 2,550±0,001 h _c = 1,500±0,001 h _f = 1,300±0,001	8,31±0,01	5,77
E (acrylic, filled with lead shot)	Cylinder	d = 2,550±0,001 h _c = 1,500±0,001 h _f = 1,300±0,001	1,46±0,03	1
F (acrylic)	Cylinder	d = 2,550±0,001 h _c = 1,500±0,001 h _f = 1,300±0,001	0,59±0,01	0,41

* d is the diameter, h_c and h_f are the cylinder heights for experiments in coarse and fine grains respectively.

2. EXPERIMENTAL SETUP

Our experimental setup consisted of intruders (see Table 1) immersed in a granular bulk contained in a quasi-2D Plexiglas rectangular acrylic container. The box was mounted on an electromagnetic shaker driven by a function generator that supplied a sinusoidal excitation with 13 Hz of frequency and 5.9 mm of amplitude (implying a maximum acceleration of 4.0g with g the acceleration of gravity.). Experiments were performed at atmospheric pressure and prior to each realization the inner walls were covered with anti-static spray. Two different kinds of particles were used to conform the granular bulk: fine grains (glass spheres of diameter between 180-300 μm) to obtain a RB regime, and coarse grains (glass spheres with diameter 2 mm) to obtain a BNE regime. At rest, the granular bed had a height H of two thirds of the vessel height, a porosity of 0,44±0,01 and a bulk density $\rho_g = (1,44 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$. Regular and high-speed video were used to record experiments. Intruder position was obtained by digital image analysis, using standard grayscale threshold combined with morphological operations on binary images. Tests

using tap water with density $\rho=(1,01\pm 0,02)$ g/cm³ and viscosity $\eta=1$ cP, or silicon oil $\rho=(1,01\pm 0,02)$ g/cm³ and viscosity $\eta=0.1$ cP, instead of air as the interstitial fluid were performed sealing the container with GoreTex thread, and pouring the liquid from the top after the granular material and the intruder were placed inside, completely filling the container. Reference [5], provides a dimensionless number $\tau=\rho_g\omega\kappa/\eta$ with ω the angular frequency of oscillation and κ the permeability of the granular column (can be estimated from the grain diameter via the Kozeny-Carman equation [5]). For a given maximum acceleration, decreasing τ will promote a RB regime. In our case τ for the BNE regime was ≈ 100 τ for the RB regime. It is possible to achieve a RB scenario using for example 2 mm grains in silicone oil or 1 mm grains in tap water, but intruder speeds are an order of magnitude slower than those reported here.

Experiments with variable container size and spherical intruders (low time resolution): A box (16,4±0,1)cm tall, (2,7±0,1)cm thick with variable width from (3,5±0,1)cm until (10,5±0,1)cm in 1cm steps was used. Intruders were easily spotted through the transparent container walls. Experiments were recorded with a digital CMOS camera at 30 frames per second with 1.3 megapixel resolution. Intruders A and B were initially placed at the bottom of the container. Intruder C was placed at 5cm from the bottom of the container.

Experiments with fixed container size and cylindrical intruders (high time resolution): A box (28,0±0,1)cm tall, (20,0±0,1)cm wide and (15,0±0,1)cm thick was used. For coarse grains h_c was 14 mm so as to prevent grains fitting in between the circular faces of the intruder and the container walls. The latter was impossible to achieve for fine grains since there is a wider grain-size distribution. Therefore, we used $h_f=13$ mm, allowing enough space between the circular faces and the walls to hold ≈ 10 grains. This is a large enough quantity of grains to avoid the blockage of the intruder, but small enough to allow intruder visualization (see Fig. 2). Experiments started were recorded with a fast camera at 1 megapixel resolution and 3000 frames per second. This particular configuration maximized the speed and resolution while maintaining an adequate field of view to monitor the motion of the intruder during 10 cycles of vibration.

3. RESULTS

Effect of container size on spherical intruders rise/sink time: First of all we measured the overall rise/sink time of intruders as a function the container width, results are shown on the left side of Fig 1. Shortening the width of the container reduces the speed of the intruders (increases the rise/sink time). This result reminds us of the reduction of the terminal velocity of a single particle moving in a confined fluid when the diameter of the particle is near the diameter of the pipe. The slowing effect can be associated with the volume restriction affecting the granular material dilation. The slowing effect is larger on intruder C due to its lower inertia. Another result, shown on the right side of Fig. 1, is the saturation shown by Z_{0c} at larger widths. It is important to note that the shape of the curve is sensible to the preparation of the experiment (if the intruder is placed gently, or if it is pressed against the granular material). The critical initial position Z_{0c} was shown to depend on the grain size of the granular material, and on the height of the granular column. This last dependence is shown on the inset of Fig. 2 right, and displays also a saturating behavior when the column gets taller.

Motion of cylindrical intruders within a single oscillation cycle: In Fig 2 the vertical position of the intruder in the container's reference frame is displayed for BNE and RB regimes. It becomes evident that intruders only move during the time when the granular material detaches from the

bottom, resting steady during the rest of the cycle. Now, since the granular column also moves with respect to the vessel, it seems interesting to study the displacement of the intruder with respect to the granular column. Among the several ways that can be used to estimate the position of the granular column we chose to take the bottom free surface as a reference (black squares in Fig. 2). The reason for this lies in the fact that the bottom surface is clearly defined both for large and fine grains and is easy to detect with the camera (Fig. 2). It is interesting to note that, with fine grains, the gap is not constant along the bottom surface as there is a small local deformation just below the intruder. For simplicity we measure the gap as the average along the whole box.

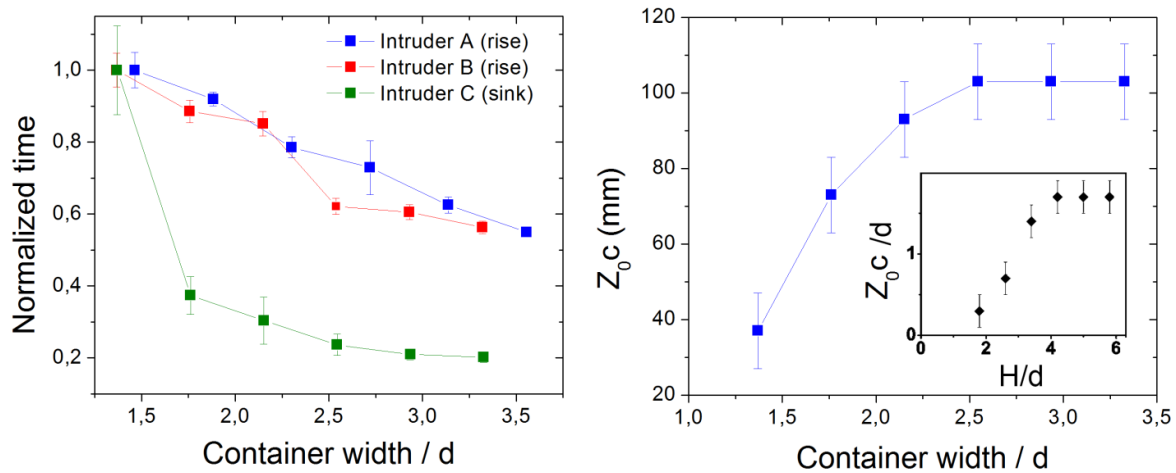


Figure 1 *Left*: Overall rise/sink time of intruders (normalized with the largest time) as a function of the container width (divided by d). *Right*: Critical initial height Z_{0c} below which a light intruder sinks. The inset shows a similar result reported in reference [3] for Z_{0c} as a function of the height H of the granular column (divided by d).

The plots displaying the displacement of the intruders with respect to the granular column (blue circles in Fig. 1) reveal interesting aspects of the intruder's motion a vibration cycle. In the BNE regime, when the granular column detaches from the bottom, the intruder starts rising with a velocity that depends on its relative density. In all the cases the trajectories are similar: the intruder position seems to grow quadratically with time until it decreases linearly. It is important to note that the moment at which the intruder starts to descend with respect to the granular column coincides with the landing of the granular bottom. Hence, we can attribute the intruder descending interval to the time that it takes the granular material to settle down after landing.

In the RB regime, the three intruders show qualitative differences in their motion. Intruder F descends, intruder E practically does not move (its displacement is basically zero after hundreds of cycles) and intruder D rises. Remarkably, in all the cases the intruder displacement seems to be governed by its motion during the interval from the detachment of the bulk to the time when the column reaches its maximum height and starts to descend (around 2.3π in Fig. 2). The time at which the column starts to descend is crucial as in this very moment the airflow through the column reverses its sign. When the granular column is ascending the air flows downwards through the column whereas when the granular column descends the air is driven out to the surface. The behavior observed in the RB regime can be mainly attributed to the air flow effect. When intruder F starts moving its velocity is reduced by the air drag which has a less important effect on the material of the bulk. This causes a downward relative displacement of the intruder

with respect to the column. After the inversion of the air flow, this effect is reversed and the intruder moves upwards with respect to the bulk. The average downward displacement during one cycle of vibration is just a consequence of the fact that the intruder moves for longer times downwards than upwards with respect to the bulk. In the case of intruder D, air drag has a weaker effect on it than on the bulk resulting in the rise of the intruder. The above discussion is the base of the model proposed in [3]. However, there is evidence showing that the air drag is not the only ingredient behind intruder motion [6].

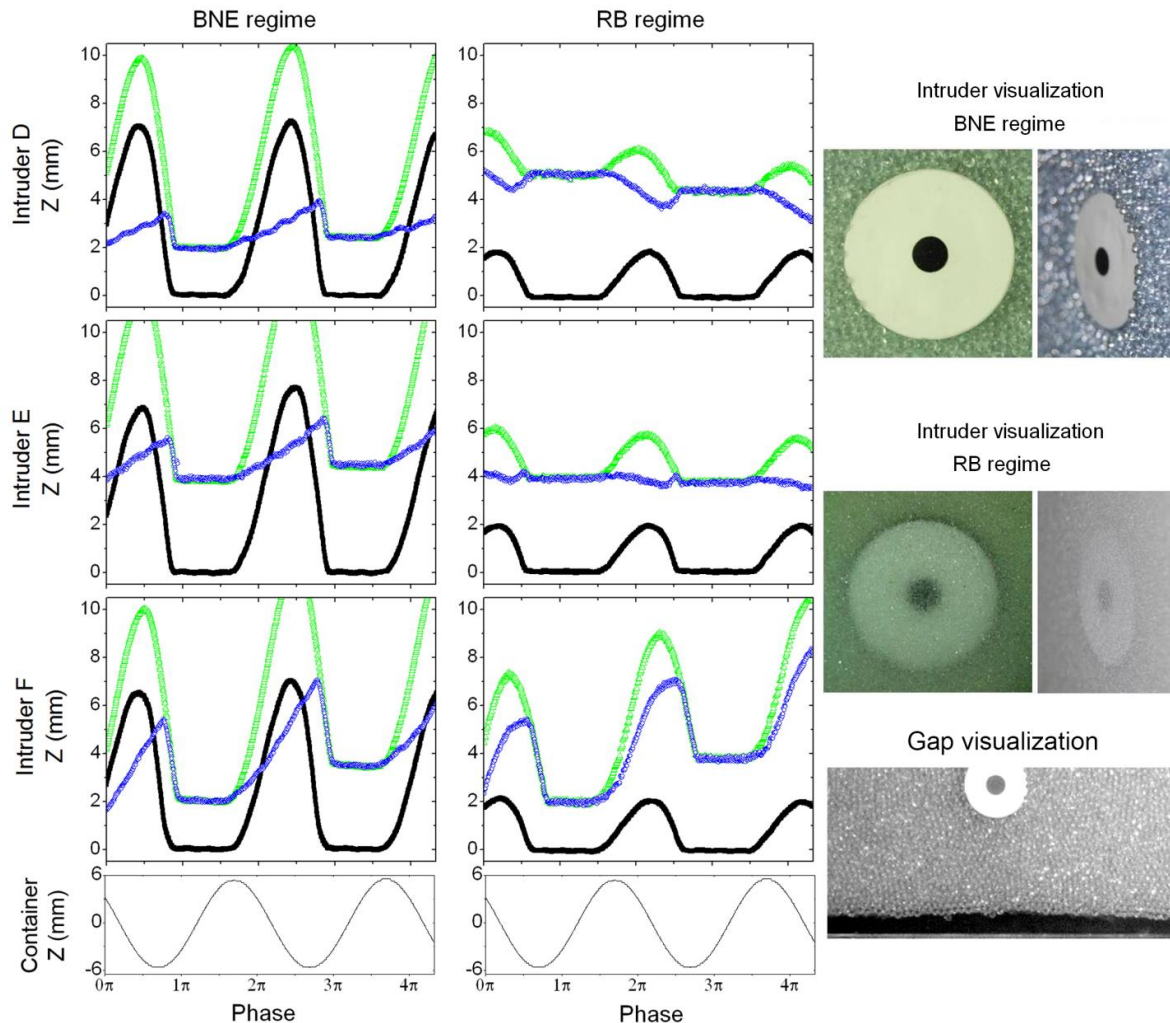


Figure 2- Left: vertical position (Z) of intruders tracked during two oscillation cycles for BNE and RB regimes. Plotted are the intruder position with respect to the container (\blacktriangle), the intruder position with respect to the bottom of the granular column (\bullet) and the position of the bottom of the column (\blacksquare). The position of the container is plotted at the bottom as a reference. Right: snapshots showing intruder visualization and the gap below the granular column.

An interesting point in the RB regime is the study of the phase at which the intruder starts moving. Two models have been recently proposed to explain the motion of an intruder within a single oscillation cycle: an “air drag based model” [2], [3] and an “air mediated buoyant force

model” [5], [7]. Despite the fact that both models provide a good prediction of the overall rising/sinking time during many cycles, they fail to fully describe the motion within a cycle of vibration. Among other differences, the models predict different phases for the onset of intruder motion. The “air drag based model” predicts the onset when the gap at the bottom starts developing (at the moment when air starts flowing through the column) whereas the “air mediated buoyant force model” predicts the onset at the inflexion point in the growing portion of the gap (at the moment when the downward airflow through the column is maximum). Here we show that the onset of motion takes place when the gap starts developing, according to the prediction of the “air drag based model”, something that has also been observed in computer simulations considering the effect of an interstitial fluid [8].

4. CONCLUSIONS

In summary, we have shown the motion of intruders immersed in a vibrated granular bulk during a single cycle of vibration in two carefully chosen regimes to observe Brazil nut effect and reverse buoyancy. Although intruder's trajectories in the container reference frame seem alike (except quantitative differences), the trajectories with respect to the position of the bottom of the granular column display qualitative differences in the intruders behavior. We also showed for a reverse buoyancy regime that when the container size is near the size of the intruder, the overall intruder speed as well as the critical height below which light intruders sink tend to reduce.

Acknowledgements

We thank Vladimir Idler and Angel Garcimartín for valuable logistical and intellectual help.

REFERENCES

- [1] A. Kudrolli, “Size separation in vibrated granular matter,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 67, pp. 209–247, 2004.
- [2] M. Möbius, X. Cheng, G. Karczmar, S. Nagel, and H. Jaeger, “Intruders in the Dust: Air-Driven Granular Size Separation,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 93, no. 19, p. 198001, Nov. 2004.
- [3] M. E. Möbius, X. Cheng, P. Eshuis, G. S. Karczmar, S. R. Nagel, and H. M. Jaeger, “The Effect of Air on Granular Size Separation in a Vibrated Granular Bed,” *Phys. Rev. E*, vol. 72, p. 11304, 2005.
- [4] J. Ellenberger, C. O. Vandu, and R. Krishna, “Vibration-induced granular segregation in a pseudo-2D column: The (reverse) Brazil nut effect,” *Powder Technol.*, vol. 164, pp. 168–177, 2006.
- [5] L. I. Reyes, I. Sánchez, and G. Gutiérrez, “Air Driven Reverse Buoyancy,” *Phys. A*, vol. 358, pp. 466–474, 2005.
- [6] I. Sánchez, G. Gutiérrez, I. Zuriguel, and D. Maza, “Sinking of light intruders in a shaken granular bed,” *Phys. Rev. E*, vol. 81, no. 6, p. 62301, Jun. 2010.
- [7] G. Gutiérrez, L. I. Reyes, I. Sánchez, K. Rodríguez, V. Idler, and R. Paredes, “Vibration induced airflow through granular beds and density-dependent segregation,” *Phys. A*, vol. 356, pp. 83–87, 2005.
- [8] V. Idler, I. Sánchez, R. Paredes, and R. Botet, “Reverse buoyancy in a vibrated granular bed: Computer simulations.,” *Eur. Phys. J. E. Soft Matter*, vol. 35, no. 10, p. 106, Oct. 2012.

ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA VIDA ÚTIL EN UNA REDUCCIÓN SOMETIDA A EROSIÓN

Alberto Sarcos

Wilber Rosales

Juan Colmenares

Jesús Ramírez

asarcos@unet.edu.ve

wrosales@unet.edu.ve

jccolmen@unet.edu.ve

jaramirez@unet.edu.ve

Programa de Simulación Computacional Aplicada a Termofluidos y Estructuras, Universidad Nacional Experimental del Táchira
Av. Universidad, Sector Paramillo, San Cristóbal-Venezuela

Resumen. *En la presente investigación, se usaron técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional como herramienta de mantenimiento predictivo con el fin de determinar la vida útil de una reducción de 1 a ½" sometida a unas condiciones de erosión producida por un fluido que transporta partículas sólidas. En primer lugar, se sometió la pieza a condiciones de erosión controladas en un banco de pruebas, obteniendo la tasa de erosión experimental en kg/s. El siguiente paso consistió en realizar simulaciones numéricas siguiendo los lineamientos de buena práctica de CFD, primeramente se analizó la longitud de salida ideal para las simulaciones, luego el mallado óptimo y por último se calculó las tasas de erosión para diversos modelos de turbulencia. Se compararon estas con la tasa de erosión experimental con el fin de obtener el modelo que más se adapta a esta aplicación. Se obtuvieron errores entre el 14 y 17% para el modelo de turbulencia k-ε RNG. A la par se obtuvieron perfiles de erosión en donde se encontró las zonas de máxima y mínima erosión dentro del accesorio. Por último se realizó un análisis de esfuerzo – deformación en el tiempo para comprobar el mecanismo de falla de la pieza y se determinó la vida útil.*

Palabras claves: Simulación Numérica, Tasa de Erosión, Vida Útil, Mantenimiento Predictivo

1. INTRODUCCIÓN

Cualquier componente se degrada a lo largo de su vida útil. Estos mecanismos de degradación son muy variados y bastante complejos de estudiar. Un mecanismo en particular es la erosión en sistemas de transportes de fluido. En algunas industrias, como la petrolera la

cementera o la azucarera, se tiene la necesidad de transportar fluidos con partículas sólidas, y la interacción de estas partículas y las paredes de la tubería junto con sus accesorios, produce pérdida de material originando el proceso de erosión.

Las reducciones son accesorios comunes en los sistemas de tuberías y son susceptibles a este tipo de erosión, debido al cambio de dirección que sufre el fluido haciendo que las partículas se desvíen e impacten en las paredes. La erosión por partículas sólidas es un fenómeno altamente complicado de estudiar, con un amplio rango de factores que intervienen como la velocidad del fluido, el flujo másico de arena, las propiedades del fluido, las propiedades de la partícula, el material de la pared del accesorio y la geometría del accesorio (Chen et al [1]). En orden de predecir este tipo de erosión, se han desarrollado a través del tiempo una variedad de modelos, aunado al desarrollo de técnicas de simulación numérica en el área de Dinámica de Fluidos Computación (CFD), hacen posible obtener tasas de erosión y perfiles de erosión para este tipo de accesorios.

En vista de lo anteriormente expuesto, el presente trabajo de investigación pretende utilizar las técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD, para estudiar la tasa de erosión de una reducción de 1 a 1/2" sometida a condiciones e erosión controlada, con el fin de determinar la vida útil de la misma.

2. ECUACIONES GOBERNANTES

2.1 Movimiento de las partículas

Según el manual del usuario de FLUENT 6.2 [2], se permite simular una segunda fase discreta utilizando un modelo Lagrangiano (la fase continua es simulada utilizando un modelo Euleriano). Esta segunda fase es representada por partículas esféricas dispersas en la fase continua.

La predicción de la trayectoria de las partículas (fase discreta) se realiza integrando el balance de fuerzas sobre la partícula, el cual es escrito en un sistema de referencia Lagrangiano. Este balance de fuerzas involucra la inercia de la partícula con las fuerzas que actúan sobre la misma, el cual puede ser escrito, por ejemplo para la dirección en x de las coordenadas cartesianas, como:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

Donde el término $F_D(u - u_p)$ es la fuerza de arrastre por unidad de masa de partícula, y:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} * \frac{C_D Re}{24} \quad (2)$$

Donde u es la velocidad de la fase del fluido, u_p es la velocidad de la partícula, μ es la viscosidad molecular del fluido, ρ es la densidad del fluido, ρ_p es la densidad de la partícula y D_p es el diámetro de la partícula. Re es el número de Reynolds relativo, el cual es definido como:

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3)$$

El coeficiente de arrastre C_D puede ser tomado de la ecuación:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (4)$$

Donde los valores de a_1 , a_2 y a_3 son constantes que aplican para partículas esféricas suaves, para un amplio rango de Re .

2.2 Acoplamiento entre la fase discreta y continua

El acoplamiento de dos vías “Two-waycoupling” es logrado resolviendo alternadamente las ecuaciones de la fase discreta y la continua hasta que las soluciones de ambas fases han parado de cambiar. La transferencia de momento de la fase continua a la fase discreta es computada examinando el cambio de momento de una partícula cuando este pasa a través de cada volumen de control:

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re}{\rho_p D_p^2 24} (u_p - u) + F_{otras} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (5)$$

Donde μ es la viscosidad del fluido, ρ_p es la densidad de la partícula, D_p es el diámetro de la partícula, Re es el número de Reynolds, u_p es la velocidad de la partícula, u la velocidad del fluido, C_D el coeficiente de arrastre, \dot{m}_p es el flujo másico de partículas, Δt es el time step y F_{otras} son otras interacciones de fuerza. Esta transferencia de momento aparece como una caída en el balance de momento de la fase continua en cualquier cálculo posterior del campo de flujo de la fase continua.

2.3 Modelo de Erosión usado en CFD

La erosión por partículas sólidas puede ser monitoreada a través de las paredes de la tubería. En el manual del FLUENT 6.2, se presenta la siguiente ecuación para el modelado del fenómeno:

$$R_{erosión} = \sum_{p=1}^{N_{partículas}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{cara}} \quad (6)$$

Donde $R_{erosión}$ corresponde a la tasa de erosión medida en kilogramos de material removido por cada unidad de área por unidad de tiempo, el cual es la variable a determinar; \dot{m}_p es la flujo másico de partículas en la tubería, $C(d_p)$ es una función del diámetro de la partícula; α es el ángulo de la trayectoria de la partícula a impactar en la pared; $f(\alpha)$ es una función del ángulo de impacto α , v es la velocidad relativa de la partícula; $b(v)$ es una función de la velocidad relativa de la partícula, A_{cara} es el área de la cara de la celda en la pared. Por defecto $C=0$; $f=0$ y $b=0$, y estos son valores que van a depender del material a estudiar.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La arena escogida para el experimento es la arena sílice, las propiedades medidas fueron la densidad a través del método del picnómetro, cuyo valor fue de 2,42 g/cm³, y luego se midió la granulometría para encontrar un tamaño de grano promedio de 0,52 mm. Se realizaron mediciones en el banco de pruebas, con una duración de 14 horas y se hicieron mediciones del flujo volumétrico de agua el cual fue de 1,67 litros/s, el flujo másico de arena, que fue de 0,0089 kg/s y la masa de la reducción antes y después de la erosión, para encontrar la tasa de erosión experimental que fue de 11,90e-11 Kg/s, valor que se usará como referencia para la validación de la simulación numérica.

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Se desarrolló en el preprocesador la geometría a simular, una reducción de 1 a 1/2". En la figura 1 y 2 se muestran las medidas y la geometría final utilizada.

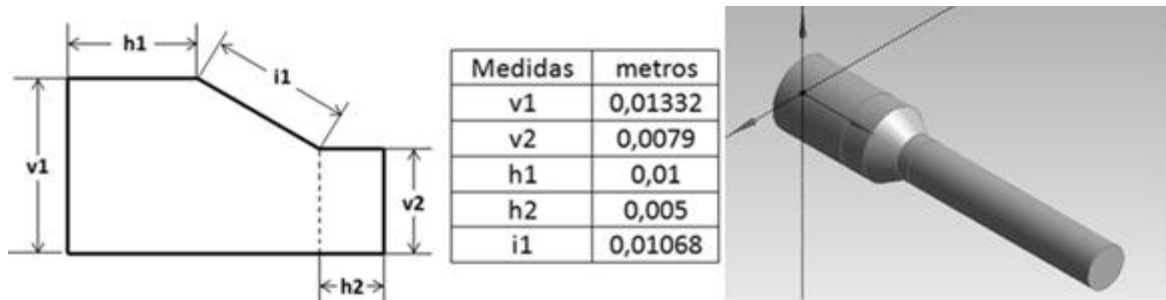


Figura 1: Medidas de la reducción y vista isométrica

Las condiciones de borde usadas en las simulaciones fueron las siguientes

- Fase continua: agua a condiciones ambientales (Presión=102,3 kPa y Temperatura= 25°C).
- Velocidad de entrada de la fase continua: 3 m/s.
- Fase discreta: partículas de arena.
- Velocidad de entrada de las partículas: 3 m/s.
- Flujo másico de arena: 0,0089 kg/s.

En la reducción se considera los parámetros de acuerdo al material usado para el cálculo de la tasa de erosión, los cuales son:

- Función de ángulo de impacto: constante con un valor de 1 (Edwards et al. [3])
- Función de diámetro: constante con un valor de $1,8e-9$ (Edwards et al.[3])
- Función de exponente de material: constante con un valor de 2,6 (Edwards et al.[3])
- Coeficientes de restitución de la fase discreta: se utiliza los coeficientes de restitución normal y tangencial del acero comercial, obtenidos por Forder et al.[4]
- Tipo de solución: de segundo orden.

Previo a las simulaciones finales se realiza un análisis de longitud de salida obteniendo como longitud óptima una salida con 15d. El mallado se realizó con elementos hexaédricos, se hizo un análisis de sensibilidad obteniendo como mallado óptimo uno con tamaño de elemento $5e-4m$ originando una malla de 723996 elementos mostrado en la figura 2. Por último se realiza un estudio con los distintos modelos de turbulencia con el fin de observar cual se adapta mejor a esta simulación en particular. En la tabla 1 se observa la comparación de los modelos con la tasa de erosión experimental y se concluye que el modelo de turbulencia que mejor se adapta es el k- ϵ RNG. En la figura 3 se puede observar el perfil de erosión donde se muestra la zona de mínima erosión en la entrada de la reducción y la zona de máxima erosión justo a la salida de la misma.

5. CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL DE LA REDUCCIÓN

La vida útil en la pieza se calculó asumiendo constantes y continuas las condiciones de erosión a la cual fue sometida la pieza. Se probará si la pieza falla por esfuerzo o por desgaste.

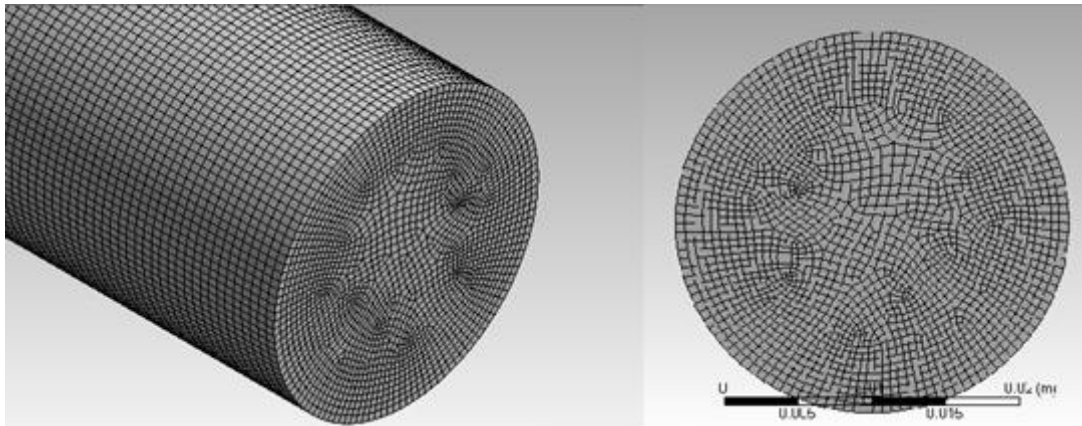


Figura 2: Mallado del dominio computacional

Tabla 1: Tasa de erosión promedio simulada en la reducción

Modelo de turbulencia	Tasa promedio de erosión (e-11 kg/s)	Error entre la tasa de erosión simulada y la experimental
k-ε estándar	9,543	19,80%
k-ε realizable	9,977	16,15%
k-ε RNG	10,02	14,28%
k-ω estándar	9,377	21,20%
k-ω SST	9,636	19,02%

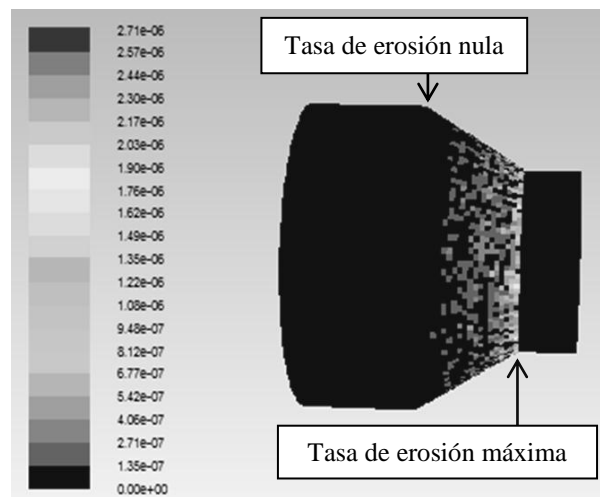


Figura 3: Distribución de la tasa de erosión a los largo de la reducción

Se realizarán simulaciones en estática de la pieza teniendo como carga la presión del fluido dentro de la reducción que se origina en el banco de pruebas, la cual fue de 880 kPa. Se tomará como referencia para simular el desgaste la distribución de la tasa de erosión, originando que el perfil vaya cambiando en el tiempo como se muestra en la figura 4. En la figura 5 se muestra la evolución en el tiempo del esfuerzo y la deformación, observando que no son suficientes para hacer fallar la pieza durante la pérdida de espesor. Se concluye que la misma falla por desgaste después de las 90000 horas.



Figura 4: Variación del perfil de la reducción en el tiempo por efectos de la erosión

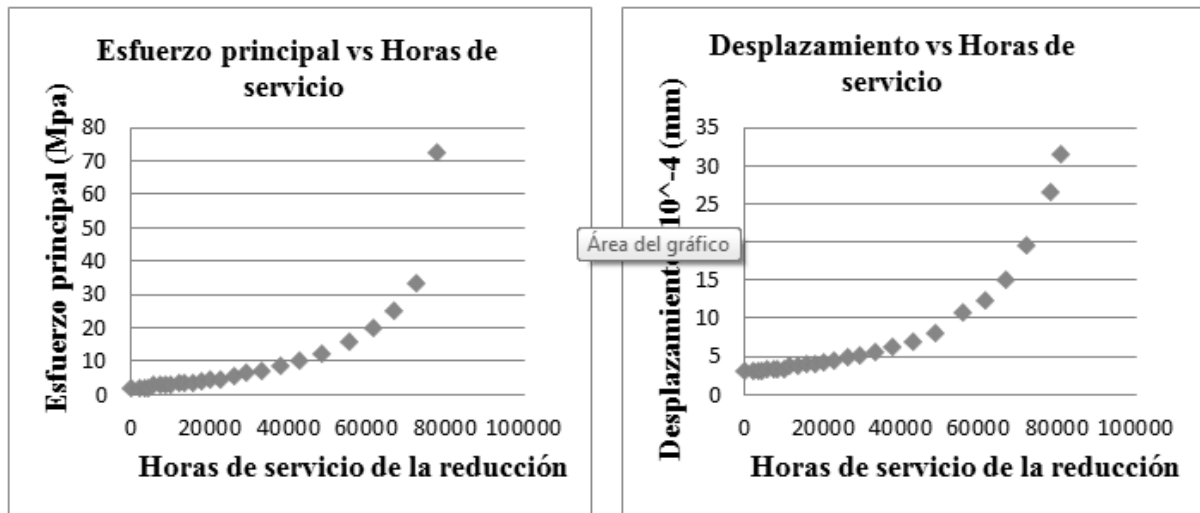


Figura 5: Variación del esfuerzo y la deformación vs las horas de servicio

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se utilizó las técnicas de simulación numérica aplicadas a la dinámica de fluidos computacional como una opción de mantenimiento predictivo en un accesorio de sistemas de transporte de fluidos como lo es una reducción. Se validaron las tasas de erosión obtenidas en las simulaciones con datos experimentales. Por último se utilizó un modelo de desgaste basado en los perfiles de erosión obtenidos de la simulación para determinar que el mecanismo de falla de la pieza es el desgaste total y no la falla por esfuerzo o deformación.

REFERENCIAS

- [1].Chen X, McLaury B, Shirazi S., Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees". *ELSEVIER, Computer & Fluids*, vol.33, pp. 1251-1272, 2004.
- [2]. Fluent (2005). "User's guide" versión 6.3 (Documento en línea). Consultado desde el 1 de Febrero del 2012 en:
<http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/node1.htm>
- [3].Edwards JK, McLaury BS, Shirazi SA. Supplementing a CFD code with erosion prediction capabilities. ASME Fluids Engineering Division Summer Conference, Paper FEDSM 98-5229, 1998.
- [4].Forder A, Thew M, Harrison D (1997). "A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves". *ELSEVIER, Wear*, vol. 216 pp. 184-193,1998.

ALGORITMOS DE MEMORIA EXTERNA: UNA APROXIMACIÓN CONCEPTUAL Y TAXONÓMICA DESDE LA VISUALIZACIÓN DE VOLÚMENES SÍSMICOS

José Canache

Jorge Castellanos

jcanache@uc.edu.ve

jcasteld@uc.edu.ve

Centro Multidisciplinario de Visualización y Computo Científico (CEMVICC), Facultad de Ciencias y Tecnología Universidad de Carabobo.

Av. Universidad, Bárbula, UC. Facultad de Ciencias y Tecnología. Naguanagua Edo. Carabobo, Venezuela

Resumen. *En la actualidad, la visualización constituye una herramienta eficaz para mostrar características, y su utilización como una fuente de información a través de la representación de volúmenes, se ha hecho muy importante y necesaria. Avances en tecnología computacional de uso en disciplinas como la interpretación sísmica han contribuido en estimular a la comunidad científica en la utilización de conjuntos de datos cada vez más grandes, ya sean adquiridos desde el mundo real, o generados sintéticamente. Sin embargo, a la vez que el tamaño del conjunto de datos crece, el costo de visualización se incrementa poniendo a prueba la capacidad de la plataforma computacional. En algunos casos, llega a ser inclusive superior al tamaño máximo de memoria interna instalada. En tales circunstancias, el ancho de banda I/O y la comunicación entre memoria interna y dispositivos externos más lentos (discos) constituyen un cuello de botella. No obstante, investigaciones recientes han demostrado que la utilización de un algoritmo de memoria externa ofrece mejor tiempo de respuesta con respecto al tradicional en este tipo de escenario. Este trabajo presenta una introducción conceptual, una revisión del estado actual del arte y una aproximación taxonómica de la utilización de algoritmos de memoria externa en la visualización de volúmenes sísmicos cuyo tamaño es superior al de la memoria interna. Su objetivo es lograr un mejor entendimiento de las diferentes direcciones en que la investigación en este campo de estudio ha alcanzado en la actualidad, para así facilitar, guiar y servir de referencia al especialista en la posterior selección e implementación.*

Palabras clave: Memoria externa, Visualización, Volumen sísmico

1. INTRODUCCIÓN

Los avances en tecnología computacional han contribuido en estimular a la utilización de volúmenes sísmicos que pueden llegar a ser muy grandes, a tal punto de superar el tamaño máximo de memoria interna instalada/instalable en nuestra plataforma computacional. Cuando esto ocurre, los tiempos de respuesta de la visualización pueden llegar a ser excesivamente altos, motivado a la latencia que se incrementa y, la posterior posibilidad de la disminución de la tasa de aciertos en caché, por las características espaciales del conjunto de datos. No obstante, la utilización de un algoritmo de memoria externa es una alternativa, al emplear técnicas para obtener los datos de manera rápida y eficiente. En el siguiente trabajo se presenta una introducción conceptual, una revisión del estado actual del arte y una aproximación taxonómica de la utilización de algoritmos de memoria externa en la visualización de volúmenes sísmicos cuyo tamaño es superior al de la memoria interna.

2. VOLUMENES SÍSMICOS

La exploración sísmica tridimensional es uno de los principales métodos de investigación geológica. Para ello, se realizan estudios sísmicos a gran escala, y los datos registrados se deben someter a un proceso iterativo para obtener así el modelo geológico. La información resultante se codifica en un volumen 3D compuesto de muestras discretas, cada una representando a la amplitud reflejada debajo de la superficie. A este volumen se le denomina volumen sísmico.

2.1 Conceptos Preliminares

Formalmente, Gallon et al. [1], define un volumen sísmico V de tamaño $N_x \times N_y \times N_z$ como una función

$$V : [1, N_x] \times [1, N_y] \times [1, N_z] \rightarrow \mathbb{R} \quad (1)$$

$$(x, y, z) \rightarrow V(x, y, z)$$

, donde $V(x, y, z)$ representa la amplitud sísmica en la posición (x, y, z) . Para un x, y dado, el conjunto de amplitudes en z es denominado traza sísmica.

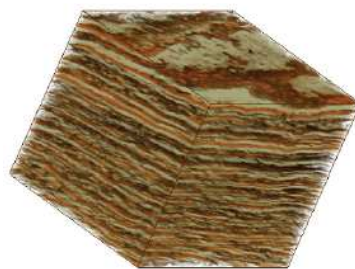


Figura 1- Volumen sísmico

Ahora bien, estos datos son, por lo general, almacenados en un formato especializado como el SEG-Y [2]. Por otra parte, dos tipos de estructuras, que se llaman horizontes y fallas, son particularmente relevantes para los geólogos, en la visualización de volúmenes sísmicos. Horizontes son los límites entre dos capas geológicas particulares que están formadas por

diferentes materiales. En términos de datos sísmicos, los horizontes se caracterizan por continuidades fuertes. Las fallas se componen principalmente de las fracturas en los horizontes que son las consecuencias del desplazamiento relativo de las rocas.

2.2 Técnicas de Visualización

La visualización de volúmenes es una herramienta valiosa para la vista previa, el análisis y la interpretación de los datos sísmicos. Para el intérprete, resulta realmente conveniente, su utilización a través de una aplicación software, que permita mostrar o describir las características estructurales del conjunto de datos tales como horizontes, fallas u otros atributos sísmicos.

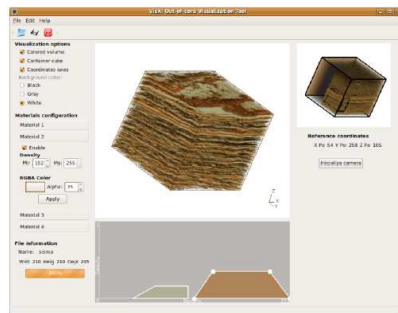


Figura 2 - Apariencia de una aplicación de visualización de volúmenes sísmicos

Ma C, Rokne J.[3] categoriza a las técnicas de visualización para volúmenes sísmicos en dos clases: visualización de volúmenes basada en mapeo (map-based volume visualization) y renderizado de volúmenes (volume rendering). La primera resulta de mapear individualmente a horizontes y fallas, y reinterpretarlas colectivamente en el espacio como a un modelo 3D. Las técnicas que pertenecen a esta categoría son: mapeo de texturas y extracción de isosuperficies. Por otra parte, en la última se asume que la reflectividad de la subsuperficie es un modelo 3D, en la cual, por naturaleza, consiste de unas características estructurales, de estratigrafía y amplitud, integradas en el espacio. En contraste, a la técnica anterior el volumen en sí mismo constituye el modelo, no imponiendo así el uso de alguna estructura geométrica, y resolviendo, una de las más importantes limitaciones de las técnicas de extracción de isosuperficies. Un ejemplo es el algoritmo Ray Casting [4]

3. ALGORITMOS DE MEMORIA EXTERNA

La mayoría de las arquitecturas de computadoras actuales utilizan jerarquías de niveles de memoria, donde cada nivel sirve como un caché para el siguiente. Estas jerarquías suelen tener dos características principales. En primer lugar, los niveles más bajos son más grandes en tamaño y se encuentran más lejos del procesador y, por lo tanto, tienen tiempos de acceso superiores. En segundo lugar, los datos se mueven en grandes bloques entre los diferentes niveles. Ahora bien, cuando el tamaño del volumen sísmico es superior al de la memoria principal instalada/instalable en nuestra plataforma computacional, la latencia se incrementa y, se convierte en un factor limitante para su visualización. Algunos investigadores han estudiado alternativas de solución, cómo incrementar la memoria física disponible o usar el mecanismo de memoria virtual de los sistemas operativos modernos. Incrementar la memoria física disponible es una solución costosa y poco viable, sobre todo cuando el volumen de los datos es muy grande, del orden de los

terabytes y está limitado por la capacidad de direccionamiento del procesador [5]. Por otra parte, usar el mecanismo de memoria virtual de los sistemas operativos modernos es ineficiente para las aplicaciones de visualización, si se emplean las políticas de paginado estándar, diseñadas para ser genéricas y no consistentes con el patrón de acceso a los datos en un dominio espacial [6][7]. No obstante, en estudios previos [1][8][9] se ha demostrado que la utilización de algoritmos que exhiben técnicas de memoria externa ofrece mejor tiempo de respuesta en este tipo de escenario. A estos algoritmos se les suele definir como algoritmo de memoria externa, algoritmo out-of-core o algoritmo I/O-efficient [10].

3.1 Taxonomía según la estrategia de búsqueda de los datos

Chisnall et al.[11], con influencia de la teorías clásicas de cache propuestas por Smith AJ. [12], identifica dos clases principales de algoritmos de manejo de datos en memoria externa, basado en la demanda (cuando los datos son requeridos) y basado en predicción (antes de ser requeridos). A éste último también se le conoce como algoritmo de pre-búsqueda, algoritmo de pre-almacenamiento en caché o algoritmo de anticipación. El algoritmo óptimo es aquel tal que siempre pre-busca el bloque de datos que se requiere en un futuro cercano, si no está en el núcleo y, cuando la caché está llena, siempre reemplaza el bloque de datos que no se requerirá durante el período más largo de tiempo. La primera condición se aplica sólo a los algoritmos basados en predicciones, mientras que la segunda condición se aplica a ambas clases. La eficacia de un algoritmo basado en predicciones depende parcialmente de su conocimiento de la lógica específica de la aplicación. Con respecto al reemplazo, un enfoque clásico y genérico, lo constituye LRU (Least Recently Used), un algoritmo de reemplazo de página, que toma en cuenta el historial de uso para considerar la sustitución. No sufre de la denominada anomalía de Belady, y proporciona una buena aproximación para el algoritmo óptimo sin el uso de pre-paginación. Existen otras alternativas más específicas como RDP (Ray Driven Predictor), APP (Access Path Predictor), HAP (History-based Access Predictor), Slimming Cache.

3.2 Organización de los Datos

Existen algoritmos de pre-búsqueda (prefetching) y almacenamiento en caché (caching) que tratan a cada archivo de datos como una secuencia unidimensional de elementos y su efectividad se basa en la suposición de que el archivo es probablemente para ser leído en orden secuencial. Sin embargo, en visualización, y motivado a la naturaleza espacial de los datos, estos son por lo general procesados más efectivamente al ser almacenados en un arreglo multidimensional, que luego debe ser mapeado al almacenamiento físico lineal de un archivo de disco. Sarawagi S, Stonebraker M. [13] presentan cuatro técnicas para mejorar la velocidad de acceso a los datos en arreglos multidimensionales: fragmentación (chunking), reordenamiento, redundancia y particionamiento.

La fragmentación consiste en descomponer un arreglo multidimensional en fragmentos (chunks) de la misma dimensión, que se almacenan y acceden juntos para minimizar el número de bloques recuperados (consultas a disco). Cada chunk debería ser del tamaño del bloque de almacenamiento. Un bloque es la unidad de transferencia utilizada por el sistema de archivos para el movimiento de datos hacia y desde el dispositivo de almacenamiento. La forma del chunk se elige con la intención de minimizar el promedio de las recuperaciones de bloques para un patrón de acceso dado.

El reordenamiento consiste en permutar las dimensiones del arreglo fragmentado con el objetivo de reducir la distancia de búsqueda promedio. La redundancia consiste en el almacenamiento de copias redundantes del arreglo organizadas con diferentes ordenamientos de ejes para almacenar fragmentos y optimizar con diferentes patrones de acceso. Por último, el particionamiento consiste en la asignación de un arreglo a platos de un dispositivo de memoria terciario con la finalidad de minimizar el número de cambios de plato en lugar del número de recuperaciones de página. El tamaño del chunk se hace igual al del plato en lugar de un bloque de disco.

3.3 Reducción de Complejidad

Dietrich et al. [14] categoriza en simplificación geométrica, nivel de detalle (LOD) y eliminación selectiva. La simplificación geométrica se enfoca en generar una aproximación del modelo original con un número reducido de primitivas. El modelo LOD es una descripción compacta de múltiples representaciones de una sola capa para lograr adaptividad en tiempo de ejecución. Por último, la eliminación selectiva, se enfoca en determinar partes posiblemente visibles y partes definitivamente invisibles tomando como base que sólo una fracción de geometría del volumen es visible en un instante de tiempo.

3.4 Cooperación GPU-CPU

Si el tamaño del volumen sísmico es superior al de la memoria principal del sistema, es muy probable, que también lo sea con respecto a la memoria de textura de la GPU. Esta técnica consiste en la gestión por parte del algoritmo de atributos y propiedades en la comunicación GPU-CPU para reducir la latencia.

3.5 Revisión de la Literatura

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de algunos trabajos seleccionados por su relevancia y vigencia, con respecto a las técnicas de de memoria externa y visualización:

Tabla 1. Cuadro comparativo de publicaciones del área

	[1]	[8]	[9]	[15]	[16]
Técnica de Visualización		Volume Rendering	Volume Rendering	Volume Rendering	Volume Rendering
Búsqueda de Datos	Predicción	Predicción	Demanda	Predicción	
Reemplazo de Página	Slimming Cache	LRU	LRU		
Organización de los Datos		Chunking			
Reducción de Complejidad				LOD	
Cooperación GPU-CPU		Si	Si	Si	Si

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una introducción conceptual, una revisión del estado actual del arte y una aproximación taxonómica de la utilización de algoritmos de memoria externa en la visualización de volúmenes sísmicos cuyo tamaño es superior al de la memoria interna. El documento realizado permitirá facilitar y guiar al especialista (intérprete sísmico, geólogo, ingeniero, programador, investigador) con interés en esta área de conocimiento.

REFERENCIAS

- [1].Gallon J, Guillon S, Jobard B, Barucq H, Keskes N. Slimming Brick Cache Strategies for Seismic Horizon Propagation Algorithms. *IEEE/EG International Symposium on Volume Graphics*. pp. 37–44, 2010.
- [2].SEG Technical Standards Committee. *SEG Y rev 1 Data Exchange Format*. Norris MW, Faichney AK, editors. Society of Exploration Geophysicist; 2002.
- [3].Ma C, Rokne J. 3D seismic volume visualization. *Integrated image and graphics technologies*. pp.241–62, 2004.
- [4].Qifeng S, Youkai S. Study Of 3-D Seismic Volume Visualization With Ray Casting. *3rd International Conference on Communication Software and Networks*. pp. 285–287,2011.
- [5].Castellanos, J. *Soporte de memoria out-of-core para biblioteca de solución de sistemas dispersos*. PhD thesis, Universidad de Carabobo, 2012.
- [6].Brown AD, Mowry TC, Krieger O. Compiler-Based I / O Prefetching for Out-of-Core Applications. *ACM Transactions on Computer Systems*, vol. 19, n. 2, pp. 111–170, 2001.
- [7].Cox M, Ellsworth D. Application-Controlled Demand Paging for Out-of-Core Visualization. *Proceedings of the 8th conference on Visualization'97*. IEEE Computer Society Press; 1997.
- [8].Valencia F, Rodríguez J, Castellanos J, Larrazábal G. Out-of-core Visualization for 3D Large Seismic Datasets. *Proceedings of Latinoamerican Conference of High Performance Computing*. 2010.
- [9].Castanie L, Bruno L, Bosquet F. VolumeExplorer: Roaming Large Volumes to Couple Visualization and Data Processing for Oil and Gas Exploration. *Visualization*, pp. 247-254, 2005.
- [10].Vitter S. *Algorithms and Data Structures for External Memory*. Berlin, Heidelberg: now Publishers Inc., 2008.
- [11].Chisnall D, Chen M, Hansen C. Knowledge-Based Out-of-Core Algorithms for Data Management in Visualization. *Proceedings of the Eighth Joint Eurographics/IEEE VGTC conference on Visualization*. Eurographics Association, 2006.
- [12].Smith AJ. Cache Memories. *ACM Computing Surveys*, vol. 14, n. 3, pp. 473–530, 1982.
- [13].Sarawagi S, Stonebraker M. Efficient organization of large multidimensional arrays. *Data Engineering, 1994. Proceedings. 10th International Conference*. IEEE; 1994.
- [14].Dietrich A, Gobbetti E, Yoon S. Massive-Model Rendering Techniques. *Computer Graphics and Applications*, pp. 20–34, 2007.
- [15].Xie K, Yu W, Yu H, Wu P, Li T, Peng M. GPU-Based Multi-resolution Volume Rendering for Large Seismic Data. *International Conference on Intelligence Science and Information Engineering*. IEEE; 2011.
- [16].Chen C-K, Ho C, Correa C, Ma K-L, Elgamal A. Visualizing 3D Earthquake Simulation Data. *Computing in Science & Engineering*, vol. 13, n. 6, pp. 52–63, 2011.

RESOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA ECUACIÓN DE CONVECCIÓN DIFUSIÓN USANDO VOLÚMENES FINITOS Y MALLAS NO ORTOGONALES DE CUADRILÁTEROS EN YACIMIENTOS DE ESTRUCTURA COMPLEJA

Giselle G. Sosa J.

Oswaldo J. Jiménez P.

Saúl E. Buitrago B.

giselle1701@gmail.com

oswjimenez@usb.ve

sssbuitrago@gmail.com

Dpto. Cómputo Científico y Estadística, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

Resumen. *La simulación numérica de yacimientos petrolíferos es una herramienta indispensable y ampliamente aceptada en la industria petrolera, debido a que mediante modelos matemáticos y numéricos es posible simular el flujo de los fluidos presentes en el yacimiento, permitiendo así diseñar estrategias de explotación eficientes. En una serie de trabajos previos a éste, se desarrolló un generador de mallas no rectangulares, formadas únicamente por cuadriláteros y que respetan las estructuras internas de un yacimiento, dadas éstas como un conjunto de líneas poligonales. Tomando estas mallas como la discretización del yacimiento, se planteó resolver la ecuación de convección difusión bidimensional tanto en estado estacionario como en estado transitorio, tomando en cuenta diferentes configuraciones físicas del medio poroso. A fin de aprovechar la buena representación del dominio a través de estas mallas, se utilizó el método de los volúmenes finitos, el cual es conservativo y facilita el tratamiento de las condiciones de borde. En este método se integra la ecuación de convección difusión sobre cada cuadrilátero (volumen de control) de la malla, obteniéndose así la forma integral de dicha ecuación. Después de aproximar las integrales involucradas y tomar en cuenta las condiciones de borde, resulta una ecuación discreta en cada volumen de control. Finalmente, se obtiene un sistema lineal sparse de gran dimensión y, generalmente, no simétrico y mal condicionado, el cual puede ser resuelto mediante métodos iterativos como GMRES con preconditionamiento LU incompleto. Las condiciones de borde consideradas son de tipo Dirichlet y Neumann, tanto en estacionario como transitorio. En el caso de este último, se avanza en el tiempo, a partir de la solución obtenida en el estado estacionario, usando un esquema implícito. La velocidad del fluido se considera moderada (número de Peclet bajo) en todos*

las configuraciones estudiadas. Se consideraron diferentes escenarios variando las condiciones de borde, término fuente, constante de difusión y velocidad del fluido, tanto en régimen estacionario como transitorio. Los resultados obtenidos concuerdan con la interpretación física de cada configuración.

Palabras clave: volúmenes finitos, convección difusión, mallas no ortogonales de cuadriláteros, yacimientos de estructura compleja.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente se ha aplicado el método de diferencias finitas para resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales parciales que rigen el flujo de fluidos en el medio poroso que es el yacimiento, tanto por su fácil implementación computacional como por su eficiencia de ejecución. Sin embargo, dicho método se aplica únicamente sobre mallas rectangulares que discretizan el yacimiento, las cuales no respetan las estructuras internas complejas de éste (canales preferenciales de flujo, zonas de alto contraste de permeabilidad, sistemas de fallas, cambios de tipo de sedimentos, etc.). Esta resolución requiere del uso de mallas que se ajusten a las estructuras internas presentes en el yacimiento petrolífero, lo cual debe permitir predecir con mayor precisión la producción de petróleo en el yacimiento. En este trabajo se considerarán mallas de cuadriláteros no rectangulares que tienen las características antes mencionadas. Las mismas fueron generadas en trabajos previos, resolviendo, mediante diferencias finitas, un sistema diferencial parcial elíptico de gran dimensión [1, 2, 3, 4]. Debido a las estructuras internas complejas del yacimiento y a que las condiciones de borde necesarias para resolver las ecuaciones diferenciales del flujo de fluido no son bien ni fácilmente representadas en diferencias finitas, es conveniente utilizar métodos numéricos que permitan explotar el uso de las mallas de cuadriláteros antes mencionadas. Tal es el caso del método de los volúmenes finitos que será utilizado en este trabajo. Además de aprovechar las mallas de cuadriláteros utilizadas aquí, este método presenta ventajas desde el punto de vista de simulación, tales como el carácter conservativo de su formulación general y la adecuada representación de las condiciones de borde.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada una malla de cuadriláteros no rectangulares ajustada a un conjunto de líneas internas de un dominio rectangular, se plantea el método de los volúmenes finitos [5, 6, 7] para resolver la ecuación convección difusión en dicho dominio, considerando diferentes condiciones de borde. La velocidad del fluido se considerará suficientemente baja, lo cual permite incorporar el término convectivo como parte del término fuente de la ecuación diferencial. Por lo tanto, la ecuación diferencial a ser resuelta puede considerarse básicamente difusiva.

La ecuación de convección difusión se escribe de manera general como

$$\overline{\frac{\partial \phi}{\partial t}} = \nabla \cdot (k \nabla \phi(\vec{r}, t)) - \vec{v} \cdot \nabla \phi + f \quad (1)$$

donde t representa el tiempo, \vec{r} el vector posición, k es el coeficiente de difusión, \vec{v} es la velocidad del fluido y f es el término fuente. Tomando en consideración que la velocidad es suficientemente baja, la ecuación anterior puede simplificarse a

$$\overline{\frac{\partial \phi}{\partial t}} = \nabla \cdot (k \nabla \phi(\vec{r}, t)) + f \quad (2)$$

En este trabajo se resuelve numéricamente la ecuación de difusión en dos dimensiones con k constante, en un dominio rectangular $\Omega \in \mathbb{R}^2$ discretizado mediante mallas de cuadriláteros no rectangulares. Las condiciones de frontera se consideraron de tipo Dirichlet o Neumann para cada borde del dominio. En este caso, la ecuación (2) se transforma en (3).

$$\begin{cases} -k \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \phi}{\partial t} = f & \text{si } (x, y) \notin \partial\Omega \\ \phi(x, y) \text{ ó } \frac{\partial \phi}{\partial n} = h(x, y) & \text{si } (x, y) \in \partial\Omega \end{cases} \quad (3)$$

donde el término fuente f depende de x e y , y $\partial\Omega$ denota la frontera de Ω .

3. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para resolver la ecuación (3) se usará el Método de Volúmenes Finitos (MVF), en el cual se trabaja la ecuación diferencial en su forma integral. Se considerará separadamente los estados estacionario y transitorio.

Estado estacionario. La ecuación de difusión en estado estacionario corresponde a la ecuación (3) excluyendo el término dependiente del tiempo.

Se considera un Volumen de Control (VC) definido por los puntos A, B, C , y D (Fig.1) y cuyo punto de malla asociado es el i, j y se integra la ecuación sobre el VC

$$-\int \int_{ABCD} k \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) dA = \int \int_{ABCD} f dA \quad (4)$$

Aplicando el teorema de Green en el lado izquierdo de (4), se transforma la integral de área a la integral de línea (5)

$$-k \oint_{ABCD} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} dy - \frac{\partial \phi}{\partial y} dx \right) = \overline{f_{i,j}} S \quad (5)$$

donde $\overline{f_{i,j}}$ es el valor promedio de f sobre el VC y S es el área de dicho VC. Ahora se aproximan las integrales sobre los segmentos AB, BC, CD , y DA obteniendo la ecuación (6).

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_{i,j-\frac{1}{2}} \Delta y_{AB} - \left[\frac{\partial \phi}{\partial y} \right]_{i,j-\frac{1}{2}} \Delta x_{AB} + \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_{i+\frac{1}{2},j} \Delta y_{BC} - \left[\frac{\partial \phi}{\partial y} \right]_{i+\frac{1}{2},j} \Delta x_{BC} + \\ & \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_{i,j+\frac{1}{2}} \Delta y_{CD} - \left[\frac{\partial \phi}{\partial y} \right]_{i,j+\frac{1}{2}} \Delta x_{CD} + \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_{i-\frac{1}{2},j} \Delta y_{DA} - \left[\frac{\partial \phi}{\partial y} \right]_{i-\frac{1}{2},j} \Delta x_{DA} = -\frac{\overline{f_{i,j}}}{k} S \end{aligned} \quad (6)$$

Para evaluar los valores de las derivadas parciales, se usará el valor promedio sobre el área formada por los puntos de malla alrededor del punto de evaluación de la derivada parcial. Al calcular las áreas resultantes y sustituyendo en la ecuación (6), se obtiene la ecuación discreta final (7)

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4}(N_{DA} - N_{AB})\phi_{i-1,j-1} + \left(M_{AB} - \frac{N_{BC}}{4} + \frac{N_{DA}}{4} \right) \phi_{i,j-1} + \frac{1}{4}(N_{AB} - N_{BC})\phi_{i+1,j-1} + \\ & \left(M_{DA} + \frac{N_{CD}}{4} - \frac{N_{AB}}{4} \right) \phi_{i-1,j} - (M_{AB} + M_{BC} + M_{CD} + M_{DA})\phi_{i,j} + \left(\frac{N_{AB}}{4} + M_{BC} - \frac{N_{CD}}{4} \right) \phi_{i+1,j} + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{4}(N_{CD} - N_{DA})\phi_{i-1,j+1} + \left(\frac{N_{BC}}{4} + M_{CD} - \frac{N_{DA}}{4}\right)\phi_{i,j+1} + \frac{1}{4}(N_{BC} - N_{CD})\phi_{i+1,j+1} = -\frac{\overline{f_{i,j}}}{k}S \quad (7)$$

donde los coeficientes M_{AB} , N_{AB} , M_{BC} , N_{BC} , M_{CD} , N_{CD} , M_{DA} y N_{DA} son constantes y dependen de las dimensiones de cada VC.

Condiciones de frontera. Nótese que para valores extremos de i, j en la ecuación (7), se tienen valores de ϕ fuera del dominio, en los cuales se deben aplicar las condiciones de frontera. La metodología empleada dependerá de la condición del borde que se considere (Dirichlet o Neumann). Para el caso de las condiciones de Dirichlet, los cuadriláteros que se encuentren adyacentes a la frontera correspondiente serán modificados de manera tal que el nodo que se encontraba fuera del dominio, ahora se encuentre en la frontera, como se muestra en la Fig.2.

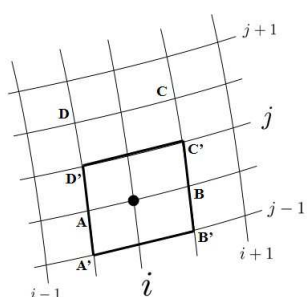


Figura 1: Aproximaciones en $i, j - \frac{1}{2}$

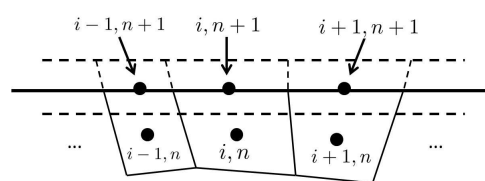


Figura 2: Condiciones de frontera Dirichlet

Para el caso de condición de Neumann, nótese que como el dominio es rectangular, el vector normal a la frontera será el vector \vec{x} o el vector \vec{y} , dependiendo de la frontera. Además, en la ecuación (6), las derivadas parciales se encuentran evaluadas en las paredes del VC, así que el valor h dado por $\frac{\partial\phi}{\partial x} = h$ ó $\frac{\partial\phi}{\partial y} = h$, se sustituye en el término correspondiente en dicha ecuación. Por ejemplo, si la condición de frontera es $\frac{\partial\phi}{\partial n} = h$ en el borde derecho, sustituimos $\frac{\partial\phi}{\partial x_{i+1/2,j}} = h$ en la ecuación (6) para todos los cuadriláteros adyacentes al borde derecho del dominio.

Estado transitorio. Integrando la ecuación (3) sobre el VC se tiene la ecuación (8)

$$\frac{1}{k} \iint_{ABCD} \frac{\partial\phi}{\partial t} dA = \iint_{ABCD} \left(\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} \right) + \frac{f}{k} \right) dA \quad (8)$$

La integral del lado derecho en (8) ha sido calculada en el estado estacionario (ecuación (7)). Todo este cálculo será denotado como ψ . Ahora se integra respecto al tiempo de t_0 a t_1 obteniéndose

$$\frac{1}{k} \iint_{ABCD} \int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial\phi}{\partial t} dt dA = \int_{t_0}^{t_1} \psi dt \Rightarrow \frac{1}{k} \iint_{ABCD} (\phi^1 - \phi^0) dA = \int_{t_0}^{t_1} \psi dt \quad (9)$$

La aproximación de la integral del lado izquierdo de (9) se considerará como el valor de la función $\phi^1 - \phi^0$ en el centro del cuadrilátero multiplicado por el área del mismo. Para la integral del lado derecho de (9) se tomará una combinación convexa, obteniendo la ecuación (10).

$$(\phi_{i,j}^1 - \phi_{i,j}^0) \frac{S}{k} = (w\psi^1 + (1-w)\psi^0)\Delta t \quad \text{con } 0 \leq w \leq 1 \quad (10)$$

Para un método implícito, se toma $w = 1$ en (10) y se obtiene la ecuación $\phi_{i,j}^1 - \frac{k\Delta t}{S}\psi^1 = \phi_{i,j}^0$ en la cual, para calcular ϕ en t_1 , a partir de la solución en un tiempo anterior t_0 , se debe resolver un sistema de ecuaciones lineales resultante de variar i, j . Este sistema será resuelto usando GMRES con preconditionamiento dado que el mismo es *sparse* no simétrico y de gran dimensión.

4. RESULTADOS

Para el primer caso se toma $k = 200$ en R2, $k = 1$ en R1. Las condiciones de frontera consideradas son de Dirichlet con valor 0 en todos los bordes. A partir de la primera iteración se tienen dos fuentes $f = 300$ en los pozos P1 y P2. Se realizan 100 iteraciones con un paso de tiempo $\Delta t = 10^{-3}$. El resultado obtenido se muestra en la Fig.3.

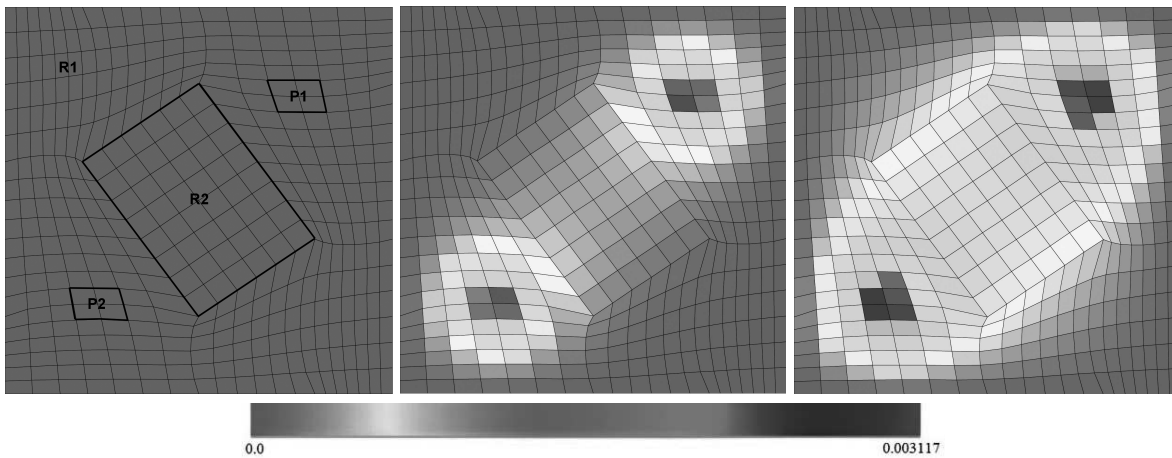


Figura 3: Resultado 1. De izquierda a derecha, t_0 (inicial), t_{20} y t_{100} (final).

Para el segundo caso se toma $k = 200$ en el canal, $k = 5$ en los pozos P1 y P2, y $k = 1$ en R1. Las condiciones de frontera consideradas son de tipo Dirichlet con valor 0 en los bordes superior e inferior, 0.2 en los bordes derecho e izquierdo, excepto en los correspondientes al canal donde se tomó valor igual a 2. A partir de la primera iteración se tienen dos fuentes $f = 50$ en los pozos P1 y P2. El resultado obtenido se muestra en la Fig.4.

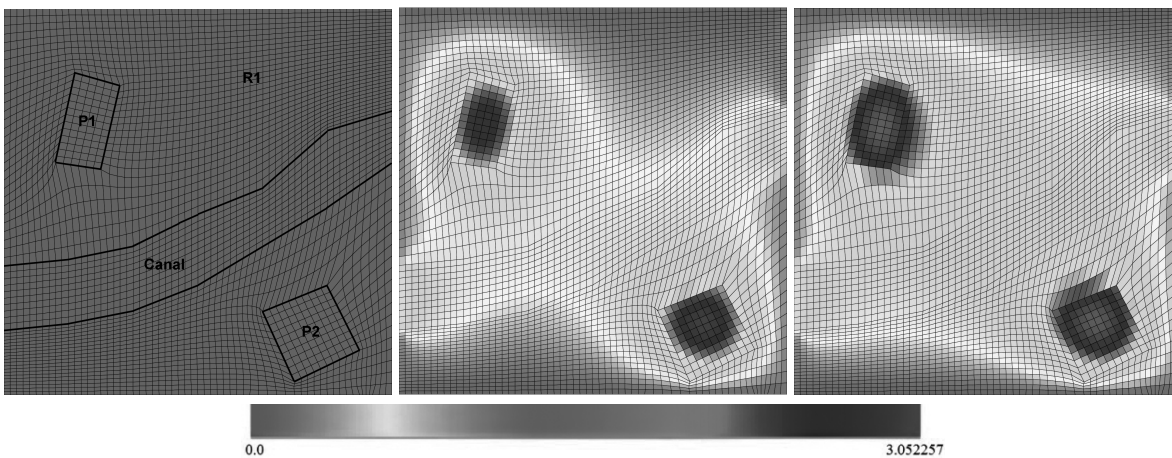


Figura 4: Resultado 2. De izquierda a derecha, t_0 (inicial), t_{15} y t_{100} (final).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se desarrolló un modelo numérico basado en el Método de Volúmenes Finitos (MVF) para la resolución de la ecuación de difusión en dos dimensiones. Este modelo se implementó en lenguaje C. Los dominios fueron discretizados mediante mallas de cuadriláteros no rectangulares adaptadas a fronteras internas del yacimiento. El MVF es el más adecuado en este tipo de simulación de flujo de fluidos en yacimientos petroleros, debido a que se adapta mejor a mallas no rectangulares, además de la propiedad conservativa inherente al método.

Se probaron diferentes configuraciones sobre un yacimiento rectangular, variando la permeabilidad, término fuente para simular pozos petroleros y condiciones de borde. En particular, se simuló una estructura que contenía un canal preferencial de flujo y dos pozos productores. En todos los casos los resultados obtenidos corresponden con la intuición física de las configuraciones establecidas. En desarrollos futuros se prevé hacer un tratamiento más efectivo del término de convección de la ecuación de flujo. Así mismo es necesario tomar en cuenta más configuraciones que involucren condiciones de borde de flujo impuesto.

Referencias

- [1] J.M. Hyman, S. Li, P. Knupp y M. Shashkov, An Algorithm for Aligning a Quadrilateral Grid with Internal Boundaries *Journal of Computational Physics*. Vol. 631, pp 133-149, 2002.
- [2] A. Alvarez, O. Jiménez, S. Buitrago, *Generación de mallas 2D conformes no estructuradas de cuadriláteros, para dominios con fronteras internas*. Memorias de las VII Jornadas de Aplicaciones Matemáticas, mayo 2008.
- [3] M. Borregales, O. Jiménez, S. Buitrago, *Generación de mallas de cuadriláteros para yacimientos bidimensionales con fronteras internas complejas*. ISBN: 978-980-12-4063-1, Memorias de las VIII Jornadas de Aplicaciones Matemáticas, 2009.
- [4] J. Valido, O. Jiménez, S. Buitrago, *Uso de métodos tipo gradiente espectral para generar mallas 2D de cuadriláteros alineadas a fronteras internas complejas de yacimientos petrolíferos*. Proceeding of the XI International Congress of Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences, CIMENICS 2012. pp. MM55-MM60, 2012.
- [5] G. Sosa, O. Jiménez, S. Buitrago, *Resolución numérica de la ecuación de difusión usando volúmenes finitos y mallas no ortogonales de cuadriláteros en yacimientos de estructura compleja*. Memorias de las X Jornadas de Aplicaciones Matemáticas, 2013.
- [6] Eymard, R., Gallouet, T., Herbin, R., *Finite Volume Methods*. P.G. Ciarlet, J.L. Lions eds, 2006.
- [7] Leveque, R., *Finite volume methods for hyperbolic problems*. Cambridge University Press, 2002.

PHASE TRANSITIONS IN A VERTICALLY VIBRATED GRANULAR MONOLAYER

Ruddy Urbina

Angélica Goncalves

Iván Sánchez

reus75@gmail.com

ijsanche@ivic.gob.ve

Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Caracas 1020-A,
Venezuela

Abstract. *A granular monolayer under vertical vibrations may display (depending of the vibration amplitude and frequency) a “gas-like” behavior, where particle interact via inelastic collisions; a “solid-like behavior” where the spatial structure of particle positions remains invariant; and even display “gas-like” “solid-like” phase coexistence. In the present work we use a loudspeaker, an amplifier and a function generator to excite a granular medium of ≈ 1 mm diameter spheres in a controlled way. The monodispersed granular material is held within a rigid container, and we focus on studying the phase transitions observed when the amplitude of oscillation is progressively increased, at fixed frequency. The gasified state triggers due to spontaneous fluctuations of the position of a couple spheres which start colliding with their neighbors, which themselves start wandering around the container, agitating the rest of the particles and thus generating the “gas-like” phase. In our experiments, we compare two systems with containers of different sizes (maintaining the ratio between space occupied by the particles and available space within the container, known as the filling fraction ϕ) and we observe that the larger system tends to gasify at lower vibrations amplitudes, a result that is almost independent of ϕ . Besides we show that the solid-gas transition is affected by the grain type.*

Keywords: granular medium, monolayer, vibration, phase transition

1. INTRODUCTION

Among the wide set of experimental configurations used to test the behavior of disordered materials, the case of a single layer of spheres, vertically vibrated with a sinusoidal excitation, may seem trivial at first. Despite its apparent simplicity a vibrated monolayer displays rich phenomenology, and efforts to understand these phenomena, may help understand other out-of-equilibrium systems. The most significant feature of a vibrated monolayer is the observation of different phases, depending on the intensity of the vertical excitation. The excitation is typically sinusoidal, and its intensity is usually characterized by the maximum dimensionless acceleration

$\Gamma = a(2\pi f)^2/g$ with a the amplitude of oscillation, f the frequency and g the acceleration of gravity. At large enough Γ there is a “gas-like” phase where particle positions and velocities are stochastic, with particles covering all available space within the container. At lower Γ a “solid-like” phase is observed, where particles do not move in a plane normal to the direction of oscillation, but keep on moving with the container in the direction of oscillation.

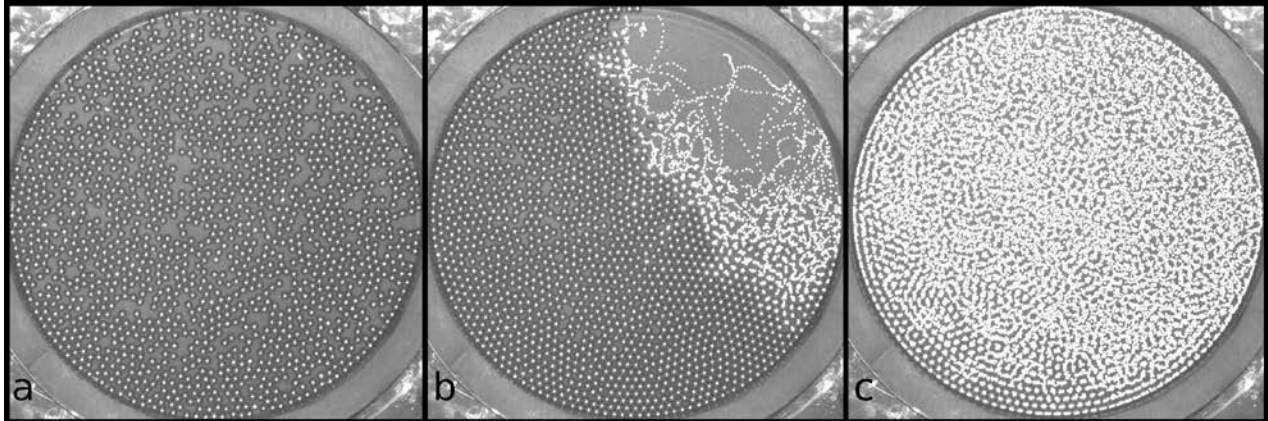


Figure 1- Different phases observed in a vibrated monolayer at 100 Hz. Each image is the result of a digital superposition of 20 snapshots, taken from the top during a 1 s interval: a) solid phase at $\Gamma=0,95$; b) solid-gas coexistence at $\Gamma=1,05$; c) gas phase at $\Gamma=1,3$.

The work by Olafsen and Urbach [1], was the first one to report the development of different phases in granular monolayers. They characterized different phases both qualitatively and quantitatively, using speed distributions and the pair correlation function). Nie et al. [2], using computer simulations, confirmed the occurrence of the different phases described by Olafsen and Urbach. Additionally, Nie et al. gave information about particle motion along the axis of oscillation that could not be obtained from experiments and introduced the granular temperature as another parameter capable to detect a phase change on the system. The works in references [1], [2] consider only the “cooling” of the system (reducing the oscillation amplitude) and focused on the steady state of each phase, without discussing the dynamics of the phase transition.

Losert et al. [3] were the first to study the “heating” of the system focusing on the transition to a gasified phase, monitoring the propagation of a wave front spreading the gas phase through the container. They studied both the spontaneous and induced evolution of the gasification, which allowed them to detect more easily the conditions required to observe the phase transition. Pacheco et al. [4] also studied the evolution of the system from a “solid-like” to a “gas-like” state, but thanks to their confined container, they were able to obtain metastable crystals even for values of Γ considerably larger than 1. Their most important contribution lies in the fact that they related the metastability of the system with the energy dissipation through inelastic collisions.

The work of Prevost et al. [5] proves that phase coexistence shown by these systems is in fact out of equilibrium. They measured both the granular temperature and the pressure of the different phases and showed that they were different. The works of Melby et al. [6] and Vega Reyes and Urbach [7], studied how variations of the vertical confinement and particle elastic properties may severely affect the development of different phases. The effect of the number of particles on the dynamics of the monolayer was addressed by Reis et al. [8], [9] who focused on studying the effects of the volume constriction when most of the container is filled with particles both on the configuration structure of the monolayer and the motion of individual particles.

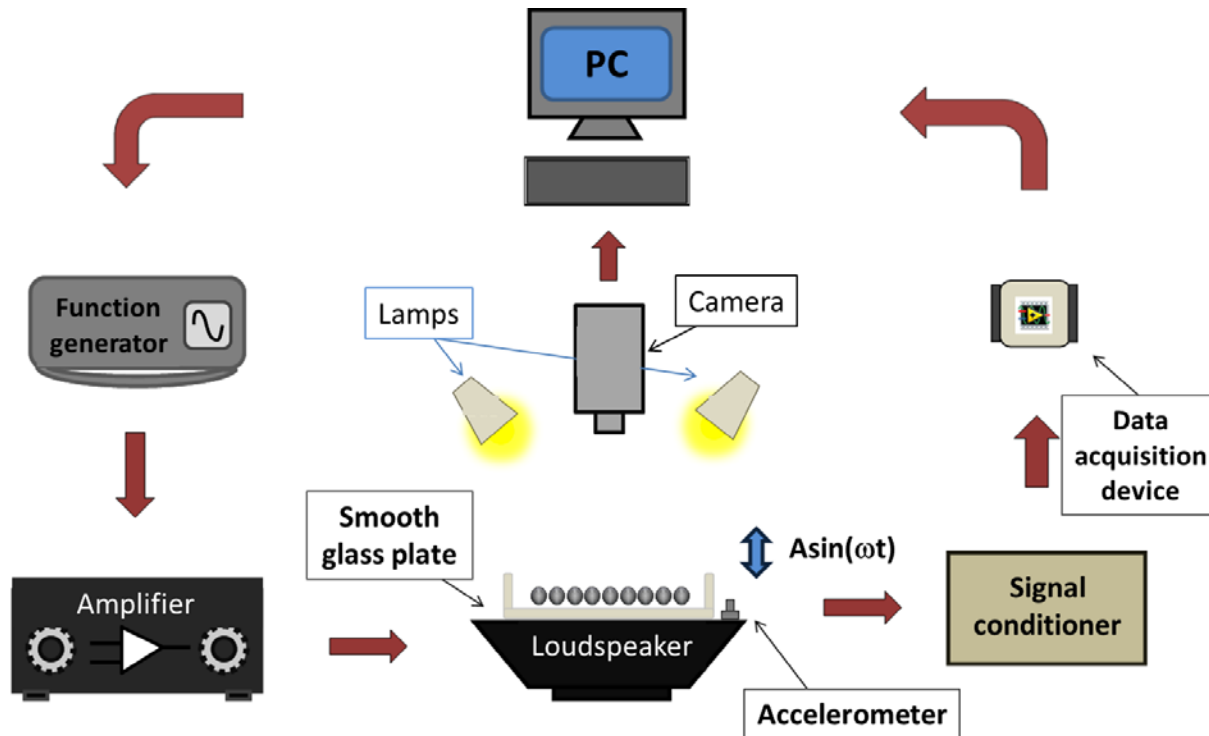


Figure 2- Diagram of the experimental setup.

In the present work we focus on studying the transition from a “solid-like” to a “gas-like” state, observed during controlled heating of the system, achieved by incrementing the amplitude of oscillation at constant frequency. The transition takes place at a given critical acceleration Γ_c . We study the dependence of Γ_c on the filling fraction ϕ , and explore the effects of changing container size and grain type. We also take a close look at the initial development of the gaseous phase, and study a “floating mass” effect observed when the gaseous phase develops.

2. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental setup is shown in fig. 2. To vibrate the monolayer an Agilent 33220A function generator produces a sinusoidal signal of controlled amplitude and frequency. The signal is amplified with a Crown XLS602 amplifier and fed to a 10” Kicker loudspeaker over which membrane the container with the monolayer was placed. The loudspeaker lies over a heavy box, lying itself on an aluminum plate with three aligning screws. A bubble level centered on the container was used to align the system at rest. A PCB 353B 34 piezoelectric accelerometer measures the maximum dimensionless acceleration Γ . The acceleration signal is processed with a PCB 482A16 signal conditioner before being acquired by a NI 6009-USB acquisition device. The plate is illuminated from the top with four lamps that create a homogeneous reflection on the surface of each sphere. A PixeLink PL-B741F camera, positioned over the plate, captures photographs that allow us to recognize the state of the monolayer at given values of Γ . Digital 8 bit greyscale images were used. Groups of individual snapshots were digitally composed, obtaining a resulting image where each pixel has a greyscale value corresponding to the

maximum (whiter) value of that particular pixel over the group of images. Image processing was done using the public domain ImageJ software.

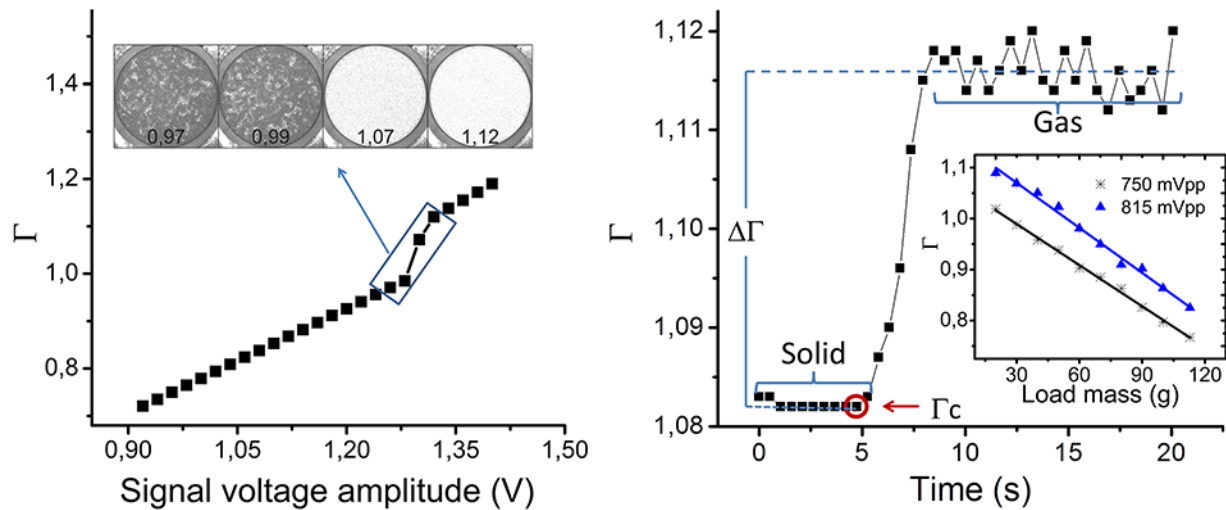


Figure 3- The critical acceleration Γ_c is found combining two approaches: a coarse search with 10% (left) resolution and a refined search with 0.1% resolution (right). See text for details. Inset (right): linear relation between Γ and the load mass on the loudspeaker.

The granular system consists of a certain number of spheres placed over a smooth flat glass plate. On the plate there was fixed a Plexiglas ring that became the wall of a cylindrical container of 2 cm height. We used low amplitudes in order to maintain a monolayer condition, larger amplitudes allowed spheres to jump high enough to pass over the others and loose the monolayer condition. Two kinds of spheres were used: stainless steel 316 beads (non-magnetic), diameter $(2,38 \pm 0,05)$ mm, elastic restitution coefficient for collisions with the plate $0,85 \pm 0,03$ and for interparticle collisions $0,95 \pm 0,03$, density $(8,3 \pm 0,1)$ gr/cc and soda lime glass spheres, $(3,0 \pm 0,2)$ mm diameter, elastic restitution coefficient for collisions with the plate $0,93 \pm 0,05$ and for interparticle collisions $0,97 \pm 0,02$, density $(2,5 \pm 0,1)$ gr/cc. Restitution coefficients for particle-plate collisions were measured using high speed photography and computer aided particle tracking, for particle-particle collisions, the values are those reported in reference [10].

Experiments were performed with a fixed frequency of 50 Hz. This particular frequency was chosen because it offered the best conditions of uniformity of the plate oscillation, and showed no coexistence between the “solid-like” and the “gas-like” phase. The value of Γ_c was found combining two techniques. A coarse method consisted of monitoring the value of Γ while increasing the voltage of the function generator. If Γ is plotted as a function of the voltage amplitude, a linear behavior is observed (Fig 3 left). This linear behavior is interrupted by a kink that occurs when the gaseous phase develops. The association of the kink with the formation of the gaseous phase can be easily confirmed by looking at the composed photographs (gaseous phases produce a predominantly white composed image) and by listening to the experiment (in the gaseous phase, the bouncing of the grains produces a sound resembling the sound of a rattlesnake). A refined search was made around the coarse value initially determined, changing the voltage amplitude in fine steps and studying the temporal behavior of Γ (Fig 3 right) with the voltage fixed. When the monolayer is in a “solid-like” state, the plot is flat. When the gaseous

phase develops, the plot shows a sharp increase $\Delta\Gamma$, followed by a noisy plateau (associated with particle collisions in the gaseous phase).

3. RESULTS

Figure 4 (left) shows how Γ_c behaves with the filling fraction ϕ , defined as $\phi = (N\pi r^2)/(\pi R^2)$ where N is the number of particles of the monolayer, r is the radius of a single particle and R the radius of the container. In the four cases studied, the rough observation is that Γ_c is basically independent of ϕ , although the monolayer with glass particles showed a slight increase of at large ϕ for both container radii. The transition to a gaseous phase implies the development of multiple inter-particle collisions, in such a way that these collisions transfer the vertical kinetic energy provided by the vibrating plate to kinetic energy associated with motion in the plane of the plate. At large ϕ the monolayer is more crowded, the frequency of collisions is expected to be larger while the mean free path of each particle is expected to be lower, i.e. a scenario that promotes dissipation. Therefore, it is expected that a more vigorous shaking is needed to gassify a very crowded monolayer. This effect is sharper for glass particles than stainless steel particles because the latter material has more density and similar elastic properties, meaning larger inertia and comparable dissipation, therefore the crowding effect of a large ϕ , is not that important for stainless steel particles. For a given particle type, a larger system shows a lower Γ_c . This is understood since larger a system has more particles, thus it is more probable that a single fluctuation would trigger the development of the gaseous phase.

We also looked at the behavior of $\Delta\Gamma$ with ϕ . The value of $\Delta\Gamma$ can be associated with a “floating mass”. The inset of figure 3 (right), shows how Γ varies with the mass loaded on the container. More mass gives a lower Γ for a given voltage amplitude. Therefore the increase $\Delta\Gamma$ observed at the onset of the gaseous phase, indicates a reduction of the mass felt by the speaker. This reduction is associated with the number of spheres that is lifted during each oscillation, it is important to remember that during the solid phase all grains move in a coherent way, following the motion of the container, while during the gaseous phase all grains perform random jumps. Figure 4 (right) shows how there is a given filling fraction that maximizes $\Delta\Gamma$ of roughly $\phi=0,55$ for both container sizes and grain types studied. Since $\Delta\Gamma$ is a measure of the number of grains detached from the container during each oscillation, the plot implies that a fewer number of particles is jumping when the monolayer is too crowded and when it is almost empty. The decrease at low ϕ is associated with the fact that the total number of grains is lower therefore the number of grains effectively in the air is reduced. The decrease of $\Delta\Gamma$ at large ϕ is understood since although the monolayer is more populated, the volumetric arrest due to overcrowding tends to frustrate grain motion, therefore the number of grains effectively jumping is reduced.

4. CONCLUSIONS

We have studied experimentally the transition from a “solid-like” to a “gas-like” phase in a vertically vibrated monolayer. The transition takes place at a given critical acceleration that was found to be almost independent of the filling fraction of the container, although the critical accelerations tends to increase for large filling fractions when the granular material has lower density. We also associated a sharp increase in the acceleration of the monolayer, observed at the onset of the gaseous phase, with a floating mass (the portion of particles detached from the

container). This floating mass was shown to have a maximum when plotted as a function of the filling fraction.

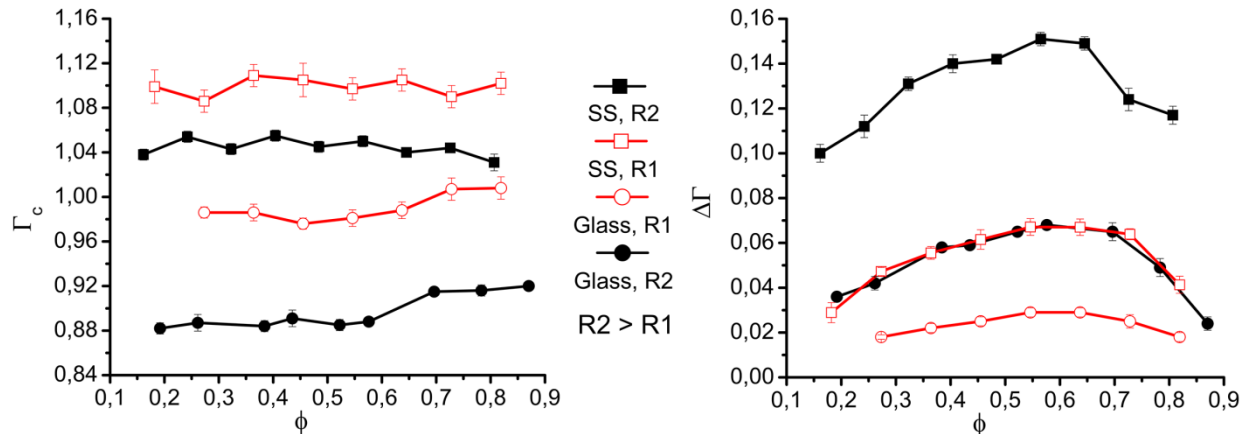


Figure 4 - Transition acceleration Γ_c (left) and “floating mass” $\Delta\Gamma$ (right) as a function of the filling fraction ϕ for two different container radius $R_1=4$ cm, $R_2=6$ cm and two different grain materials. Each point (for both plots) is the average over 30 experiments.

Acknowledgements

We thank J.R. Darias, Ismaro Bonalde for valuable logistical help and fruitful discussions.

REFERENCES

- [1] J. S. Olafsen and J. S. Urbach, “Clustering, Order, and Collapse in a Driven Granular Monolayer,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 81, no. 20, pp. 4369–4372, Nov. 1998.
- [2] X. Nie, E. Ben-Naim, and S. Y. Chen, “Dynamics of vibrated granular monolayers,” *Eur. Lett.*, vol. 51, no. 6, p. 679, 2000.
- [3] W. Losert, D. G. Cooper, and J. P. Gollub, “Propagating front in an excited granular layer,” *Phys. Rev. E. Stat. Phys. Plasmas. Fluids. Relat. Interdiscip. Topics*, vol. 59, no. 5 Pt B, pp. 5855–61, May 1999.
- [4] F. Pacheco-Vázquez, G. Caballero-Robledo, and J. Ruiz-Suárez, “Superheating in Granular Matter,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 17, p. 170601, Apr. 2009.
- [5] A. Prevost, P. Melby, D. Egolf, and J. Urbach, “Nonequilibrium two-phase coexistence in a confined granular layer,” *Phys. Rev. E*, vol. 70, no. 5, p. 050301, Nov. 2004.
- [6] P. Melby, F. V. Reyes, a Prevost, R. Robertson, P. Kumar, D. a Egolf, and J. S. Urbach, “The dynamics of thin vibrated granular layers,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 17, no. 24, pp. S2689–S2704, Jun. 2005.
- [7] F. V. Reyes and J. S. Urbach, “Effect of inelasticity on the phase transitions of a thin vibrated granular layer,” *Phys. Rev. E*, vol. 78, no. 5, p. 51301, Nov. 2008.
- [8] P. M. Reis, R. A. Ingale, and M. D. Shattuck, “Crystallization of a Quasi-Two-Dimensional Granular Fluid,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, no. 25, p. 258001, 2006.
- [9] P. M. Reis, R. A. Ingale, and M. D. Shattuck, “Caging Dynamics in a Granular Fluid,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, no. 18, p. 188301, 2007.
- [10] A. Lorenz, C. Tuozzolo, and M. Y. Louge, “Measurements of impact properties of small, nearly spherical particles,” *Exp. Mech.*, vol. 37, no. 3, pp. 292–298, Sep. 1997.

ESTUDIO PARÁMETRICO DE LOS COEFICIENTES DEL MODELO TAIT MODIFICADO AL SIMULAR EL MOLDEO POR INYECCIÓN DE MUESTRAS DE POLIPROPILENO

Claudia Almonacid

María Virginia Candal

cpalmonacidm@gmail.com

mcandal@usb.ve

Grupo de Polímeros. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar.

Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela.

Orlando Pelliccioni

orlandop@usb.ve

Grupo de Biomecánica. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar.

Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela.

Resumen. *El diagrama PvT es la representación en el espacio tridimensional Presión - volumen específico - Temperatura de los estados posibles de un compuesto químico. Para el caso de piezas fabricadas de polímeros bajo moldeo por inyección, dichas variables durante el proceso influyen en la calidad de la pieza inyectada, y por ello definen el comportamiento del material durante la fabricación. Entre los modelos más usados de ecuaciones de estado (EOS), en la literatura se encuentra el método Tait generalizado, tanto para polímeros fundidos amorfos como semicristalinos. El presente trabajo, evalúa de forma paramétrica, el efecto sobre la pieza inyectada de cada uno de los 13 coeficientes del modelo Tait generalizado, apoyándose en la simulación numérica bajo el método del elemento finito de un molde de probetas. Se reportan y discuten los resultados calculados de la contracción volumétrica obtenidos empleando los diagramas PvT de quince polipropilenos semicristalinos con índice de fluidez (MFI) similar a 10g/10min, provenientes de la base de datos de la herramienta comercial Autodesk Moldflow Insight 11. Las conclusiones resaltan la importancia de utilizar en la simulación la curva PvT del polímero en condiciones reales del proceso de inyección (Presión y Temperatura de inyección) cuando se buscan resultados de contracciones post-moldeo calculados más ajustados a los obtenidos experimentalmente.*

Palabras claves: Modelo Tait generalizado, moldeo por inyección, Polipropileno, presión, volumen específico, temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

La curva PvT es una representación de la variación del volumen específico de un polímero, en función de dos variables que afectan el procesamiento de éste: Presión y Temperatura. Dichas variables de proceso influyen en la calidad de la pieza inyectada, y por ende, definen el comportamiento del material durante su proceso de inyección [1]. Este comportamiento puede medirse bajo dos condiciones, isobáricas o isotérmicas. Debido a la naturaleza de los polímeros, los de tipo amorfo poseen una respuesta térmica diferente que los polímeros de tipo semicristalino, por lo cual la forma de la curva PvT se ve modificada. Pero en general, en las curvas PvT de resinas poliméricas es posible distinguir una región de transición térmica referida a la temperatura de transición del polímero, T_g [2]. Temperaturas de trabajo por encima de la temperatura de transición implican un estudio del comportamiento del polímero en estado fundido; mientras que temperaturas menores a la temperatura de transición implican estudiar al polímero en un estado sólido. Para ello se ha simulado este comportamiento bajo ecuaciones de estado (EOS) representadas por diversos modelos presentados en la literatura, pero el más recomendado es el método Tait generalizado. En la Ecuación 1 se muestra como es la variación del volumen específico en función de la temperatura y de la presión.

$$V(P,T)=V_0(T)\left\{1-C \ln \left[1+\frac{P}{B(T)}\right]\right\}+V_t(P,T) \quad (1)$$

donde “C” corresponde a una constante universal con un valor igual a 0,0894; el término $B(T)$ es una función de la temperatura y el término $V_t(P,T)$ permite estudiar el efecto de la cristalización que ocurre en los polímeros, la cual se ve reflejada en una disminución del volumen del material a medida que éste se enfría por debajo de la temperatura de fusión. Las expresiones para cada término involucran un grupo de coeficientes que permiten estudiar el paso del polímero desde el estado fundido hasta el sólido. En el modelo Tait generalizado, específicamente, se describen trece (13) coeficientes relacionados con el estado fundido (b_{1m} (m^3/kg), b_{2m} ($kg^\circ C$), b_{3m} (Pa), b_{4m} ($^\circ C$), b_{5m} ($1/^\circ C$) y b_{6m} ($^\circ C/Pa$)) y con el estado sólido (b_{1s} (m^3/kg), b_{2s} ($m^3/kg^\circ C$), b_{3s} (Pa), b_{4s} ($1/^\circ C$); b_{5s} ($^\circ C$), b_{6s} ($^\circ C/Pa$), b_{7s} (m^3/kg), b_{8s} ($1/^\circ C$) y b_{9s} ($1/Pa$)).

En los estudios realizados por Wang [2] se emplearon dos técnicas, a nivel experimental, para la obtención de la curva PvT para un resina polimérica semicristalina (PP). El primer método consistió en emplear un dilatómetro convencional a una velocidad de enfriamiento de $2^\circ C/min$, mientras que el segundo método consistió en emplear un molde de inyección con una velocidad de calentamiento de $15^\circ C/min$. Para ambos casos se obtuvo la curva PvT, la cual se introdujo en la herramienta CAE comercial *Autodesk Moldflow*. Asimismo, se fijaron las mismas propiedades mecánicas y reológicas del material para sólo evaluar el efecto en las diferencias de las curvas PvT en las propiedades de contracción postmoldeo y alabeo. Los resultados revelaron una diferencia entre los valores del volumen específico obtenido experimentalmente y el calculado, a partir de la temperatura en el que el polímero se encuentra en estado cauchoso. Estas diferencias fueron atribuidas a las velocidades de enfriamiento y calentamiento empleadas, como factor de mayor efecto sobre los resultados. Por otro lado, Chang *et al.* [3] estableció la velocidad de enfriamiento como una variable determinante en el comportamiento del volumen específico cuando el polímero se encuentra en un estado sólido (Fig 1). Es a partir de estos trabajos previos que se decidió hacer un estudio más profundo del efecto de la curva PvT sobre el comportamiento final del polímero durante su proceso de inyección y de allí que el objetivo

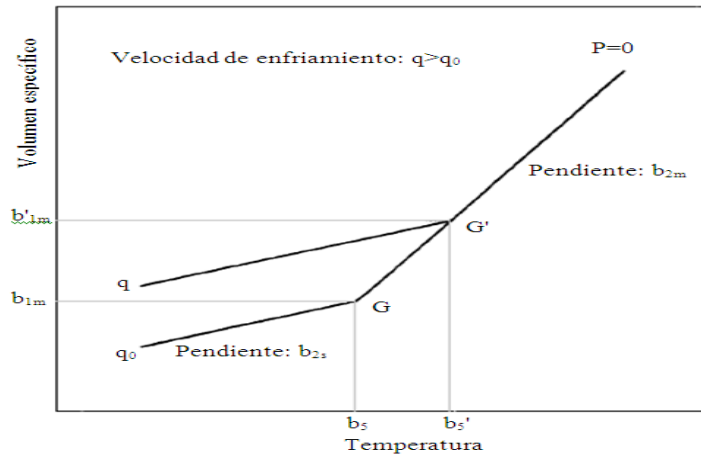


Figura 1-Eschema de los parámetros de la ecuación de Tait generalizada y el cambio debido a la velocidad de enfriamiento de q_0 a q (tomado y modificado de [2]).

principal de esta investigación fue estudiar el efecto de cada uno de los coeficientes del modelo Tait generalizado sobre la contracción post-moldeo de una pieza plástica inyectada.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio fue desarrollado totalmente utilizando la herramienta comercial Autodesk Moldflow Insight 11.0., la cual permite simular de forma numérica el proceso de moldeo por inyección de piezas plásticas bajo la técnica del elemento finito. Los detalles de la simulación se describen a continuación:

Geometría evaluada: La pieza en estudio fue una probeta ISO A[4], correspondiente a la empleada para ensayos de tracción en polímeros y obtenida por inyección convencional (Fig. 2a). Se realizó el montaje del sistema de inyección y de refrigeración del molde correspondiente bajo la configuración presentada en la Fig. 2.

Mallado: Se definió un análisis bidimensional para la simulación, seleccionando elementos planos triangulares de tipo plano medio (*Midplane*) con 4 nodos de integración. El análisis de convergencia fijó una malla de 5072 elementos para discretizar la probeta de estudio.

Asignación del material: De la base de datos de *Moldflow* se seleccionó un grupo de resinas de Polipropileno (PP) con un índice de fluidez de 10 g/10 min. Se limitó el estudio a las que no presentaban cargas ni mezclas con otros polímeros, para finalmente trabajar con un número de quince (15) resinas de PP.

Casos de estudio: Empleando los trabajos de Wang [2], Chang *et al.* [3] y Pantani y Titomanlio [5] se decidió modificar los coeficientes del modelo Tait generalizado y observar su efecto sobre la contracción postmoldeo de la pieza, específicamente, en su zona más importante de estudio como es el ancho del cuello. Partiendo del estudio de Chang *et al.* [3] se decidió evaluar sólo los coeficientes del estado sólido (b_{1s} , b_{2s} , b_{3s} , b_{4s}) y los coeficientes b_5 y b_6 , ya que en el estado fundido no se observan notables diferencias bajo efectos de variables como la velocidad de enfriamiento y/o calentamiento. Para el grupo de resinas seleccionadas, se extrajo la información relacionada con sus respectivas curvas PvT, construyendo una data que involucraba todos los coeficientes del modelo Tait. Con esta información, se desarrolló un diseño de experimentos (DOE) para llevar a cabo la modificación de los 13 coeficientes con valores máximos y mínimos, y un valor intermedio entre estos límites. Para realizar la variación se seleccionó un PP base dentro del grupo de estudio (*HYFIL XPP A 3906MM*). En la Tabla 1 se presentan los rangos de trabajo para cada uno de los coeficientes.

Tabla 1. Rangos de variación para cada coeficiente del modelo Tait

Coef.	Variación	Coef.	Variación	Coef.	Variación
$b1m$	$1,403 \cdot 10^{-3}$ a $1,303 \cdot 10^{-3}$	$b1s$	$9,784 \cdot 10^{-3}$ a $1,204 \cdot 10^{-3}$	$b5$	398,15 a $451,15 \cdot 10^{-7}$
$b2m$	$6,120 \cdot 10^{-7}$ a $1,045 \cdot 10^{-6}$	$b2s$	$4,432 \cdot 10^{-7}$ a $7,337 \cdot 10^{-7}$	$b6$	$5,500 \cdot 10^{-8}$ a $2,655 \cdot 10^{-4}$
$b3m$	$6,870 \cdot 10^7$ a $1,047 \cdot 10^7$	$b3s$	$7,686 \cdot 10^7$ a $2,062 \cdot 10^8$	$b7$	$3,626 \cdot 10^{-5}$ a $1,505 \cdot 10^{-1}$
$b4m$	$3,587 \cdot 10^{-3}$ a $5,796 \cdot 10^{-3}$	$b4s$	$1,747 \cdot 10^{-3}$ a $8,923 \cdot 10^{-3}$	$b8$	$1,195 \cdot 10^{-2}$ a $4,706 \cdot 10^{-8}$
				$b9$	$4,767 \cdot 10^{-9}$ a 3,206

Ajuste de variables: Algunos requerimientos del proceso se mantuvieron constantes en todos los modelos simulados, tales como fluido refrigerante, Número de Reynolds, material del molde, modelo de la máquina, fuerza de cierre y capacidad de inyección de la máquina de inyección, entre otras. Los rangos de valores utilizados se resumen en la Tabla 2.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Autodesk Moldflow y herramientas CAE similares, poseen una base de datos de resinas poliméricas con las características reológicas, de procesamiento, mecánicas y de su comportamiento PvT, que permiten analizar el cambio que sufre el polímero por condiciones de presión, temperatura y/o velocidad de deformación durante el proceso de moldeo por inyección. Sin embargo, cuando se requiere introducir un nuevo material a la base de datos es necesario encontrar a nivel experimental sus características reológicas y mecánicas ajustadas a los modelos numéricos disponibles en la herramienta computacional. El ajuste de las curvas PvT al modelo Tait resulta ser un requerimiento especial y poco frecuente como información que ofrezcan las empresas productoras de resina, y los equipos requeridos para su medición son poco comunes en los laboratorios. Por esta razón, para una primera etapa de diseño, la práctica convencional consiste en seleccionar una resina de características aproximadas dentro de la lista disponible en la base de datos del programa de simulación, y simplemente se modifican sus constantes relacionadas con el comportamiento reológico y mecánico del material. La razón de este trabajo fue evaluar el efecto de estas aproximaciones de las curvas PvT sobre el acabado de la pieza.

Tabla 2. Variables de proceso fijadas en la máquina de inyección

Variable de Proceso	Valor
Número de Reynolds	10 000
Fluido refrigerante	Agua
Material del molde	Acero P20
Fuerza de cierre (Ton)	80
Marca/Modelo de la máquina de inyección	Genérico
Temperatura de inyección (C)	220
Tiempo de inyección (s)	2
Temperatura del molde (C)	25
Presión sostenida (MPa)	55
Presión de inyección (MPa)	55
Tiempo de pistón en posición adelantada (s)	2
Tiempo de enfriamiento (s)	30
Tipo de análisis	Cool+Fill +Pack+Warp

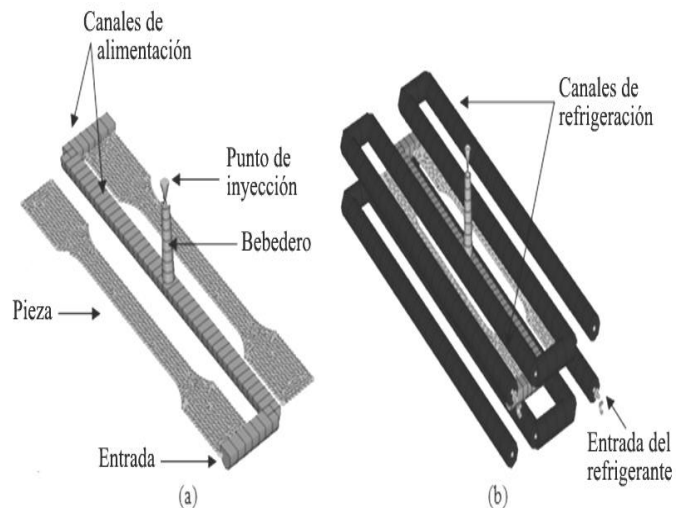


Figura 2- (a) Sistema de alimentación y (b) Sistema de refrigeración del molde de probetas ISO A.

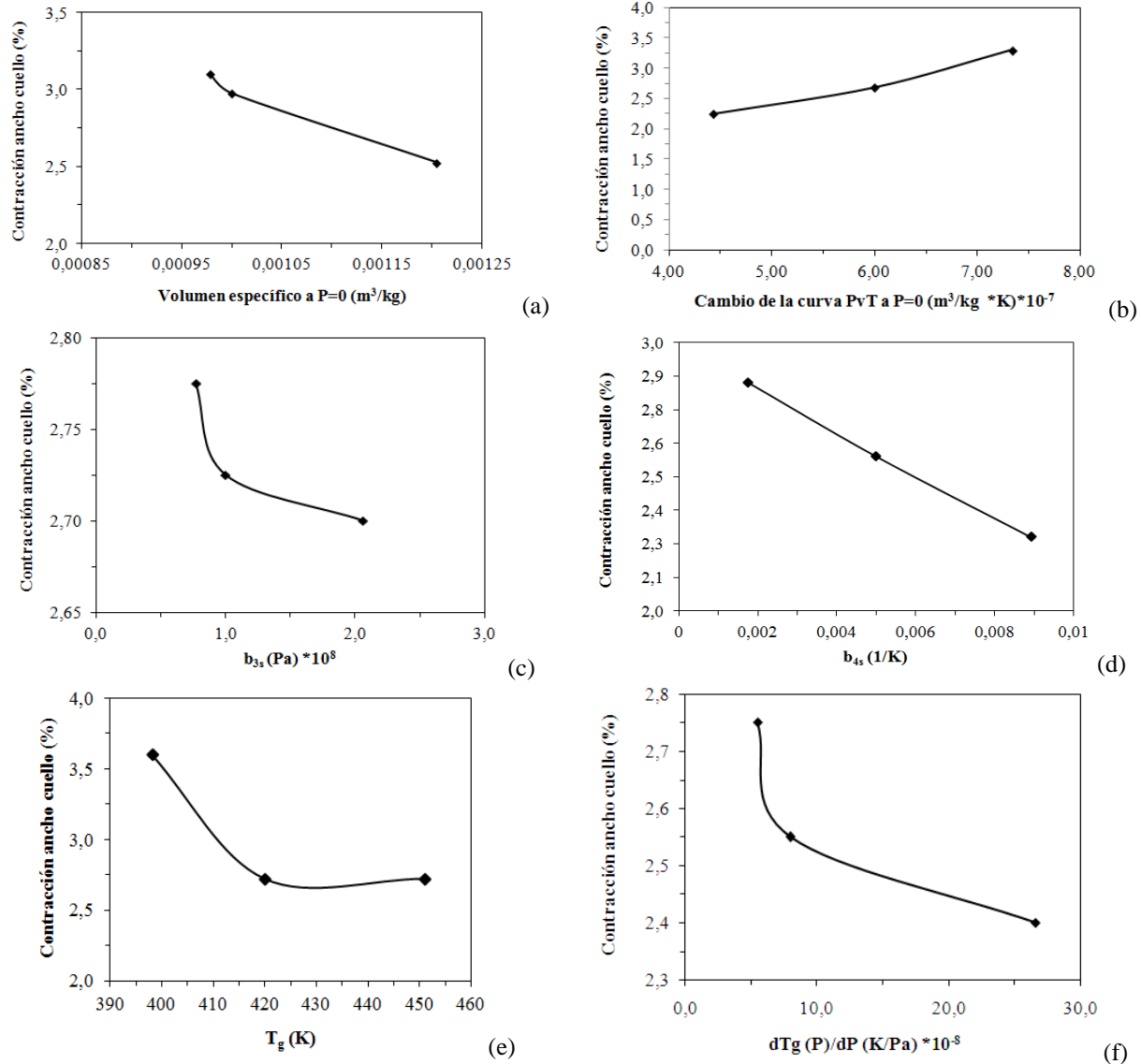


Figura 3 – Contracción en función de: a) El volumen específico (*coeficiente b_{1s}*), b) la pendiente de la curva PvT en el estado sólido (*coeficiente b_{2s}*), c) la sensibilidad a la presión (*coeficiente b_{3s}*), d) a sensibilidad a la presión (*coeficiente b_{4s}*), e) la Temperatura de transición (*coeficiente b_5*), y f) la variación de la T_g con respecto a la presión (*coeficiente b_6*).

En general, al observar el comportamiento en la Fig. 3, el cambio en la contracción postmoldeo de la pieza es de hasta un 1,5% a medida que se modifican la gran mayoría de los parámetros. Posiblemente, estos valores parecen ser muy pequeños, pero en una pieza plástica son importantes, principalmente, si dicha pieza va a ir ensamblada con otra.

El coeficiente b_{1s} está referido al volumen específico alcanzado en el estado sólido. A medida que se incrementa el valor de éste el porcentaje de contracción en la pieza es menor. Sin embargo, para el coeficiente b_{2s} el comportamiento de la contracción aumenta para mayores variaciones en el comportamiento PvT del material en el estado sólido. El estudio del coeficiente b_{2s} se realizó fijando el valor del coeficiente b_{1s} , por lo que para cada variación de b_{2s} se estableció alcanzar un mismo valor de volumen específico. Se sospecha que el comportamiento de este coeficiente está asociado a una respuesta del material debido a su cristalización. Por otro

lado, los coeficientes b_{3s} y b_{4s} están asociados al término $B(T)$ (Ec. 2) de la ecuación Tait generalizada (Ec. 1). Estos coeficientes permiten estudiar la sensibilidad del material a la presión aplicada [6]. Para ambos coeficientes, la contracción del material se ve disminuida a medida que se incrementa la presión o la temperatura, por un cambio en el volumen específico del material, pero dichos cambios son menores que con el resto de los parámetros.

$$B(T) = b_{3s} \exp^{(-b_{4s} \bar{v})} \quad (2)$$

Por último, para los coeficientes b_5 y b_6 se observa la misma tendencia de la contracción al disminuir su valor a medida que se incrementa el valor de estos coeficientes. El término b_5 está relacionado con la temperatura de transición crítica del material, específicamente, relacionada su cambio de la condición de fundido a un estado sólido. Por último, se sospecha que la data de las curvas PvT que manejan los programas de simulación del proceso de inyección, para las diferentes resinas poliméricas, fueron obtenidas en condiciones de laboratorio para bajas velocidades de enfriamiento, por lo que las variaciones observadas para cada coeficiente no son elevadas, simplemente sirven para observar tendencia, por lo que no pueden extrapolarse para respuestas del material a altas velocidades de enfriamiento, que es lo que realmente ocurre en una máquina de inyección. Estudios a futuro con curvas PvT realizadas en equipos de procesamiento a condiciones reales permitirán evaluar si los cambios en la contracción de la pieza ocurren para mayores órdenes de magnitud que los observados, actualmente.

4. CONCLUSIONES

Los coeficientes del modelo Tait generalizado tienen diferentes efectos sobre la contracción de piezas plásticas inyectadas. A medida que el coeficiente b_{1s} se incrementa, el porcentaje de contracción en la pieza es menor. Sin embargo, para coeficientes b_{2s} más altos, el comportamiento de la contracción se incrementa. A mayores valores de coeficientes b_{3s} , b_{4s} , b_5 y b_6 , la contracción de la pieza se incrementa, pero siendo menor el incremento para b_{3s} , b_{4s} . Es necesario ampliar el rango de estudio para estudiar los coeficientes del modelo Tait generalizado tanto para altas y bajas velocidades de enfriamiento.

5. REFERENCIAS

- [1].Plastics-Determination of specific volume as a function of temperature and pressure (*pvt* diagram)-Piston apparatus method. *International Standard ISO 17744*, 2004.
- [2].Wang, J., PVT Properties of Polymers for Injection Molding, En el libro: Some Critical Issues for Injection Molding, InTech Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/some-critical-issues-for-injection-molding/measurements-of-polymer-pvtproperties-for-injection-molding>
- [3].Chang, R. Y., Chen, C. H., & Su, K. S., Modifying the Tait Equation with Cooling Rate-Effects to Predict the Pressure-Volumen-Temperature Behaviors of Amorphous Polymers: Modeling and Experiments. *Polym Eng Sci*, vol.36, n.13, pp.1789-1795, 1995.
- [4].Norma ISO 527-1:2012. *Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles*
- [5].Pantani, R. & Titomanlio, G., Description of PVT Behavior of an Industrial Polypropylene-EPR Copolymer in Process Conditions, *J Appli Polym Sci*, vol.81, n.2, pp 267-278, 2001.
- [6].Löhe, D., & Haußelt, J., Microengineering of Metals and Ceramics: Part I: Design, Tooling and Injection Molding, *Matching the Equation of State*, pp. 66. Wiley, 2005.

EFECTO DEL TIPO DE MALLADO EN LA SIMULACIÓN DEL MOLDEO POR INYECCIÓN ASISTIDA POR GAS DE UNA PIEZA PLÁSTICA

Rosa A. Morales

Oscar E. Mata

rmorales@usb.ve

oemgarcia@gmail.com

Departamento de Mecánica, Sección de Polímeros, Universidad Simón Bolívar, USB, Valle de Sartenejas, Baruta, Estado Miranda, Venezuela.

Resumen. *El presente proyecto desarrolló una metodología para evaluar piezas moldeadas por inyección asistida por gas en el programa Moldflow Insigh 2013. Se estudió el efecto de las variables de proceso (temperatura de fundido, temperatura del molde, tiempo de retardo de gas, tiempo de presión sostenida de gas y presión sostenida de gas) sobre características de la pieza. Una vez definido el tipo de malla, se siguieron las pautas indicadas por el programa de simulación para la realización del análisis. Se realizó la simulación variando el punto de inyección del gas. Se escogió la posición que arrojó los mejores resultados para el estudio de las variables de proceso. Una vez desarrollada la metodología para realizar las simulaciones, y verificada su validez, se concluye que estas mostraron tendencias de acuerdo a los fenómenos que generalmente se presentan en el moldeo por inyección asistida por gas de piezas plásticas.*

Palabras Claves: Herramientas CAE, Inyección asistida por gas, Simulación, Piezas plásticas.

1. INTRODUCCIÓN

En el área del moldeo por inyección de piezas plásticas, se han desarrollado diversas técnicas innovadoras. Entre dichos procesos se encuentran la inyección asistida por agentes espumantes, la inyección asistida por agua, y finalmente, tema principal del presente trabajo, la inyección asistida por gas. El moldeo por inyección asistida por gas es una variante del proceso de inyección convencional que permite el formado de piezas de cuerpo hueco, donde se inyecta al molde la cantidad suficiente de resina fundida para formar el volumen de la pieza hueca seguido de la inyección de gas bajo presión con el objeto de expandir la resina en las superficies interiores del molde[1]. En vista de las ventajas de su empleo, existe una necesidad de llevar a cabo estudios que aumenten los conocimientos relacionados a la técnica. Investigaciones [2-3] han

sido realizadas en los últimos años con el objeto de estudiar los fenómenos asociados a la inyección asistida por gas, debido al gran interés de aplicación a nivel industrial por las numerosas ventajas que representa frente a otras técnicas de moldeo. La inyección asistida por gas es una técnica que no ha quedado fuera del alcance de programas de simulación comerciales. *Autodesk Moldflow Insight*, software especializado en el área de inyección de piezas plásticas, ofrece un módulo de Inyección Asistida por Gas en el que es posible realizar simulaciones bajo diversas condiciones y configuraciones. Este módulo ha sido empleado en el presente trabajo con el objeto de profundizar los conocimientos sobre esta técnica y ha sido desarrollada una metodología para la realización de simulaciones considerando las especificaciones exigidas por el software, pudiendo verificarse los efectos de las variables de proceso en los resultados de piezas simuladas, y su correspondencia con lo reportado. [2-3]

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Creación de modelos 3D

Para la representación de las geometrías comerciales seleccionadas se utilizó el programa de diseño CAD *SolidWorks*. En el caso de la ducha (Fig.1a), se tomó la estructura principal de geometría tubular, cuyo espesor máximo es de 6mm, omitiendo la rejilla de salida de agua, considerada fuera de los objetivos del estudio. La cesta fue dibujada con alta fidelidad con un espesor máximo de 5 mm (Fig. 1b).



Figura 1 – Modelos 3D: (a) Ducha y (b)Cesta.

2.2 Mallado de las piezas

El mallado fue realizado en el programa de simulación *Autodesk Moldflow Insight 2013* en su versión educativa, a partir de los modelos 3D generados en el programa *SolidWorks*. El programa *Moldflow* sólo realiza simulaciones para inyección asistida por gas en mallado de plano medio y 3D. Para la ducha se seleccionó el mallado 3D con 106.316 elementos tetrahédricos y para la cesta mallado plano medio con 51.133 elementos triangulares. Estas características de malla empleadas para la realización del análisis, tales como la densidad de malla en las zonas de paso de gas y el número de elementos a través del espesor, son discutidas en la Sección 3.1.

2.3 Diseño de moldes, especificaciones de máquina y variables de proceso

Los moldes fueron diseñados en base a criterios regulares de diseño en inyección convencional y a la obtención de mínima contracción volumétrica y alabeos en las piezas. Para la ducha, se diseñó un molde de cuatro cavidades y dos placas, mientras para la cesta, un molde de una cavidad y de tres placas (Fig. 2). Se evaluaron 3 sistemas de refrigeración para cada pieza. Las condiciones de proceso evaluadas y las características de diseño de los moldes definitivos se muestran en las Tablas 1 y 2.

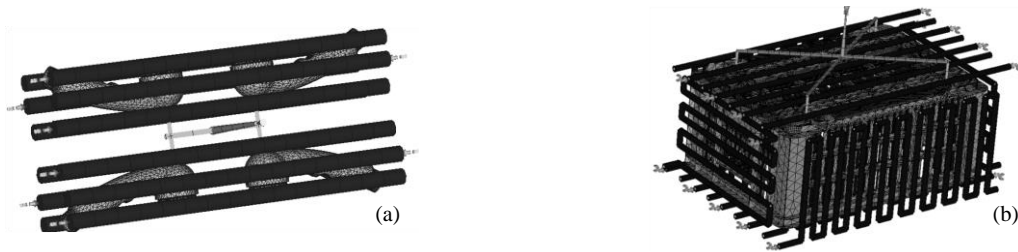


Figura 2 – Diseño de Moldes Final : (a) Ducha y (b)Cesta.

El material del molde fue Acero P-20 y el refrigerante empleado agua a 24 °C. La máquina seleccionada para el análisis de la ducha fue una Allrounder 270 S 55 t y para el análisis de la cesta fue la 3000 t, ambas seleccionadas de la base de datos del programa *Moldflow*. El material empleado para la simulación de ambas piezas fue un polipropileno PP DBEF-Box 49 de 3M (densidad=0,89163 g/cm³). Las variables de proceso modificadas en inyección convencional fueron: temperatura de fundido, temperatura de molde, caudal del agente refrigerante, temperatura del refrigerante, presión sostenida y tiempo de presión sostenida, seleccionando las que mostraran la mayor fracción de capa sólida y menores valores de contracción volumétrica e índice de alabeos. Las variables de proceso empleadas en el análisis de la inyección asistida por gas fueron: tiempo de retardo, shot-size (o volumen de inyección de polímero), temperatura de fundido, temperatura de molde, presión de gas y tiempo de presión de gas. Se realizaron 20 simulaciones para cada pieza evaluadas dentro de los rangos de variables de proceso mostrados en la Tabla 1. Los resultados analizados fueron penetración de gas y volumen de gas en la pieza.

Tabla 1. Magnitudes de variables de proceso estudiados en simulaciones.

Variables		Magnitudes				
Tiempo de retardo	0	1,16	2,5	4	8	
Shot-Size	80	85	90	95	100	
Temperatura de Fundido	220	230	240	250	260	
Temperatura de Molde	35	40	50	60	65	
Presión de Gas	5,1-5,2	3,1-3,2	10,1-10,2	15,1-15,2	20,1-20,2	
Tiempo de Presión de Gas	5	10	15	20	30	

Tabla 2. Características del diseño de moldes para la ducha y la cesta.

Pieza	Canales de Alimentación				Entradas			Bebedero			Canales de Refrigeración
	Primarios	Secundarios	“Rectangulares”								
Ducha	Ancho	Alto	Ancho	Alto	Ancho	Alto	Long.	∅ Inicial	α	Long.	∅
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	5	3	4	2,5	2,2	2	1	4	1	95,51	15
Cesta	Primarios	Secundarios	“Circulares”								
	Ancho	Alto	Ancho	Alto	Diametro	Longitud	∅ Inicial	α	Long.	∅	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
	8	6	7	5	3	1	4	1	95,51	15	

3. RESULTADOS

3.1 Metodología para generación del mallado

Para que el mallado cumpla con requerimientos exigidos por el programa, se siguieron las siguientes pautas: un mínimo de 2 elementos a través de cada región en la pieza, un mínimo de 3 elementos a través de los canales de gas, una relación de aspecto máxima de 4 para canales de gas y de 6 para el resto de las regiones y el aumento de la densidad de mallado en las regiones de interés como puntos de ingreso de gas y puntos de inyección de polímero.

Ducha tipo teléfono. Se seleccionó el mallado en 3D (Fig. 3a) considerado el más apropiado, tanto por la geometría como por el espesor máximo de la pieza, el cual cuenta con una relación aspecto de 5,82 y un número de 106.316 elementos tetrahédricos. Sin embargo, dado que el programa *Moldflow* no considera la influencia de los canales de refrigeración del molde en el análisis de la inyección asistida por gas para este tipo de malla, se realizó una prueba con mallado en plano medio para evitar dicha limitación y adicionalmente disminuir los requerimientos de análisis vinculados al mallado en tres dimensiones. No obstante, el procedimiento resultó en un mallado con muchos errores y una importante pérdida de la geometría original de la pieza (Fig. 3b). Polynkin et al [4] también simularon la inyección asistida por gas de un mango, donde explican que las simulaciones en plano medio solo proveen información sobre el porcentaje de la sección transversal ocupada por polímero y la distancia de la penetración de gas, lo que no es conveniente para piezas complejas, ya que el análisis en plano medio no provee información circunferencial sobre el espesor.



Figura 3 - Modelos de la ducha evaluados: (a) Modelo 3D y (b) Plano medio con malla colapsada.

Cesta. Se realizó el mallado en 3D con el objeto de obtener resultados de núcleo de gas y tiempo de gas, necesarios para evaluar el proceso de inyección asistida por gas. El mallado inicial fue realizado satisfactoriamente bajo los requerimientos de densidad de malla exigidos por el programa. Sin embargo, al intentar una simulación piloto en inyección convencional no fue posible realizar el análisis debido a limitaciones de memoria. Se decidió solventar el problema aplicando a la pieza lo que se denominó “un patrón de reducción de detalles de diseño”, para así reducir la complejidad del mallado (Fig. 4). El patrón utilizado fue: reducción de redondeos, eliminación de los orificios de la cesta, reducción-eliminación de la cantidad de nervios laterales de la cesta y finalmente reducción del tamaño de la cesta. Los tres primeros pasos fueron seguidos con el objeto de conservar el tamaño original de la pieza, reduciendo en lo posible los detalles de diseño, siempre manteniendo los nervios de la base de la cesta, región por la que ocurre la inyección de gas. Sin embargo, aun con estas primeras medidas no pudo desarrollarse la simulación, recurriendo el error de memoria. En la Figura 4a se muestra el patrón de reducción; los círculos en negro indican las regiones que fueron modificadas. El primer detalle eliminado fueron los orificios que forman parte del diseño de la pieza, luego fueron eliminadas las regiones redondeadas de la base de la cesta, así como algunos nervios laterales hasta llegar a la versión de mínimos detalles representada en la Fig. 4b. Se redujo el tamaño de la cesta lo que disminuyó la

cantidad de elementos tetrahédricos de la pieza y así, en combinación con la reducción de detalles, se obtuvo un modelo final. No obstante, nuevos inconvenientes surgieron al realizar una prueba en inyección asistida por gas. Los resultados mostraron que el mallado en la región de los nervios o canales de gas no era lo suficientemente denso, y que no habían suficientes elementos a través del espesor del canal. Por tal motivo, se realizó el remallado local de la región de los nervios para alcanzar las características necesarias para el análisis en inyección asistida.

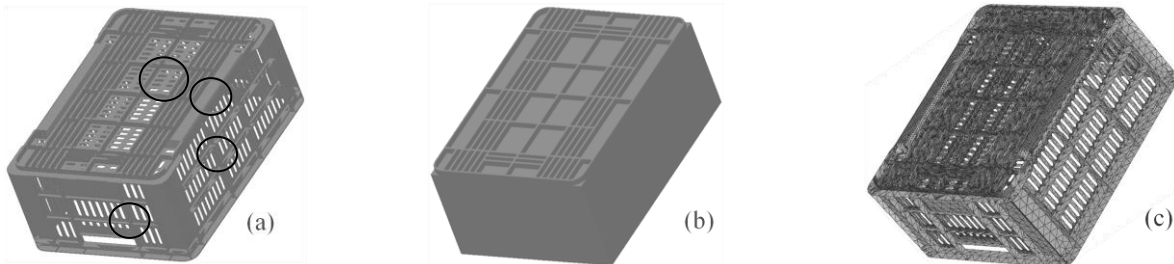


Figura 4 - Pasos para el mallado: (a)Zonas modificadas, (b)Modelo definitivo y (c)Malla final.

A continuación, se recomiendan los pasos a seguir para alcanzar la correcta densidad de malla en una zona de la pieza: 1.- Realizar el mallado total de la pieza hasta cumplir con los requerimientos para realizar el análisis de inyección convencional (relación de aspecto menor a 6), 2.- Realizar el mallado gradual de la región de los canales de gas. Esto es, seleccionar la región de canales y sus cercanías, y remallar en varios pasos, reduciendo la longitud global de arista y especificando siempre el número de elementos a través del espesor. Dichos valores pueden modificarse en las opciones de generación de malla 3D y 3.- Dibujar en 3D una sección de la región de paso de gas (Fig. 5a) para realizar una prueba en inyección asistida (Fig. 5b). Este paso es para evitar realizar simulaciones innecesarias ya que sirve como guía en la búsqueda del mallado requerido. En relación a este tipo de malla Geng et al [5], recomiendan en inyección asistida por gas el uso de modelos 3D ya que permiten una mejor predicción de los resultados. Una vez alcanzado el mallado requerido, se simuló una prueba con puntos de inyección de gas y polímero para observar la penetración de gas, sin embargo, al utilizar el montaje final del molde surgió error de memoria. Por este motivo, se evaluó el mallado de plano medio con factor de escala 0,5 y en vista de los resultados satisfactorios, se decidió mallar la pieza en su tamaño original. Para disminuir la complejidad del mallado, se eliminaron redondeos de la pieza, evitando errores durante la generación de la malla. No fue necesario la aplicación del factor de forma para piezas de espesor mayor 5,3 mm malladas en plano medio ya que según la aproximación de Hele-Shaw, la cual asume que si la longitud de flujo de una sección es mucho más grande que el espesor de la misma, el mallado de plano medio es perfectamente aplicable [6]. No obstante, la malla obtenida debió ser reparada, ya que presentó un importante número de aristas libres hacia el interior de la geometría de la pieza (principalmente esquinas). La Figura 4c muestra el modelo final empleado en las simulaciones el cual cuenta con una de relación aspecto 2.83 y 51.133 elementos triangulares.

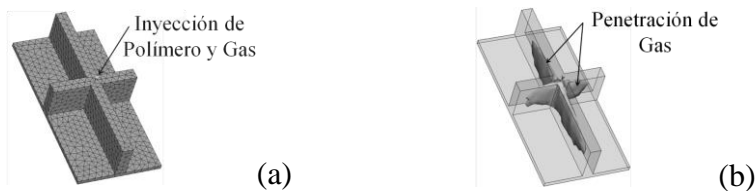


Figura 5 - Modelo reducido de nervios de la cesta: (a)Mallado y (b)Penetración de gas.

La Figura 6 muestran resultados obtenidos del estudio de la inyección asistida por gas para la cesta y la ducha.

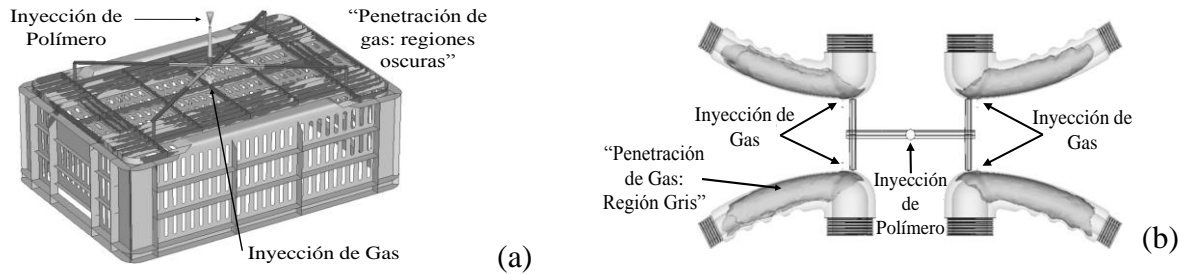


Figura 6 - Penetración de gas obtenida para las condiciones óptimas: (a)Cesta y (b)Ducha

4. CONCLUSIONES

En el análisis de la inyección asistida por gas, la metodología del mallado es esencial para la realización de las simulaciones con resultados confiables. En general, se considera que para las piezas evaluadas las variables más influyentes en orden de relevancia fueron el tiempo de retardo, el shot-size, la presión de inyección de gas y el tiempo de inyección de gas. Las temperaturas de fundido y molde presentaron el menor efecto sobre la penetración. Una de las desventajas del módulo de inyección asistida por gas del programa empleado, es que no considera los canales de refrigeración en el análisis 3D, lo cual restringe la utilidad de la herramienta para definir el proceso final de moldeo de la pieza. Adicionalmente, piezas con geometría similar a la ducha en la que es de interés aplicar la técnica, no pueden ser apropiadamente analizadas utilizando mallado en plano medio.

5. REFERENCIAS

- [1]. Avery, J., *Gas-Assist Injection Molding: Principles and Applications*. HANSER, 2001.
- [2]. Stachowiak, T. y Jaruga, T., Structure of gas-assisted injection moulded parts, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol.38, n.2, pp. 139-145, 2010.
- [3]. Qiang, L., Jie, O., Binxin Y. y Tao, J., Modelling and Simulation of Moving Interfaces in Gas-Assisted injection Moulding Process, *Elsevier*, vol.35, n.1, pp.257-275, 2011
- [4]. Polynkin, A., Pittman, J. y Sienz, J., Gas Assited Injection Molding:Three Dimensional Simulation and Experimental Verification, *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, vol. 45, n. 1, pp. 1049-1058, 2005.
- [5]. Geng, T., Ren, Q., Zhang, Y., Tu, T. y Liu, D., Comparison between Middle-face Model and 3D Model and Experiment of Gas-assisted Injection Molding, *Advanced Materials Research*, vols. 403-408, pp. 3656-3660, 2012.
- [6].Jaworski,M.,Ides,[Enlínea].Available:http://www.ides.com/articles/simulation/2008/0314_moldflow_mesh.asp.[Último acceso: 16 Octubre 2012].

DETECÇÃO DE DANOS VIA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO GLOBAL CONSIDERANDO RUÍDOS NAS MEDIÇÕES

Jean Michel C. Suveges
Sebastião S. Cunha Jr
Patricia S. L. Alexandrino
Ariosto B. Jorge
Yohan Ali Diaz Mendez

uwxgi guB wplhgkQf wQlt

ugdCuB wplhgkQf wQlt

rcw{arc wgt B wplhgkQf wQlt

ctkquqB wplhgkQf wQlt

{qj cpQ : B i o ckQqo

Universidade Federal de Itajubá

Av. BPS 1303, Pinheirinho, 37500903, Minas Gerais, Itajubá, Brasil

Resumo. Neste trabalho, um problema elastostático de detecção de danos em placas é solucionado através de simulação numérica. A tensão média é avaliada em pontos de interesse da estrutura, utilizando o método de elementos de contorno (Boundary Element Method – BEM) e os parâmetros do dano são identificados a partir destas informações parciais combinadas com técnicas de otimização. Um algoritmo de evolução diferencial (Differential Evolution – DE) é utilizado para minimizar a função objetivo, que expressa o desvio entre os valores medidos (simulados) e os calculados de tensão média, para diferentes estimativas do dano. O ruído nas medições é simulado através da adição de números aleatórios normalmente distribuídos e independentes (ruídos gaussianos brancos) ao carregamento e às tensões. Nas simulações, o algoritmo apresentou bons resultados, considerando o nível de ruído estudado.

Palavras-chave: Detecção de danos, Evolução diferencial, Método de elementos de contorno, Ruído gaussiano branco.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo da detecção e identificação de danos é construir descrições quantitativas e qualitativas da deterioração de uma estrutura, a partir da medição do carregamento e da resposta estrutural [1]. Tais descrições, por sua vez, podem ser utilizadas para estimar a vida útil remanescente da peça e planejar ações de manutenção [2].

O problema direto de medição de grandezas de interesse ao longo da estrutura pode ser abordado através de simulações numéricas, utilizando técnicas convencionais como, por exemplo, o método de elementos de contorno (*Boundary Element Method* – BEM). Já o problema inverso de detecção de danos pode ser abordado, utilizando técnicas de identificação de parâmetros [2-3] ou métodos de otimização [1-5].

A detecção de danos através da evolução diferencial (*Differential Evolution* – DE), combinada com o BEM, forneceu bons resultados na identificação dos parâmetros geométricos de um dano, modelado como furo circular, em uma placa submetida a um carregamento uniaxial [5]. Porém, os autores não avaliaram a eficiência do método quanto à presença de ruídos de medição.

Neste trabalho, o problema elastostático utilizado é o mesmo estudado em [2-5]. Além disso, este estudo, também, pode ser considerado como uma continuação daquele iniciado em [5]. Sendo que, neste trabalho, o objetivo é investigar o comportamento do método de detecção de danos, perante a adição de ruídos gaussianos brancos ao carregamento e as tensões normais.

2. EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Nesta seção, apresenta-se uma breve descrição da versão clássica da evolução diferencial, adaptada de [6]. A evolução diferencial é um método estocástico de busca direta, que utiliza uma população de vetores variáveis de projeto como candidatos a ótimo. O método pode ser dividido, basicamente, em quatro etapas principais: a criação de uma população inicial; a mutação diferencial; o cruzamento (*crossover*) e a seleção.

A primeira etapa é a criação da população inicial, ou seja, NP indivíduos ou vetores soluções são criados aleatoriamente de acordo com a seguinte equação,

$$\{x_{i,G=0}\} = \{x_{\text{inf}}\} + \{rand_i\} \cdot (\{x_{\text{sup}}\} - \{x_{\text{inf}}\}) \quad (1)$$

Em que, $\{x_{i,G=0}\}$ é o i -ésimo vetor solução da população inicial (geração $G = 0$), cuja dimensão depende do número de variáveis de projeto. Os vetores $\{x_{\text{inf}}\}$, $\{x_{\text{sup}}\}$ determinam, respectivamente, os limites inferiores e superiores do processo de criação e $\{rand_i\}$ é um vetor de números aleatórios gerados no intervalo $[0,1]$. Se nada for dito em contrário, todas as variáveis aleatórias, descritas nesta seção, são determinadas de acordo com uma distribuição uniforme de probabilidades.

A segunda etapa é a mutação diferencial, que consiste em criar um vetor mutante $\{v_{i,G+1}\}$ para cada membro da população ou vetor alvo $\{x_{i,G}\}$, ($i = 1, 2, \dots, NP$), de acordo com,

$$\{v_{i,G+1}\} = \{x_{r1,G}\} + F \cdot (\{x_{r2,G}\} - \{x_{r3,G}\}) \quad (2)$$

Em que, $\{x_{r1,G}\}$, $\{x_{r2,G}\}$ e $\{x_{r3,G}\}$ são três vetores aleatoriamente selecionados da população, de modo que não sejam iguais ao vetor alvo e nem iguais entre si. O fator de escala F é uma constante que controla a amplificação da mutação, sendo determinada no intervalo $[0, 2]$.

A terceira etapa é o cruzamento, cujo objetivo é manter a diversidade da população, que consiste na combinação do vetor mutante com o vetor alvo, de acordo com a seguinte regra,

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{se } rand_j \leq CR \\ x_{ji,G} & \text{se } rand_j > CR \end{cases} \quad (3)$$

Em que, $rand_j$ é um número aleatoriamente gerado no intervalo $[0, 1]$ para cada dimensão do problema e CR é a taxa de *crossover*, especificada dentro do mesmo intervalo. O vetor $\{u_{i,G+1}\}$ recebe a denominação de vetor candidato.

A última etapa do algoritmo é a seleção por torneio, na qual dois indivíduos da população são colocados para competir entre si, o vetor alvo $\{x_{i,G}\}$ e o vetor candidato $\{u_{i,G+1}\}$. Se o último gerar um valor menor ou igual de função objetivo, este substitui o alvo na próxima geração, $\{x_{i,G+1}\} = \{u_{i,G+1}\}$. Caso contrário, o vetor candidato é descartado e, portanto, $\{x_{i,G+1}\} = \{x_{i,G}\}$.

Este processo se repete por um número determinado de iterações (gerações) ou até que um critério de convergência seja alcançado.

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção o problema de detecção de danos é apresentado. As variáveis de projeto, a função objetivo, os parâmetros de controle da DE e a modelagem dos ruídos de medição são explicitados. No programa de detecção de danos, as rotinas referentes ao método de elementos de contorno e à evolução diferencial são adaptações dos algoritmos ELCONBE [7] e DEOPT [8].

3.1. Problema Direto – Obtenção da Resposta Estrutural

No problema direto, a estrutura estudada é uma placa fina, submetida a um carregamento uniaxial constante, com um único dano modelado como um furo, livre de ação de forças externas. O material da placa é homogêneo e isotrópico, com as seguintes propriedades constitutivas: coeficiente de Poisson $\nu = 0.1$ e módulo de cisalhamento $G = 94.5$ (GPa). Na Figura 1 estão esquematizadas as condições geométricas e de contorno, considerando um dano centralizado.

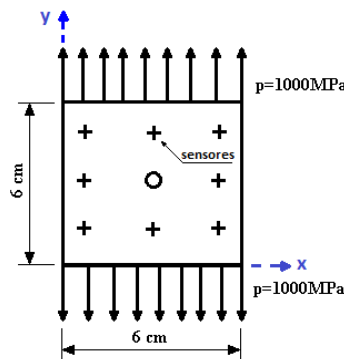


Figura 1. Condições geométricas e de contorno. Adaptado de [3].

A obtenção das tensões ao longo da placa é realizada através da abordagem elastostática do BEM. O contorno é discretizado em elementos do tipo constante, sendo 48 externos e 12 internos (dano). As tensões normais na direção x e y foram avaliadas em pontos uniformemente distribuídos ao longo da placa, que podem ser identificados pelos seguintes pares ordenados, em coordenadas cartesianas: (1,1), (3,1), (5,1), (1,3), (5,3), (1,5), (3,5) e (5,5).

3.2. Problema Inverso – Detecção do Dano

A função objetivo expressa o erro de aproximação do dano e está escrita em conformidade com o método dos mínimos quadrados, ou seja,

$$J = \frac{1}{2} \sum_i [(\sigma_x|_{sim} - \sigma_x|_{est})_i^2 + (\sigma_y|_{sim} - \sigma_y|_{est})_i^2] \quad (4)$$

Em que, σ_x e σ_y são, respectivamente, as tensões normais nas direções x e y , para os i -ésimos pontos de avaliação da placa com o dano simulado e com o dano estimado.

O dano está modelado como um furo circular e, portanto, cada indivíduo apresenta três componentes ou variáveis de projeto: as coordenadas cartesianas (x_c, y_c) de centro e o raio r do círculo. A população inicial foi criada aleatoriamente de acordo com a Eq. (1), obedecendo aos seguintes limites: $1.0 \leq x \leq 5.0$; $1.0 \leq y \leq 5.0$ e $0.1 \leq r \leq 0.5$.

Os parâmetros de controle adotados foram o fator de escala $F = 0.8$; a constante de crossover $CR = 0.9$ e o tamanho da população $NP = 30$. Os critérios de parada empregados foram um valor de função objetivo menor ou igual a 10^{-3} ou um número máximo de 75 gerações.

3.3. Simulação de ruídos nas Medições

A presença de ruídos nos sinais de sensores é inevitável e, na prática, estes estão inclusos tanto nas medições do carregamento, como da resposta estrutural. Então, para simular medições reais, um ruído gaussiano branco foi adicionado aos valores das tensões fornecidas pela rotina de BEM, nos i -ésimos pontos de avaliação, de acordo com,

$$\sigma^i|_{ruído} = \sigma^i|_{sim} (1 + randn_i \cdot n) \quad (5)$$

Em que, $randn_i$ é um número aleatório normalmente distribuído com média zero e desvio padrão igual a um, $N(0,1)$. A variável n controla a intensidade do ruído, em termos percentuais.

O carregamento aplicado na placa danificada também precisa ser medido, pois este é um dado de entrada para o modelo, no qual serão testadas diferentes estimativas para o dano. Então, para simular a medição real do carregamento, um ruído gaussiano branco foi adicionado ao carregamento utilizado na simulação da placa danificada, antes deste ser aplicado ao modelo. As medições ruidosas foram obtidas de maneira similar a descrita na Eq. (5).

4. RESULTADOS

A evolução diferencial apresenta processos estocásticos ao longo de suas iterações e, portanto, resultados diferentes podem ser obtidos em cada uma das execuções do programa de

detecção. Sendo assim, as médias aritméticas das estimativas de cada parâmetro geométrico do dano, considerando dez execuções independentes do programa, irão representar os resultados numéricos obtidos.

Três experimentos foram realizados para investigar o comportamento do método: no primeiro, avaliou-se a influência dos ruídos nas medições do carregamento; no segundo, considerou-se ruído apenas na tensão e no terceiro, em ambas as medições. Em todos os experimentos, um furo de raio $r = 0.24$ (cm) foi simulado em duas posições, (3, 3) e (2, 2).

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados considerando um ruído de 0.5% no carregamento; na Tabela 2, um ruído de 0.5% nas tensões normais σ_x e σ_y ; na Tabela 3, um ruído de 0.5% tanto na medição do carregamento, como das tensões.

Tabela 1. Resultados para um ruído de 0.5% na medição do carregamento.

	x (cm)	y (cm)	r (cm)	x (cm)	y (cm)	r (cm)
Dano simulado	3.0000	3.0000	0.2400	2.0000	2.0000	0.2400
Média das soluções	3.0008	2.9991	0.2386	2.0012	2.0003	0.2408
Erro (%)	0.03%	0.03%	0.59%	0.06%	0.01%	0.34%

Tabela 2. Resultados para um ruído de 0.5% na medição da tensão normal σ_x e σ_y .

	x (cm)	y (cm)	r (cm)	x (cm)	y (cm)	r (cm)
Dano simulado	3.0000	3.0000	0.2400	2.0000	2.0000	0.2400
Média das soluções	3.0363	2.9845	0.2403	1.9949	2.0071	0.2394
Erro (%)	1.21%	0.52%	0.13%	0.26%	0.36%	0.24%

Tabela 3. Resultados para um ruído de 0.5% na medição do carregamento e tensão normal σ_x e σ_y .

	x (cm)	y (cm)	r (cm)	x (cm)	y (cm)	r (cm)
Dano simulado	3.0000	3.0000	0.2400	2.0000	2.0000	0.2400
Média das soluções	2.9503	3.0325	0.2435	1.9792	2.0197	0.2381
Erro (%)	1.66%	1.08%	1.44%	1.04%	0.98%	0.77%

5. CONCLUSÕES

Os resultados das simulações mostram que o programa de detecção de danos através de DE, combinado com o BEM, consegue identificar os parâmetros geométricos de um dano modelado como furo circular com boa precisão, considerando ruídos gaussianos brancos de 0.5% nas medições do carregamento e da tensão normal.

No caso de o ruído estar apenas no carregamento, Tabela 1, as estimativas do raio do furo são menos precisas entre todos os três parâmetros, em ambas as localizações testadas para o dano. Observou-se ainda que, quando há adição do ruído ao carregamento faz com que este seja menor do que aquele que é realmente aplicado, de forma que o raio do furo é superestimado. Quando a adição do ruído causa o efeito contrario, o raio do furo é subestimado.

No caso de o ruído estar apenas na medição da tensão normal σ_x e σ_y , Tabela 2, os resultados do dano localizado em (3,3) são inferiores. Uma possível explicação seria a maior distância dos pontos de avaliação (posicionamento dos sensores simulados).

No caso em que há ruído tanto nas medições do carregamento, como da tensão normal σ_x e σ_y , Tabela 3, os erros nas estimativas de todos os parâmetros são maiores quando comparados aos resultados da Tabela 1 e Tabela 2. Isto pode indicar que os efeitos dos ruídos são aditivos, ou seja, a influência dos ruídos combinados é maior do que a influência dos mesmos, quando estes estão isolados, na estimativa do dano.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

- [1] CHOU, J. H., GHABOUSSI, J., Genetic Algorithm in Structural Damage Detection. In *Computers and Structures*, vol. 79, pp. 1335-1353, 2001.
- [2] LOPES, P. S., JORGE, A. B., CUNHA JR, S. S., Detection of holes in a plate using global optimization and parameter identification techniques. *International Conference on Engineering Optimization – EngOpt*, 2008.
- [3] LOPES, P. S., JORGE, A. B., CUNHA JR, S. S., Detection of holes in a plate using global optimization and parameter identification techniques. In *Inverse Problems in Science and Engineering*, vol. 18, n. 4, pp. 439-463, 2010.
- [4] JORGE, A. B., LOPES, P. S., LOPES, M. E., On the use of Boundary Element Methods for Inverse Problems of Damage Detection in Structures. In Abascal, R., Aliabadi, M. H., eds, *Advances in Boundary Element Techniques IX*, pp. 301-307. ECItd, 2008.
- [5] SUVEGES, J. M. C., CUNHA JR, S. S., ALEXANDRINO, P. S. L., JORGE, A. B., Modelagem de Problemas Inversos de Detecção de Danos através de Evolução Diferencial. *XXXIV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, 2013.
- [6] STORN, R., PRICE, K., Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. In *Journal of Global Optimization*, vol. 11, pp. 341-359, 1997.
- [7] BREBBIA, C. A., DOMINGUEZ, J., *Boundary Elements – An Introductory Course*, 2nd ed. McGraw-Hill, 1992.
- [8] PRICE, K., STORN, R., *Differential Evolution for Continuous Function Optimization (an algorithm by Kenneth Price and Rainer Storn)*, 2005. Disponível em: <<http://www.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html>>. Acesso em: 06 mai. 2013.

DISEÑO DE UN HELIÓSTATO EMPLEANDO TÉCNICAS COMPUTACIONALES

Chacón Rubén

rdchacon@ula.ve

Provenzano Sebastián

Dávila Luís

Barboza Santiago

Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Grupo DIMMA. La Hechicera, Mérida 5101, Venezuela.

Bongiorno Francisco

frabon@ula.ve

Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica, Grupo GIGA. La Hechicera, Mérida 5101, Venezuela

Resumen. *En el presente trabajo se explica el procedimiento empleado en el diseño de un helióstato, para ser utilizado en el Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA), en el cual se han empleado herramientas computacionales de CAD-CAE. Esto permite la interacción entre las dos disciplinas involucradas, ingeniería mecánica y astronomía, y que a su vez se realice de una manera más fluida. En el diseño se han tomado en cuenta, como requerimientos de partida, que todos los materiales fuesen fáciles de adquirir y que sus partes, no ópticas, pudieran ser fabricadas en un taller de metalmecánica de nivel medio. Esto con el objetivo de reducir el costo y aumentar la factibilidad de ser construido en zonas tecnológicamente poco desarrolladas. Los resultados obtenidos de los programas computacionales se validan por medio de comparaciones con los hallados analíticamente, obteniéndose un instrumento que cumple con todos los requerimientos planteados.*

Palabras claves: Helióstato, CAD-CAE, Ingeniería Mecánica y Astronomía.

1. INTRODUCCION

Un Helióstato consiste básicamente en una montura que sostiene a un espejo plano denominado "espejo primario", el cual gira sobre el eje polar siguiendo el sol durante el movimiento de la tierra. El espejo refleja el haz de luz solar en una dirección fija, independientemente del movimiento aparente del sol en el cielo. Esta sencillez ha sido

aprovechada por diversos investigadores para utilizarlos en forma de arreglos con el fin de concentrar la luz del sol en una pequeña área, lo cual permite aprovechar la energía solar en diferentes aplicaciones. [1] y [2].

Un primer requerimiento a tomar en cuenta es que el Helióstato debe ser diseñado de forma tal que la rigidez estructural minimice las deformaciones elásticas que pudieran generarse durante su operación; esto para prevenir el desvío de la imagen proyectada. El aumento de la rigidez del Helióstato debe realizarse tomando en cuenta el compromiso que existe entre la rigidez estructural y el peso del aparato, todo con el fin de no incrementar excesivamente su peso. Otro aspecto a tomar en cuenta, es que el helióstato se mueve a muy baja velocidad, 1rev/24hr (0,000694 rpm), para lo cual se requiere un sistema de transmisión que reduzca la velocidad del motor al valor mencionado.

2. METOLOGÍA

Para el diseño del Helióstato se emplea el software CAD/CAE, específicamente los programas Autodesk Inventor y Visual Nastran 4D. El uso de estos programas permite una interacción entre las fases del diseño: definición del problema, generación de alternativas de solución y desarrollo de la mejor alternativa, empleándose el software como una herramienta de apoyo, tal y como marcan las tendencias de diseño computacional en la actualidad [3].

El programa Autodesk Inventor se emplea para realizar el modelado geométrico del instrumento, permitiendo la interacción con los astrónomos. Por otro lado, el programa Visual Nastran 4D se emplea para hacer los cálculos numéricos, mediante el método de elementos finitos, los cuales facilitan el procedimiento de hallar las formas y dimensiones de las diferentes partes del instrumento, cumpliendo con los requerimientos de rigidez que se plantearon al inicio del proyecto. Los resultados de este programa numérico se mejoran y perfeccionan por medio de técnicas de convergencia h-adaptativa, los cuales luego han sido comparados con resultados teóricos en puntos cuidadosamente seleccionados. Este programa interactúa con el programa Autodesk Inventor, ya que las geometrías generadas en este último, son leídas sin problemas, lo cual facilita el proceso iterativo de diseño.

En este proyecto fue utilizada la versión Inventor Professional 10, anexamente el programa Visual Nastran cuenta con un módulo FEA (análisis por elementos finitos), que permite realizar el estudio del estado de esfuerzos al que están sometidos las piezas que conforman el mecanismo. El programa viene dotado de una herramienta de refinado de malla, la cual automáticamente incrementa el número de elementos en las zonas de concentración de esfuerzos y geometría compleja, esto constituye una técnica que tiene como finalidad la disminución del error o discrepancia entre el resultado del método de elementos finitos y el estado real de esfuerzos. Una gran ventaja de este software es que permite hacer un análisis tanto estático como dinámico, es decir permite estudiar el estado de esfuerzos en las piezas del sistema en reposo y/o durante el movimiento, lo que no es posible en la mayoría de los programas de elementos finitos.

El diseño se inicia con la búsqueda de información sobre heliostatos existentes con el fin de obtener una idea base sobre geometría, dimensiones, materiales y alternativas de configuraciones. Para posteriormente tomar las directrices y lineamientos a seguir en nuestro diseño, seleccionando la alternativa que más se acerque a las necesidades del CIDA.

El sistema de transmisión es uno de los aspectos más importantes del diseño del Helióstato debido a la baja velocidad de rotación requerida para el seguimiento del sol durante el día (1

rev/24 hr). Se realizará tomando en cuenta principalmente esta velocidad de rotación del eje y la velocidad de operación de motores disponibles para esta aplicación. Una vez definida la geometría del prototipo tomando en cuenta las correcciones y sugerencias aportadas por el personal del CIDA, se utiliza el programa Visual Nastran 4D y su módulo de elementos finitos para el estudio de esfuerzos y deformaciones. De esta manera se puede observar el estado de carga al que están sometidas las piezas y verificar que las deformaciones se mantengan dentro de un rango aceptable para el buen funcionamiento del Helióstato desde el punto de vista óptico.

Para verificar los resultados obtenidos con el Visual Nastran se realizaron cálculos analíticos de los componentes más críticos del Helióstato, tales como: el pasador de inclinación, el eje principal, el soporte del espejo, el pasador largo del espejo y el soporte de la transmisión, los factores de seguridad, los esfuerzos a los que están sometidos y la cantidad de nodos de cada uno de estos elementos, según el programa, se pueden observar en la tabla 1. Esto con la finalidad de asegurar que el procedimiento realizado en el análisis por elementos finitos es el correcto, este procedimiento involucra las restricciones de movimiento, el mallado de las piezas y el porcentaje de error que arroja el programa, entre otros aspectos importantes que influyen en los resultados obtenidos del programa.

En la figura 1 se esquematiza el proceso de modelado virtual y análisis de esfuerzos seguido durante el diseño del Helióstato.

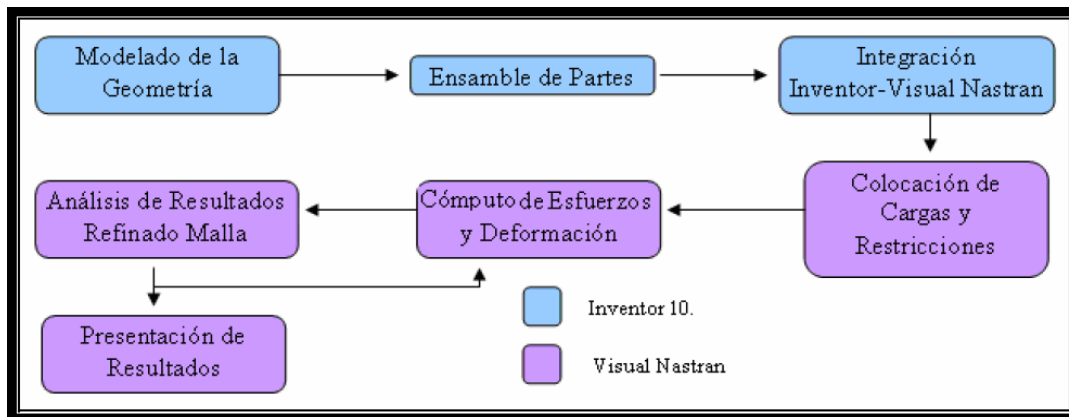


Fig. 1. Flujograma del Proceso de Modelado y Análisis.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA DESARROLLADA.

Luego del proceso de planteamiento de alternativas y selección de la más adecuada, se escogió la alternativa planteada en la Fig. 2, en total acuerdo con el personal del CIDA. Para este estudio de alternativas se realiza una revisión del estado del arte y se encuentran los autores siguientes: [4]. (Manly, 1991), [5]. (Stix, 1989) y [6]. (Sinnot, 2005). Es de resaltar que la alternativa seleccionada requiere del diseño de diversos mecanismos que permiten la proyección de la imagen del sol en un punto fijo a lo largo del día y durante todo el año. En la Fig. 2 se muestran los mecanismos necesarios para el funcionamiento del helióstato.

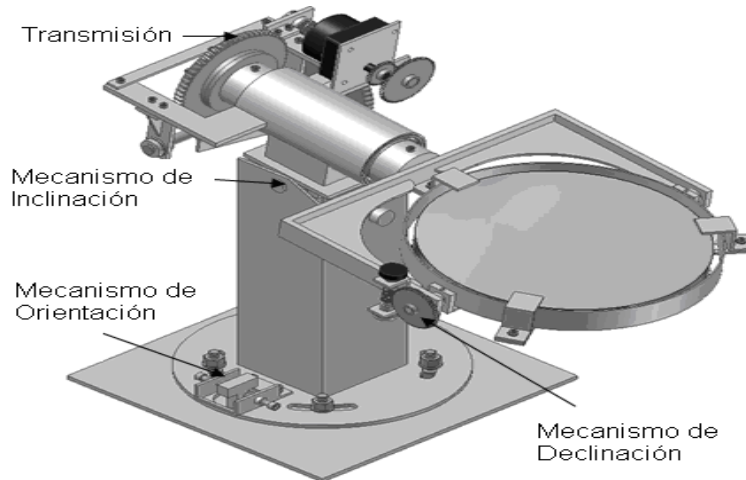


Fig. 2. Mecanismos Principales del Helióstato

El sistema de transmisión, que se detalla en la figura 3, es el principal mecanismo del Helióstato, ya que éste permite girar el eje del Helióstato a la velocidad necesaria para el seguimiento del sol, $1 \text{ rev}/24 \text{ hr}$ ($0,000694 \text{ rpm}$), reduciendo la velocidad del motor 7200 veces (5 rpm para éste caso). Para lograr esta relación de transmisión en poco espacio, se emplean dos pares de engranajes de tornillo sinfín y un par de engranajes de dientes rectos. Por último, el mecanismo de declinación permite la orientación del espejo para compensar la declinación del sol durante el año y consiste en una pareja de engranajes de tornillo sinfín.

Adicionalmente, el Helióstato presenta un mecanismo de desacople (embrague) que permite mover el espejo de forma manual, independientemente de la transmisión, este consiste en dos discos de fricción de acción axial que transmiten el torque necesario para mover el espejo mediante la fuerza ejercida por un resorte.

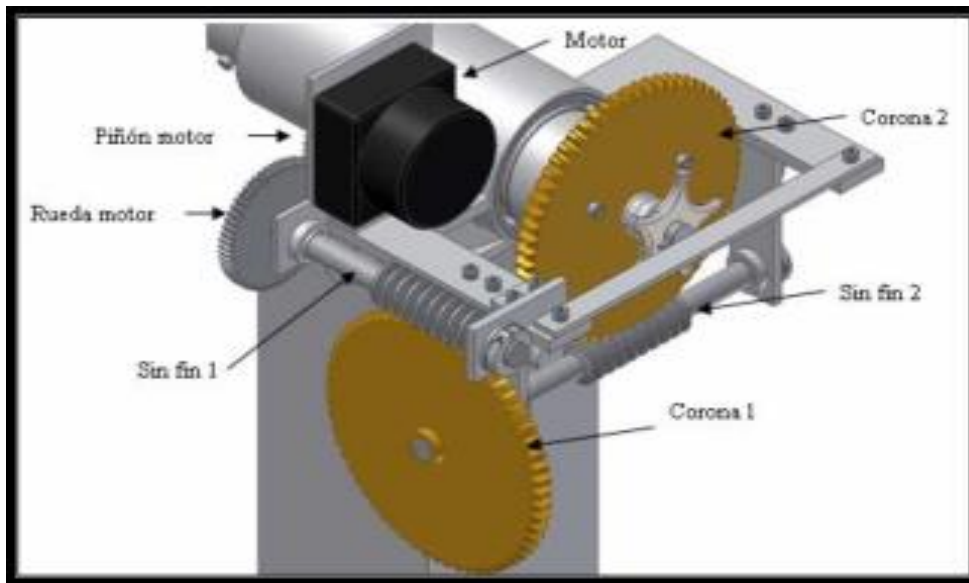


Fig. 3. Sistema de transmisión del Helióstato.

4. ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.

Como se ha mencionado, el análisis de esfuerzos y deformaciones estructurales de las diversas piezas que componen el instrumento, se realiza con la ayuda del programa Visual Nastran 4D, empleando la geometría generada por el programa Autodesk Inventor. Se realiza un proceso de cálculo de esfuerzos y deformaciones para cada pieza, en el cual el mallado se refina a lo largo de un proceso iterativo que busca la disminución del error estructural de la malla, haciéndose más denso en las zonas de concentración de esfuerzos y geometría compleja. Para observar la tendencia de los esfuerzos en el proceso h-adaptativo, se eligen puntos de control en cada una de las piezas, en base a éstos se controla la convergencia del proceso. Una gráfica de esfuerzo (en el punto de estudio) contra el número de nodos del mallado de cada iteración, representa la convergencia del valor del esfuerzo, es decir, con dicha gráfica se constata que el valor del esfuerzo, luego de un cierto grado de refinamiento de malla, es independiente de la cantidad de nodos. Igualmente se realiza un estudio de deformación en las piezas en las que se considera que la deformación ocasionada por la operación del helióstato, puede afectar la proyección de la imagen. Producto de estos análisis, se observa que la pieza que en mayor grado puede afectar el enfoque, es el soporte del espejo. Cabe destacar que los valores de deformación en la posición inicial y media del espejo no afectan la proyección de la imagen del sol; es la diferencia que existe entre ellos la que posiblemente afecte la proyección de la imagen, ya que se produce por la variación del estado de carga debido al movimiento. De la diferencia de estos valores se obtiene, que el desplazamiento que posiblemente afecte el enfoque del Helióstato, es de solo 0,31 mm. En la Figura 4 y Figura 5 se muestran los resultados del estudio de esfuerzos para la pieza "soporte de espejo". Igualmente, en la Figura 6 se muestra la gráfica de convergencia en un punto de control en la misma pieza. Por último, en la Tabla 1 se muestran el número final de nodos que se emplearon en los análisis, los esfuerzos de Von-Mises en los puntos críticos y el factor de seguridad asociado, todo ello para las piezas de mayor importancia.

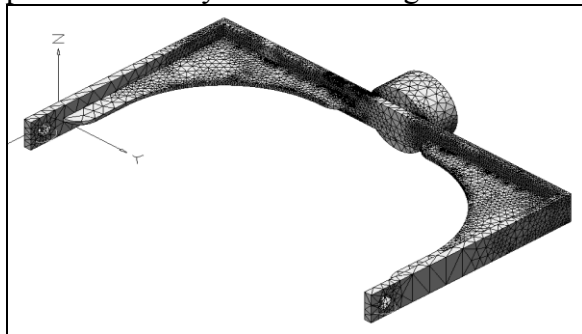


Fig. 4. Mallado final del soporte

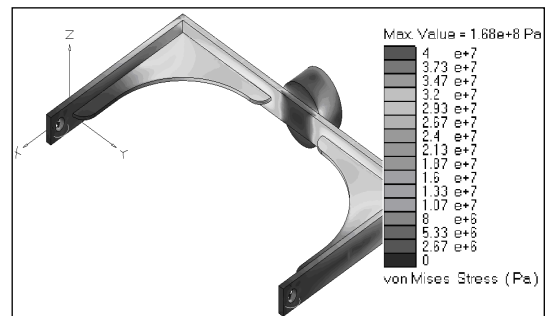


Fig. 5. Esfuerzos en el soporte

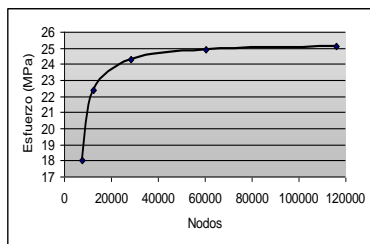


Fig. 6. Convergencia en el Soporte

Tabla 1. Resultados de los componentes estudiados

Componente	Nº de Nodos	Esfuerzo (MPa)	Factor de Seguridad
Pasador de Inclinación	64260	15,4	16,23
Eje Principal	116648	3,7	54,05
Soporte del Espejo	115962	25,1	9,84
Pasador Largo del Espejo	80338	5,93	42,16
Soporte	113862	5,52	45,29

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra el procedimiento empleado para diseñar un Helióstato, el cual puede ser construido empleando materiales económicos y de fácil adquisición en el país, cumpliendo con el principal criterio de diseño planteado por el CIDA al inicio del proyecto, tal como es la rigidez de la estructura (poca deformación). El diseño se realizó utilizando herramientas computacionales CAD/CAE, las cuales permitieron una excelente interacción interdisciplinaria, por medio del prototipo virtual, lo que facilitó la elección y desarrollo de la alternativa de solución planteada.

Se realizaron estudios de esfuerzos y deformaciones de los componentes que se consideran críticos, estableciendo las restricciones y estados de carga cercanos a la realidad, los cuales fueron validados al confrontarlos con resultados analíticos.

Los factores de seguridad de los elementos mostrados en la tabla 1, son relativamente altos, debido a la necesidad de darle una mayor rigidez a la estructura, para garantizar su funcionamiento. La rigidez estructural del instrumento diseñado, garantiza un desplazamiento máximo de 0,31 mm en el espejo, lo cual permite la formación de una imagen solar de excelente calidad.

El sistema de transmisión se diseñó empleando engranajes cilíndricos de dientes rectos y conjuntos tornillo sinfín-corona, lográndose la reducción necesaria para la operación del Helióstato con una velocidad de entrada de 5 rpm.

REFERENCIAS

- [1]. Kribus A, Vishevetsky I, Meri M, Yogev A y Sytnik A, 2004. Continuous Tracking of Heliostats of Solar Energy Eng. Volume 126, Issue 3, pp.842-850. Goossens, M., Mittelbach, F., & Samarin, A., *The LaTeX Companion*. Addison-Wesley, 2004.
- [2]. Vazquez J, Relloso S, Domingo, M, Valverde A, Monterreal R y García G, 2006, Sener Heliostat
- [3]. Bernal JC, 2004, Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa. Tesis de Doctorado, D. de Proyectos de Ingeniería, U. Politécnica de Cataluña.
- [4]. Manly P, 1991, Unusual Telescopes, Cambridge University. New York.
- [5]. Stix M, 1989, The Sun, Springer-Verlag, Berlin.
- [6]. Sinnot, 2005, Design and Testing. Solar PACES, A6-S4, Sevilla-España.

ESTRATEGIA METODOLÓGICA PARA LA MULTIPLICACIÓN MATRIZ DISPERSA –MATRIZ DISPERSA, MEDIANTE EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PARALELA ZPL

Edwin Vargas
Enrique Flores
Eduardo Vargas
Demetrio Rey

vargase@uc.edu.ve

evflores@uc.edu.ve

eevargascano@yahoo.es

drey@uc.edu.ve

Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Bárbula-Naguanagua, Código Postal 2008. Estado Carabobo, Venezuela. Teléfono: (58-241) 8672710 Extensión 264.

Resumen. *En el presente trabajo se desarrolló una estrategia metodológica para el cálculo de la multiplicación Matriz Dispersa-Matriz Dispersa. La estrategia se fundamentó principalmente en caracterizar el cómputo como operaciones globales de alto nivel efectuadas sobre los componentes vectoriales de la representación dispersa utilizada. Se utilizó el lenguaje de programación paralela ZPL, analizando los diferentes grados de dispersión y distintos órdenes de la matriz. Dado que las operaciones se expresaron mediante los operadores paralelos del lenguaje, el código resultante corre en arquitecturas secuenciales y paralelas por igual. Por medio de la metodología desarrollada, se obtuvo como resultado la disminución del tiempo de ejecución a medida que se aumenta el número de procesadores, lo que indica la escalabilidad del programa.*

Palabras Claves: Matriz Dispersa, Programación Paralela, ZPL

1. INTRODUCCIÓN

La estrategia metodológica para el cálculo de la Multiplicación Matriz Dispersa – Matriz Dispersa, mediante el lenguaje de programación paralela ZPL, busca la disminución en el tiempo de ejecución, ya que se trabaja solo con los elementos no nulos de la matriz, debido a que el formato de almacenamiento de la Matriz Dispersa es en esquema coordinado.

El desarrollo de la Multiplicación Matriz Dispersa – Matriz Dispersa, involucra gran cantidad de operaciones con matrices y vectores. Como el lenguaje de programación ZPL es un lenguaje orientado a operaciones con vectores y matrices que presenta buen desempeño tanto en computadoras secuenciales como en computadoras paralelas [1] se escogió el mismo para realizar las pruebas.

2. PROGRAMACIÓN PARALELA Y UNA INTRODUCCIÓN AL LENGUAJE ZPL

La programación paralela consiste en el uso de múltiples computadores, o de computadores con múltiples procesadores internos, para resolver un problema a alta velocidad. El paralelismo puede enfocarse hacia la arquitectura (procesadores de memoria compartida, multiprocesadores de paso de mensajes), o hacia la programación (paralelismo de datos, paralelismo de tareas). Las técnicas de programación en esta área pueden clasificarse en paralelismo explícito (el programador es quien define el paralelismo dentro del programa) o paralelismo implícito (es el lenguaje de programación quien define el paralelismo) [1].

3. ESTRATEGIA METODOLOGICA PARA LA MULTIPLICACION MATRIZ DISPERSA –MATRIZ DISPERSA EN EL LENGUAJE DE PROGRAMACION ZPL.

A continuación se describe en 5 pasos y mediante un ejemplo didáctico la metodología planteada para multiplicar una matriz dispersa (A) por una matriz dispersa (B) bajo el lenguaje de programación ZPL. Para el ejemplo, se tienen la matriz A, la matriz B y la matriz resultado A·B dados a continuación:

$$A = \begin{pmatrix} a & 0 & b \\ 0 & c & 0 \\ d & 0 & 0 \end{pmatrix} ; \quad B = \begin{pmatrix} e & k & 0 \\ 0 & 0 & i \\ 0 & h & f \end{pmatrix} ; \quad A \cdot B = \begin{pmatrix} ae & ak + bh & bf \\ 0 & 0 & ci \\ de & dk & 0 \end{pmatrix}$$

Las matrices A y B, almacenadas en formato coordinado, quedan expresadas así:

VALA	a	d	c	b
FILA	1	3	2	1
COLA	1	1	2	3

VALB	e	k	h	i	f
FILB	1	1	3	2	3
COLB	1	2	2	3	3

Donde los vectores VALA, FILA, COLA, VALB, FILB y COLB son los vectores que contienen los valores distintos de ceros, el número de fila y columna de cada uno de los elementos no nulos de las matrices A y B respectivamente.

Paso 1. Se realiza un flooding a los vectores VALA (A_{fl}), COLA ($COLA_{fl}$), VALB (B_{fl}) y FILB ($FILB_{fl}$), los dos primeros sobre la dimensión de VALB y los dos últimos sobre la dimensión de VALA, quedando como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Flooding de los Vectores VALA, COLA, VALB y FILB.

Flooding de VALA $A_{fl} = \begin{pmatrix} a & d & c & b \\ a & d & c & b \\ a & d & c & b \\ a & d & c & b \\ a & d & c & b \end{pmatrix}$	Flooding de COLA $COLA_{fl} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$	Flooding de VALB $B_{fl} = \begin{pmatrix} e & e & e & e \\ k & k & k & k \\ h & h & h & h \\ i & i & i & i \\ f & f & f & f \end{pmatrix}$	Flooding de FILB $FILB_{fl} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 3 \end{pmatrix}$
---	--	---	--

Paso 2. Se multiplican los flooding de los vectores VALA (A_{fl}) y VALB (B_{fl}), para los cuales los valores de los flooding de COLA ($COLA_{fl}$) y FILB ($FILB_{fl}$) son iguales, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Multiplicación de los flooding de los vectores VALA y COLA

$$\begin{array}{l}
 \text{Multiplicación } A_n * B_n \\
 A_{fl} * B_{fl} = \begin{pmatrix} ae & de & ce & be \\ ak & dk & ck & bk \\ ah & dh & ch & bh \\ ai & di & ci & bi \\ af & df & cf & bf \end{pmatrix} \\
 \\
 \text{Multiplicación } T = A_n * B_n * (COLA_n = FILB_n) \\
 T = \begin{pmatrix} ae & de & 0 & 0 \\ ak & dk & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & bh \\ 0 & 0 & ci & 0 \\ 0 & 0 & 0 & bf \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Paso 3. Se reduce el arreglo T a vectores de dimensión igual número de elementos no nulos de A que contienen los valores de los elementos de cada columna de la matriz resultado A*B, cada vector estará conformado de los valores de las filas de T que indique el vector COLB, esto es, el primer vector (columna 1 de A*B) estará conformado por la suma término a término de las filas de T donde el vector COLB tenga valores iguales a 1 y así sucesivamente, hasta obtener todas las columnas de A*B. El ejemplo didáctico, queda como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. Reducción del arreglo T a vectores que contienen los elementos de las columnas de A*B

COLB	T				Elementos de las Columnas de A*B
1	ae	de	0	0	[ae de 0 0]
2	ak	dk	0	0	[ak dk 0 bh]
2	0	0	0	bh	
3	0	0	ci	0	[0 0 ci bf]
3	0	0	0	bf	

Paso 4. Obtener los vectores resultado (RES) que corresponden a las columnas de A*B de dimensión igual a las filas de la matriz A, tomando como referencia las componentes del vector FILA, el cual contiene en cada componente un número que equivale a la posición que tendrán las componentes de los vectores columnas en los vectores RES, como se indica en la tabla 4.

Tabla 4. Obtención de los vectores columnas de A*B

	COLUMNAS DE A*B (RES)				
COLUMNA 1	[ae	de	0	0]	→ [ae 0 de]
COLUMNA 2	[ak	dk	0	bh]	→ [ak + bh 0 dk]
COLUMNA 3	[0	0	ci	bf]	→ [bf ci 0]
FILA	[1	3	2	1]	

Paso 5. Se Obtiene la matriz resultado en formato coordenado, quedando como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Matriz Resultado $C = A*B$ en formato coordenado.

$$\begin{aligned} VALC &= [ae & de & ak + bh & dk & bf & ci] \\ FILC &= [1 & 3 & 1 & 3 & 1 & 2] \\ COLC &= [1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3] \end{aligned}$$

De esta manera, queda expresada la metodología planteada de multiplicación matriz dispersa – vector, mediante el lenguaje de programación ZPL.

4. ALGORITMO DE MULTIPLICACION MATRIZ DISPERSA – MATRIZ DISPERSA EN ZPL

La programación de una aplicación paralela en ZPL consta de dos partes fundamentales, la configuración y definición de variables y regiones y la codificación del algoritmo haciendo uso de los operadores que hagan el uso más eficiente de la máquina paralela.

4.1. Configuración y definición de Variables y Regiones.

La configuración y definición de variables consta de cuatro secciones: las variables de configuración (config var), la definición de las regiones, los tipos de datos a utilizar en el programa (type) y las variables a usar en el programa (var).

Las variables de configuración (config var) son aquellos datos de entrada que se pueden modificar en el momento de invocar la ejecución del programa, para este caso se definió como variable de configuración: el tamaño del vector y el número de elementos no nulos de la matriz que se va a procesar. Luego se definieron tres regiones: la primera (R) conforma el espacio (filas y columnas) donde reside primariamente la matriz, luego se definieron dos regiones, una para la manipulación de vectores tipo fila (filas) y otra para el manejo de vectores tipo columna (columna). Y por último, los tipos de datos a utilizar en el programa (type) y las variables a usar en el programa (var).

4.2. Código del algoritmo paralelo

El algoritmo para realizar la Multiplicación de una Matriz Dispersa - Matriz Dispersa, bajo el lenguaje de programación ZPL, es el mostrado en la Figura 1.

5. EXPERIMENTACIÓN

5.1. Datos

Las matrices a utilizar, se generaron aleatoriamente, con elementos de tipo integer. La dimensión de las mismas para los casos de prueba fueron: 500x500 y 1000x1000

5.2. Plataforma Computacional

Todas las pruebas se desarrollaron en el cluster CAMORUCO de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, el cual posee las siguientes características: Altus 1804 | 4 Procesadores Quad Opteron 6128 8C, 2.0GHz | 128GB, DDR3-1333 (32 x 4GB) | 1TB SATA2 | HCA Mellanox 1-pt QSFP DDR | CentOS 6

```

/* Flooding de los valores del Matriz A y la
matriz B */
[* ,1..nza] fVA := >>[1,1..nza]VALA;
[* ,1..nza] fCA := >>[1,1..nza]COLA;
[1..nzb,*] fVB := >>[1..nzb,1]VALB;
[1..nzb,*] fFB := >>[1..nzb,1]FILB;
[1..nzb,*] fCB := >>[1..nzb,1]COLB;
[1..nzb,1..nza] T := fVA*fVB*(fCA=fFB);
    for i := 1 to na do
[1..nzb,1..nza] Taux1 := T*(i=fCB);
[1,1..nza] TV :=
+<<[1..nzb,1..nza]Taux1;
    outfile := open("salida.txt",
"w");
[1,1..nza] write(outfile," ", TV);
close(outfile);
infile := open("salida.txt", "r");
[1..nza] read(infile, TT);
close(infile);

for j := 1 to na do
[1..nza] Taux := TT*(j=FILE);
[j] RES := +<<[1..nza]Taux;
end;
outfile := open("RES.txt",
"a+");
[1..na] write(outfile," ", RES);
close(outfile);
end;
nn:= ma*nb;
infile := open("RES.txt", "r");
[1..nn] read(infile, C);
close(infile);
    
```

Figura 1. Implementación del algoritmo de Multiplicación Matriz Dispersa - Vector

6. RESULTADOS

En la tabla 6 se observa el tiempo de ejecución, medido en segundos del algoritmo implementado. En la figura 2 se grafican los resultados de los tiempos de ejecución de mostrados en tabla 6.

Tabla 6. Tiempo de Ejecución para matrices de 500 x 500 y 1000 x 1000

Tipo de Matriz	MATRIZ 500 x 500					MATRIZ 1000 x 1000				
	NUMERO DE PROCESADORES					NUMERO DE PROCESADORES				
	2	4	8	16	32	2	4	8	16	32
Diagonal	2,604	3,0681	3,1572	3,6581	3,9419	22,8313	23,7265	20,6379	17,0873	13,7309
Tridiagonal	11,2283	13,8809	12,3238	8,7226	9,2613	120,9725	111,046	52,323	36,7857	28,1693
Pentadiagonal	24,7838	63,7448	19,7429	11,7084	9,8102	338,3953	173,8833	80,3667	58,886	34,9534

En las figura 2, se observa como el tiempo de ejecución disminuye cuando se incrementa el número de procesadores y la matriz tiene mayor cantidad de elementos.

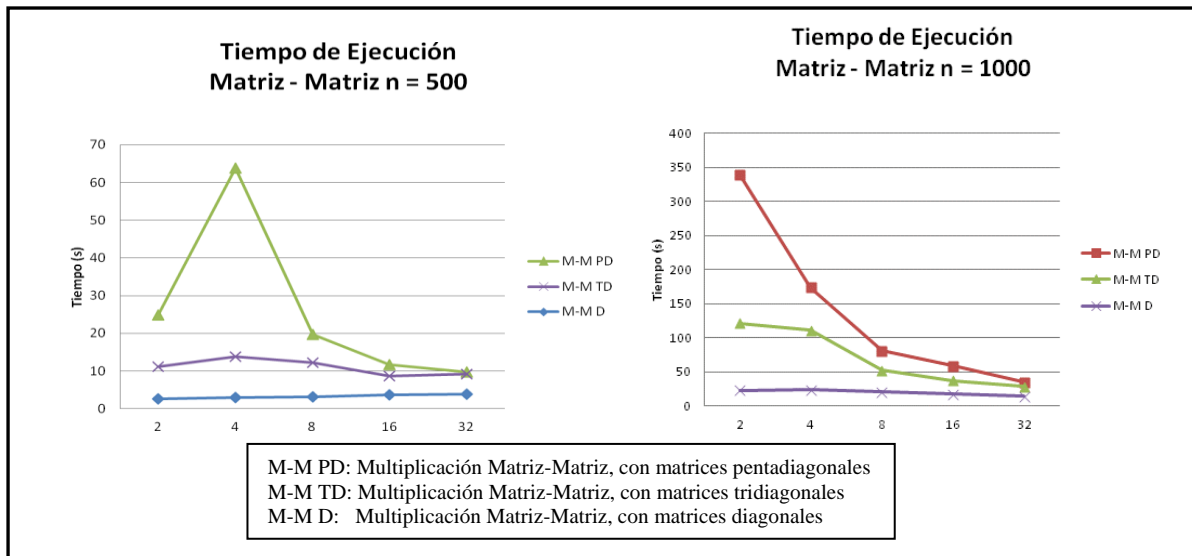


Figura 2. Tiempo de Ejecución Matriz 500x500 Y 1000x1000.

7. CONCLUSIONES

Se presentó una metodología para la Multiplicación Matriz Dispersa – Matriz Dispersa mediante un algoritmo basado en los conceptos claves del lenguaje de programación paralelo ZPL como lo son el uso de regiones y los operadores paralelos.

Las curvas de tiempo de ejecución de las matrices de prueba se observa una clara disminución del tiempo de ejecución a medida que se aumenta el número de procesadores, lo cual demuestra que la implementación hace buen uso de la comunicación entre procesadores.

También se puede evidenciar, que a medida que se aumenta el tamaño de la matriz, ZPL permite mejorar el desempeño en cuanto al factor de aceleración.

8. REFERENCIAS

- [1] Rey, D. y Canning, J. *Streams: Una Librería de Habilitación de Paralelismo Mixto de Tareas en Cascada y Paralelismo de Datos para el Lenguaje Paralelo de Alto Nivel ZPL*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela. 2007.
- [2] Snyder, L. *A programmer's Guide to ZPL*. The MIT Press. 1999.
- [3] Castellano, J., Ramírez, J. y Rey, D. *Paralelización de la Factorización LU usando el Lenguaje ZPL*. Instituto de Matemática y Calculo Aplicado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela. 2007.

SIMULADOR DIDÁCTICO DEL FUNCIONAMIENTO DE MEMORIAS CACHÉ

Asbel Parra

Dahyana Nimo

Edgar Vásquez

Jhon Edgar Amaya

asbel.parra@unet.edu.ve

dnimo@unet.edu.ve

evasquez@unet.edu.ve

jedgar@unet.edu.ve

Decanato de Docencia, Universidad Nacional Experimental del Táchira

Av. Universidad, Paramillo, San Cristóbal-Venezuela

Resumen. *La propuesta de implementar un simulador para el análisis del funcionamiento de las memorias caché para los estudiantes que cursan organización del computador de ingeniería en informática de la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), se enfocó en brindar una herramienta de estudio didáctica implementada en ambiente web, la cual cuenta con demostraciones gráficas sobre la interacción entre la memoria caché, la memoria RAM y el procesador haciendo seguimiento de las referencias de memoria, dando detalles de las tasas de acierto, haciendo uso de las políticas de ubicación y de reemplazo existentes. El simulador fue desarrollado con técnicas de simulación de eventos discretos. Se utilizó el método de desarrollo de sistemas dinámicos (MSDS) para la construcción de sistema. Además se utilizó como framework a Adobe Flex, por ser de código abierto y altamente productivo y utilizado para crear y mantener aplicaciones web atractivas, además de permitir la implantación coherente en los principales navegadores, equipos de escritorio y sistemas operativos. El diseño del simulador está enfocado en un módulo que resalta las actividades inmersas en el funcionamiento de la memoria caché y los componentes que interactúan con ella. Demostrando los procesos de política de ubicación y reemplazo, tomando en cuenta las referencias de memoria y dando detalles de las tasas de acierto, permitiendo que el usuario establezca las políticas mencionadas y valores que puedan variar el comportamiento de los procesos como lo son las capacidades de la memoria RAM y memoria caché. Se adicionó un módulo ilustrativo introductorio, para dar a conocer a los estudiantes el funcionamiento de la memoria caché de forma sencilla, con miras a que logre reconocer las actividades que realiza la memoria caché al interactuar con los demás componentes.*

Palabras claves: simulador didáctico, simulación de eventos discretos, memoria caché, método de desarrollo de sistemas dinámicos (MSDS).

1. INTRODUCCIÓN

Las simulaciones bajo la concepción de López [1], proporcionan una representación dinámica del funcionamiento de un sistema determinado, por lo que tienen cada vez más importancia en la enseñanza de la física, tecnología, biología, astronomía, medicina, química, geología y todas las ciencias en general, ya que permiten visualizar el desarrollo de procesos simples o complejos, mostrando la evolución del sistema representado y la interacción entre los diversos elementos que lo integran o al menos algunas consecuencias de tales interacciones. Por otra parte, atendiendo lo dicho por Rivera [2], en el área de educación superior, enseñar por medios tradicionales, buscando satisfacer las diversas demandas formativas, es hoy en día prácticamente imposible.

Bajo esta perspectiva, surgió la necesidad de generar un simulador para el análisis del funcionamiento de las memorias caché para los estudiantes de Organización del Computador de la UNET, con el fin de brindar una herramienta didáctica para el análisis de las memorias caché de manera usable, accesible y escalable, de forma tal de ampliar las posibilidades de los mecanismos de enseñanza-aprendizaje para la asignatura de Organización del Computador de la carrera de Ingeniería Informática de la UNET.

El simulador de memorias caché para los estudiantes de Ingeniería Informática de la UNET, es capaz de mostrar las interacciones entre la memoria caché, la memoria RAM y el procesador, haciendo seguimiento de las referencias de memoria, dando detalles de las tasas de acierto, haciendo uso de las políticas de ubicación y de reemplazo existentes. Los métodos de enseñanza para este contenido, pueden ser reforzados por medio de demostraciones gráficas que logran captar la atención de quien la estudia, complementando la metodología de lectura para el entendimiento del extenso y complejo material, por lo que la herramienta realizada se presenta como una opción alternativa de gran aplicación para el caso en cuestión.

El simulador fue desarrollado con técnicas de simulación de eventos discretos, dado que la ejecución de la simulación depende de la ocurrencia de los eventos que se presentan, identificando eventos que generan un sistema que satisface las especificaciones del comportamiento de las memorias caché. El diseño del simulador está enfocado en un módulo que resalta las actividades inmersas en el funcionamiento de la memoria caché y los componentes que interactúan con ella, además de un módulo ilustrativo introductorio, para dar a conocer a los estudiantes el funcionamiento de la memoria caché de forma sencilla, con miras a que logre reconocer las actividades que realiza la memoria caché al interactuar con los demás componentes.

El trabajo se estructura como sigue. La Sección 2 presenta la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto. La Sección 3 muestra los resultados computacionales obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones respectivas.

2. METODOLOGIA

La metodología utilizada para el desarrollo de esta investigación fue el Método de Desarrollo de Sistemas Dinámicos (MSDS), ya que según Escalona [3] es “un método que provee un framework para el desarrollo ágil de software, apoyado por su continua implicación del

usuario en un desarrollo iterativo y creciente que sea sensible a los requerimientos cambiantes”, tal como se indica a continuación.

2.1 Estudio de factibilidad

El estudio de factibilidad se llevó a cabo analizando y corroborando algunos aspectos referidos a: requisitos de interfaz de usuario de la simulación, identificación de los tipos de usuarios finales, complejidad computacional, necesidad de la aplicación por parte de los usuarios, entre otros; confirmando que la aplicación a realizar podía constituir una herramienta de soporte al proceso de enseñanza-aprendizaje de Organización del Computador.

2.2 Estudio del negocio

Para el establecimiento de los requerimientos funcionales y la arquitectura básica de la aplicación se trabajó de manera conjunta con los usuarios de la misma: instructores y alumnos, estableciendo las funciones a simular por los componentes, las interacciones, los posibles escenarios y las especificaciones a satisfacer. Por la naturaleza de la aplicación se partió de la creación del modelo conceptual, para definir los elementos a tener en cuenta en la simulación por cada uno de los cuales puede estar ocupado o desocupado en un determinado instante de tiempo, tal como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Elementos de la Simulación

Componente	Parámetros	VARIABLES
Memoria Caché	Tamaño de palabra, tamaño de bloque, capacidad, tiempo de acceso	Número de accesos (aciertos), tasa de acierto y fallos, número de accesos (fallos), número total de accesos, tiempo de acceso medio, índice de memoria,
Memoria Principal (RAM)	Capacidad, Tamaño de bloque, tiempo de acceso	tiempo de simulación, etiquetas de las direcciones referenciadas, bloques o conjuntos a los que pertenecen las direcciones de memoria, palabras referenciadas del CPU
Procesador	Función correspondencia (directa, asociativa, o asociativa por conjuntos) y política de reemplazo	

Asimismo, se tomaron en cuentas las interacciones de la memoria caché contempladas cuando está incluido el CPU y cuando está incluida la memoria principal, teniendo en cuenta que la lógica del modelo de simulación se describe de la siguiente forma; los eventos de llegada están representados por las referencias de memoria precargadas en la simulación, mientras que los eventos de salida están a cargo de las palabras que la memoria caché entrega al CPU [4]. La memoria caché estará desempeñando el papel de servidor, el cual estará ocupado mientras haya referencias a memoria, y presentará los estados descritos. Los eventos de llegada ocurrirán cada vez que la caché este desocupada.

2.3 Iteración del modelo funcional

El objetivo de esta etapa fue plasmar un modelado y un prototipo funcional que constituyeran de forma consolidada todas las funciones que puede hacer la iteración. Con base en

el modelo conceptual se realizó el primer prototipo funcional, en el que se recogían los datos para la simulación de las listas que se les ofrecían a los usuarios. Se agregó información que describe los datos configurables de la simulación, de manera tal que el usuario tenga una idea de lo que trata cada una de las características que selecciona. Se planteó que los datos seleccionables para la simulación fueran probados antes de ser los que resultarían definitivos, así a medida que el simulador fue tomando forma se fueron probando estos valores, observando que con medidas muy grandes se apreciaba fácilmente todas las características funcionales de la memoria caché en la simulación. La interfaz tuvo algunos cambios sugeridos para que fuese más clara y conveniente la observación de los datos de simulación por parte del estudiante.

Las TIC's fueron seleccionadas como instrumento del modelo de enseñanzas/aprendizaje, de este modo la aplicación busca enseñar lo mismo que los libros de la cátedra, pero de forma más interactiva, posibilitando el incremento de situaciones con las que los estudiantes podrán realizar experiencias en el contexto del análisis del funcionamiento de las memorias caché, permitiendo una nueva forma de acceso a la experimentación. Esto es de gran valor, dada la imposibilidad de acceso real para poder observar el funcionamiento de la caché.

Tomando esto como base fundamental para el desarrollo del prototipo evolutivo del simulador, se enfocó el progreso del trabajo en desarrollar la simulación con demostraciones de los eventos de forma animada, de forma tal que el usuario fuese capaz de entender e interpretar las acciones que estuviesen ocurriendo. Las características gráficas de la simulación fueron afinadas a través de la inserción las funciones que rigen el mecanismo de la memoria caché en el simulador. Así, durante una de las iteraciones del modelo funcional se incluyó la interpretación de las direcciones físicas según la función correspondencia al tiempo que van siendo referenciadas por el procesador. Para lograr esta descripción se calculó el bus de direcciones de la memoria principal y caché, el número de bloques en caché, el número de bits correspondiente al tamaño del bloque y el tamaño de la etiqueta que varía según la correspondencia aplicada.

2.4 Iteración del diseño y construcción

Mientras se iban integrando las características en las iteraciones del modelo funcional y los requerimientos del estudio de negocio, se iba aportando valor operativo al prototipo establecido, construyendo lo que sería la aplicación utilizable por los usuarios, la cual partió de un diseño amigable para los estudiantes que les permitan: realizar pruebas con valores diferentes a los preestablecidos en la aplicación correspondientes a tamaños de memoria principal, memoria caché y bloque; observar las interacciones y cambios entre los componentes por cada unidad de tiempo; conocer la lista de referencias a memoria que componen la lista de instrucciones del procesador; conocer los datos fundamentales de caché esenciales para la buena interpretación de las técnicas que se aplican para descomponer la dirección de memoria y descubrir las etiquetas, los bloques y las palabras que cada una abarca según la función correspondencia aplicada y finalmente el tiempo de ejecución de la simulación. Adicionalmente, permite la carga de archivos en formato XML como una plantilla de listas de instrucciones para facilitar las pruebas con datos diferentes a los precargados en la aplicación, incorporando los mecanismos de ayuda fundamentales tanto para el estudiante como para el instructor, de manera que puedan hacer uso de la herramienta de manera simple y oportuna.

2.5 Implementación

Durante esta etapa se desplegaron versiones de prueba del prototipo operacional, con el objetivo de que fuese probado y evaluado por el usuario, en busca de cambios y mejoras del producto. En esta fase surgieron algunos requerimientos adicionales, como lo fue la inclusión de la opción de cargar archivos con las listas de instrucciones externas al paquete de simulación. También surgió la necesidad de agregar valores para la configuración del simulador diferentes a los presentados al usuario.

En este periodo del ciclo fue posible medir el nivel de satisfacción del usuario, captando las opiniones que presentaba sobre cada una de las evoluciones del prototipo operacional, enseñándole las propiedades que iba adquiriendo en cada iteración, así como también se fue instruyendo sobre el funcionamiento y las capacidades del simulador con base en el alcance establecido a partir del estudio de negocio, presentando flexibilidad ante los requerimientos adicionales que surgían y podían desarrollarse de acuerdo con el tiempo acotado inicialmente.

3. RESULTADOS

Se comprobó el funcionamiento del algoritmo mediante un conjunto de instrucciones, mostrando resultados exactos siendo según la función correspondencia y la política de reemplazo que se aplique. Para las pruebas realizadas se estableció como política de reemplazo LRU, el tiempo de acceso a memoria principal de 100 ns y a caché de 10 ns, con los tamaños de memoria principal, memoria caché y de bloque de 32 KB, 512B y 8B, respectivamente. Los resultados obtenidos en las pruebas por cada función de correspondencia se indican en la Tabla 2. Por su parte los resultados específicamente relacionados con la función de correspondencia asociativa se muestran en la Fig. 1.

Tabla 2. Resultados de las pruebas por cada Función Correspondencia (F. C.)

F.C. Asociativa por Conjuntos	F. C. Asociativa	F. C. Directa
Número de aciertos: 800	Número de aciertos: 961,	Número de aciertos: 763,
Número de fallos: 700	Número de fallos: 539,	Número de fallos: 737,
Tasa de aciertos: 0,53%	Tasa de aciertos: 0,64%,	Tasa de aciertos: 0,50%,
Tasa de fallos: 0,47%	Tasa de fallos: 0,36%,	Tasa de fallos: 0,49%,
Tiempo de acceso medio: 52,3 ns	Tiempo de acceso medio: 42,3 ns	Tiempo de acceso medio: 60,3 ns
Índice de mejora: 1,91	Índice de mejora: 2,36	Índice de mejora: 3,76.

Al analizar dichos resultados, el estudiante podría concluir que la correspondencia asociativa es la mejor opción para obtener la mejor tasa de aciertos, optimizando el tiempo de acceso medio e índice de mejora, pero dada la desventaja de esta propiedad de diseño de la caché, se puede decir que la correspondencia asociativa por conjuntos es una buena elección para la distribución de los bloques en caché. Al aplicar el algoritmo de correspondencia asociativa por conjuntos, se obtuvieron valores favorables en comparación con la correspondencia directa que presentó los valores menos eficientes de todos los tipos de función correspondencia.

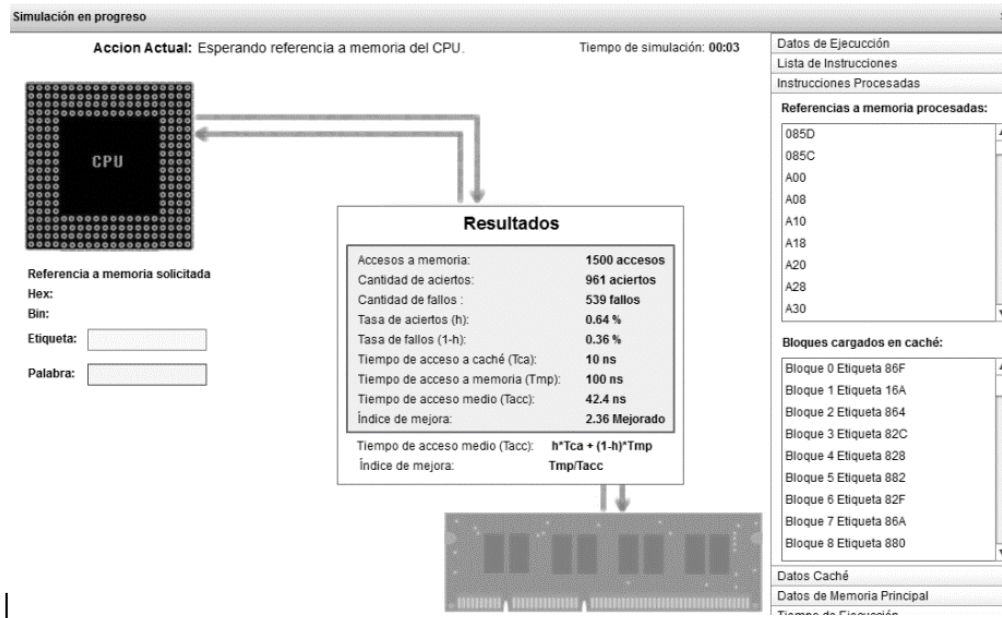


Figura 1. Resultados de la prueba de simulación con correspondencia asociativa.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Dado que es físicamente imposible poder observar las interacciones que genera el comportamiento de las memorias caché, el simulador desarrollado le facilita al estudiante el entendimiento de los procesos involucrados con las mismas le permite realizar comparaciones de los resultados obtenidos, probando diferentes valores para detallar las variaciones que se producen al realizar cambios en los diferentes parámetros de configuración de la simulación.

En futuras investigaciones, se puede complementar el simulador agregando la posibilidad de elegir la cantidad de procesadores y núcleos con los que tenga que trabajar la memoria caché, así como incluir un generador de listas de instrucciones de tipo secuencial y pseudosecuencial, que pudiesen poner a prueba los núcleo del procesador y el funcionamiento de la memoria caché.

REFERENCIAS

- [1].López, M. La simulación como método de enseñanza. *Universidad WIENER*, 2011.
- [2].Rivera, K. Un modelo de enseñanza-aprendizaje virtual: Análisis, diseño y aplicación en un sistema universitario mexicano. *Tesis PhD. Universidad de Granada*, 2004.
- [3].Escalona, M. (2001) Metodologías para el desarrollo de sistemas de información global análisis comparativo y propuesta. *Tesis PhD. Universidad de Sevilla*, 2001.
- [4].Culler, D. E., Gupta A. & Pal Singh, J., Parallel Computer Architecture: A Hardware/Software Approach. *Morgan Kaufmann Publishers Inc. USA*, 1997.

Model Building Using Genetic Algorithm For Data Fitting

Manuel Borregales¹

Jose Cappelletto² **Miguel Asuaje** ³

manuelantonioobr@gmail.com

cappelletto@usb.ve

asuajem@usb.ve

¹Dpto Cómputo Científico y Estadística, ²Departamento de Electrónica y Circuitos, ³Dpto Conversión y Transporte de Energía, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Baruta, Caracas-Venezuela

Andrea Shmueli⁴

Milan Stanko⁵

andrea.shmueli@ntnu.no

milan.stanko@ntnu.no

⁴Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, ⁵Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 7491, Trondheim, Norway

Abstract. *There are many methods for data fitting. Each of them try to find the best coefficients configurations to minimize a residual function. Those coefficients can be obtained from a linear or non linear model. If the model for a data set data is known, finding the coefficients to minimize the residual function is simple. However in some engineering problems the fitting model for a data set is unknown. In this work, a methodology using genetic algorithms is proposes to find a model or correlation that better fit a set of data. To accomplish this implementation, binary trees and Prüfer encoding are used. This methodology allows to find a model or correlation regardless the number of independent variables to be used, at a low computational cost and it does not require previous information on the behavior of the data.*

Two applications from this methodology will be shown. The first one is about an axial force on mud pump check valve. The hydrodynamic actuating force is fitted as a function of the flow and separation from the valve seat. The second is about the prediction of liquid droplet entrainment in stratified/annular flow. The liquid droplet flow was estimated as a function of three dimensionless variables. Data set for each application were divided in two groups, a group to build the model and another to validate it. A model to estimate axial force with 6% RMS error for the check valve problem and a model to predict liquid droplet flow with 16% RMS error for the two- phase flow problem were obtained.

Key words: Genetic Algorithms, Data Fitting, Two-Phase flow, Droplet entrainment, Flow in

valves

1 INTRODUCCIÓN

Data fitting is performed empirical way in many engineering problems. The cause to build a correlation ¹ in order to fit data is the absence of good models.

A correlation is empirical model to estimate a variable as a function from others. The correlations allows experimental information's extrapolation in other scenarios. It is build by trial and error in order to find an expression data fitting with the least possible error. In this sense, It's propose a methodology that uses genetic algorithms to find correlations that fit a set of data.

Genetic algorithms are inspired by the evolution of species. So the overall idea is to select best individuals in a populations in order to improve characteristics in the next generation. The individual with desired characteristics to maximize or minimize a variable of interest could get after several generations.

In this sense, the main idea in this work is build correlations to minimize the mean square error using genetic algorithms. The way to do this is to generate populations whose individuals are mathematical functions, and find the one that minimizes the error.

This methodology will be apply on two problems in engineering. The first problem is about Axial force in a mud pump valve. Is desired to find a correlation to estimate the axial force by the valve depending on its position and flow. Basically we want to find a function for the axial force $F_x = f(X, q)$.

The second problem is about flow measurement in a horizontal pipe when. Furthermore the fluid is a mix liquid-gas. So flow rate q is calculated by the model $q = Ce^{\lambda z}$. Where z is the liquid height in horizontal pipe. Parameter C and λ are constants, It are determined experimentally depending on the experimental setup, the gas-liquid ratio, the speeds of the fluid. The idea is to find correlations C and λ as a function of $C = f(Re_l, Re_g, Web)$ and $\lambda = f(Re_l, Re_g, Web)$. Where Re_l , Re_g and Web are a dimensionless quantities, Reynolds number for liquid and gas, and Weber number.

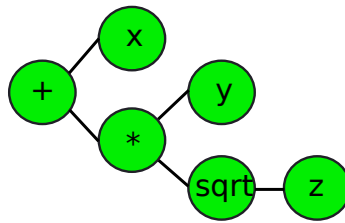
2 Basic concepts of genetic algorithms

2.1 Binary trees

A tree is a hierarchical structure of fathers and sons. It is a graph that has no cycles. Each node can have a father and several children. The node that has no father is called the "root" node. Nodes that have no children are called leaves. Binary trees are those which nodes have at most two child nodes. In [2] it is explained how to use binary trees to express mathematical expressions. In a binary tree the nodes that have no children represent variables, the nodes that have one child represent functions, and the nodes with two children represent binary operators. Figure 1 displays an example of tree representation of the expression $x + y\sqrt{z}$.

Binary trees allow provides a representations of mathematical expressions in the computer. Therefore it is possible to implement a genetic algorithm that obtains the mathematical expression

¹Even though this word has its own meaning of particular use in statistics and probabilities. A correlation is a value that indicates the force and direction of a lineal relation and proportionality between two statistic variables. In this case a correlation is an expression to fit a data set

Figure 1: Tree equivalent to the expression $x + y\sqrt{z}$

that better fit a given data set.

2.2 Prüfer Encoding

It is a methodology that allows encoding and decoding the structure of a tree in N nodes using a chain of $N - 2$ elements (with values ranging from 1 to N). The Prüfer encoding is bijective, therefore a change in the chain of numbers mean a change in the tree.

To extract a tree in the chain of Prüfer the grade of each node has to be calculated. The grade Gr^i of each node i means the amount of connections that it has with the other nodes. The numbers of the chain of Prüfer are extracted and the amount of N_{rep}^i repetitions that each number has are counted.

In short, to know the grade of each node the next formula is applied

$$Gr^i = N_{rep}^i + 1$$

Then the order of the numbers in the chain will indicate how the nodes connect between them. In [4] the detail of how the nodes will connect depending of the order of the numbers in the chain is explained.

2.3 Encoding

Encoding is done based on the number of N nodes that the trees of the population will have. This way N genes of 8 bytes will be required to store information present in each node, as well as and $N - 2$ genes of 8 bytes to store information of Prüfer's code. Afterwards comes the tail of the chromosome composed by N genes of 8 bytes, in this zone a real value for each node is stored. Each chromosome of the population will have $3N - 2$ genes, the distribution of the genes is shown in figure 2. Information in each node of the tree is read according to its number of child nodes. A node without children is read as one of the variables involved in the correlation x, y, z etc... A node with two child nodes or more will be read as a binary operation between the left child and the right child $+, -, *, /$, the rest of the child nodes are ignored. A node with one child node will be read as a function $x^2, x^3, \sqrt{x}, e^x, \ln x, \log x, x^{cte}, x + cte, cte \cdot x$. Constants are read as numbers in the interval $[-0.5, 0.5]$.

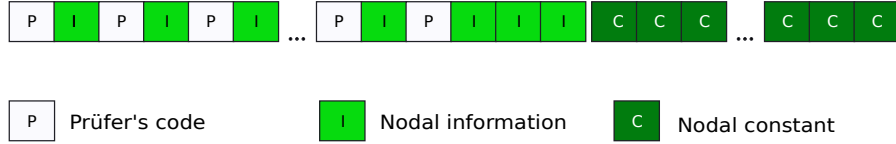


Figure 2: Distribution of the genes in the chromosome

Table 1: Decoding of the chromosome

Allele	Data type	Gen
Prüfer Code	Integer	From 1 to N
Node with no child nodes	Integer	x, y, z (The required ones)
Node with one child node	Integer	$x^2, x^3, \sqrt{x}, e^x, \ln x, \log x, x^{ctte}, x + ctte, ctte \cdot x$
Node with two node children	Integer	$+, -, *, /$
Nodal constant	Real	$[-0.5, 0.5]$

2.4 Fitness

The fitness function here employed was chosen in order to minimize the root mean square error (E_{RMS}). Fitness (See Eq. 2) tends to one when the E_{RMS} (See Eq. 1) tends to zero.

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\phi_{real} - \phi_{aprox})^2}{n}} \quad (1)$$

$$fitnesss = 2 \left(\frac{1}{1 + E_{RMS}} - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

For this function of fitness $f \in [0, 1]$, if $E_{RMS} \in [0, 1]$. If $E_{RMS} > 1$ then $f \in (-\frac{1}{2}, 0)$. If during data valuation in any mathematical expression the result is “Not a number”, then the fitness of that expression is -1 . Also, with this Eq. 2 if the error is more than 100%, then the fitness becomes negative.

2.5 Elitism

Elitism is a modifier of the different selection techniques, is useful to pass the n best individuals from one generation to another. This guarantees the function of fitness to be monotonous and growing through generations. In this work elitism with $n = 1$ was used to pass the best individual.

3 Methodology

3.1 Data

3.1.1 Axial Force in mud pump valve

The valve receives flow’s axial force, depending on their position and flow rate (See Fig. 4).. This axial force was calculated for different values of flow rate q and different positions of the

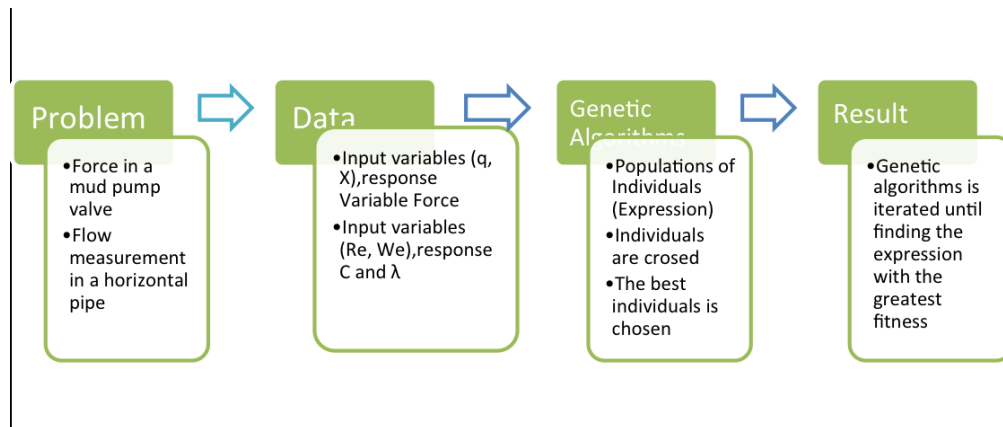


Figure 3: Applied methodology

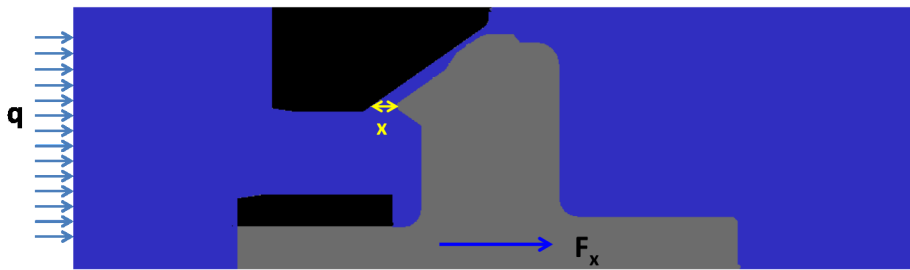


Figure 4: Force as a function of flow and valve's position

valve X using CFD (Computing Fluid Dynamics). The CFD are numerical methods based on the finite volume method of approximating the velocity and pressure of the fluid at each point of a mesh or domain's discretization.

3.1.2 Flow measurement in a horizontal pipe

This data was obtained experimentally in fluids laboratories at NTNU (Norwegian University of Science and Technology) and Institute for Energy Technology [6]. There are nine experimental cases, for different values of Gas's Reynolds number, liquid's Reynolds number and Weber number. C value and λ value is calculated using linear regression for each case using q values and z respectively. As we know the main idea is find a correlation $C = f(Re_l, Re_g, Web)$ and $\lambda = f(Re_l, Re_g, Web)$ in order to improve the correlations $q = Ce^{\lambda z}$.

3.2 Implementation of genetic algorithms

For both group of data the method of genetic algorithms was applied in order to find the expression that best estimate the response variable (See Fig. 3). The method stopped to iterate when the fitness of the best individual remained unchanged during 1000 consecutive iterations.

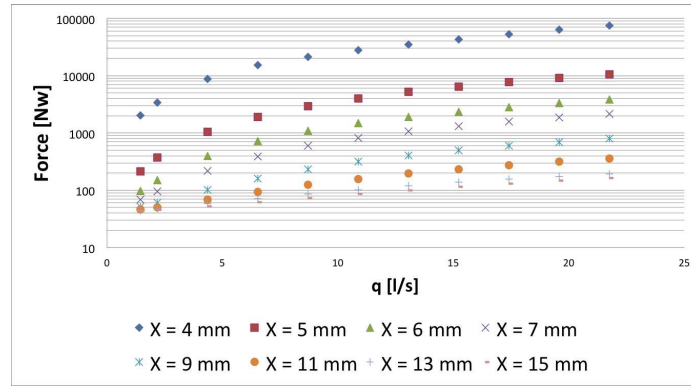


Figure 5: Axial Force simulation for different position and flow values

3.3 Axial Force's Correlations in mud pump valve

The first correlation (See Table 2) has a error RMS 24% , Axial force has a jumping magnitude orders (see Fig 5) so it was decided to propose two intervals. One for $q < 10[l/s]$ and another for $q \geq 10[l/s]$ as shown in Table 2. This intervals allows for better predictions in the range $q \geq 10[l/s]$ to error RMS 13%.

Table 2: Results Seventh group of data

Expression	E_{RMS}
$\log_{10}(F) = q^{0.1804} \left(\left(\frac{e^{X/20+0.4706}}{X/20} \right) - q - 0.0196 \right)$	24%
$\log_{10}(F) = \left[\left(\left(\frac{X}{20} \right)^{0.8942} \log_{10}(q^{0.2039}) \right) - 0.392 \right]^{-0.5020}$	13% $q \geq 10[l/s]$
$\log_{10}(F) = \frac{X}{20} \left(\frac{X}{20} + 0.3647 \right) + \left(\frac{X}{20} (0.4353q^{-0.2118} - q) \right)^{-1.004}$	20% $q < 10[l/s]$
$\log_{10}(F) = a_3(x)q^3 + a_2(x)q^2 + a_1(x)q + a_0(x)$	8%

$$a_3(x) = \frac{-1}{100(x + 0.3883)^{-7.0272}}$$

$$a_2(x) = \frac{x^{-0.7686} - 0.2392}{10x^3}$$

$$a_1(x) = (x + \log_{10}(x)^2 + 0.3098)^6$$

$$a_0(x) = \frac{x - 0.3333}{0.0298(x - 0.1255)^2}$$

It can see on the graph 6 the highest relative error is 16 %. The fourth correlations is use in this plot. Note that this result is well accepted cause it is working with data that jump in several orders of magnitude.

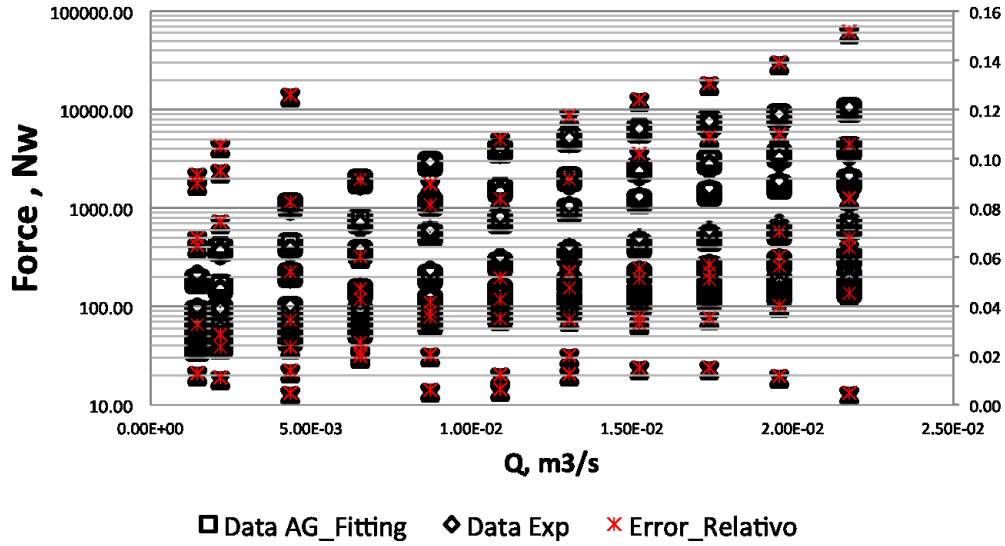


Figure 6: Comparations Genetic Algorithth fitting agains Experimental Data

3.3.1 Flow measurement in a horizontal pipe

The correlations found in Table 3 are a bit cumbersome. However in Figure 7 can see a good estimate of the flow in the different cases. It can be seen that the results are very similar to those given by the toolbox of matlab fitting data.

Table 3: Results Seventh group of data

Expression	E_{RMS}
$C = Web + \left(Re_g - \left(\frac{0.1333Re_l + -0.2824 + (Re_g - Re_g^{-0.3412})^3}{Re_g} \right) \right)^3$	11%
$\lambda = \frac{0.3843Re_l^2}{Web^{1.8352}(\ln(Re_l) + Re_g - 0.4235)^{0.83140}}$	12%

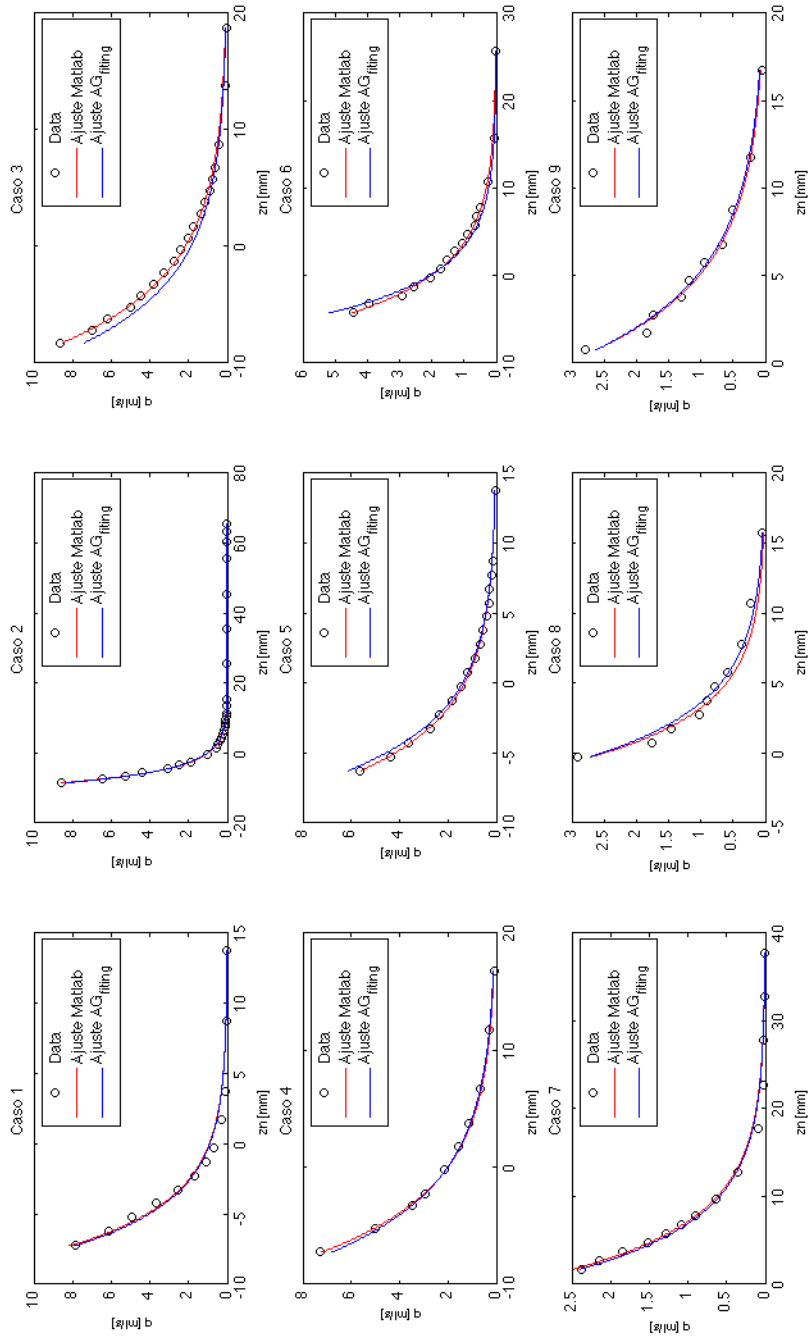


Figure 7: Methodology of Genetic Algorithm against methods on data fitting at Matlab's toolbox for calculate flow rate in a horizontal pipe with liquid and gas.

4 Conclusions

1. A methodology which allows finding correlations to a given data was accomplished and implemented
2. The structure of tree allowed manipulating expressions in the computer.
3. Similar results are obtained using data fitting toolbox on matlab.

5 Recommendations

1. To propose new approaches to manipulate the constants added to the expressions.
2. To search for correlations using training data and another validation data.
3. To expand the set of data to cover a wider range of configurations.

REFERENCES

- [1] Gilberto Efrén Núñez Chacín. Estudio numérico y experimental de la fluidodinámica de una mezcla bifásica a través de un medidor tipo venturi. Tesis, Coordinación de Post-Grado de Ingeniería Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Agosto 2009.
- [2] Kumar Chellapilla. Evolving computer programs without subtree crossover. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(3), septiembre 1997.
- [3] Michael Golanb Miguel Asuaje Gilberto Nunéz, Jesus De Andrade. Two-phase flow through a venturi meter. part b - numerical approach. *International Journal of Multiphase Flow*, mayo 2012.
- [4] Jens Gottlieb, Gunther R. Raidl, Bryant A. Julstrom, and Franz Rothlauf. Prüfer numbers: A poor representation of spanning trees for evolutionary search.
- [5] Brian W Kernighan and Dennis M. Ritchie. *The programming language C*. Prentice Hall Software Series, 2 edition, 1993.
- [6] D. TAYEBIA, S. NULANDB, , P. FUCHSC Droplet transport in oil/gas and water/gas flow at high gas densities. *International Journal of Multiphase Flow* , vol. 16, n. 1, pp. 145-153, 2000.

GEOMETRY OF TUMOR GROWTH IN BRAIN

Miguel Martín-Landrove

mglmrtn@yahoo.com

Centro de Física Molecular y Médica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Centro de Visualización Médica, Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela, Sebuacán and Centro de Diagnóstico Docente Las Mercedes, Las Mercedes, Caracas - Venezuela.

Francisco Torres-Hoyos

franciscotorreshoyos@gmail.com

Universidad de Córdoba, Montería – Colombia.

Abstract. *Tumor growth can be characterized by using scaling analysis methods performed upon the tumor interface; the procedure yields key parameters that define growth geometry according different universality classes. In the present work, results obtained by scaling analysis are shown for tumor lesions in brain, of primary origin, either malignant or benign and metastases. To evaluate different proposed models for tumor growth in brain, several growth simulations for primary brain tumors or gliomas were performed assuming a simple growth model described by a reaction-diffusion differential equation or in this context, a proliferation-invasion equation. The proliferation term was of the logistic type to take into account the limitation of nutrients and oxygen resources on tumor cells. To take into account the differences between grey and white matter for the diffusion parameter, the simulations used the brain tissue database provided by BrainWeb. Simulations were performed for different relations between the diffusion parameters (invasion) and the reaction parameters (proliferation) covering growth conditions from low grade gliomas up to high grade gliomas (glioblastoma multiforme). Scaling analysis results reveal a close correspondence to results previously obtained on tumor magnetic resonance images, which suggests that the simple model used for the computer simulations describes in an appropriate manner tumor growth of gliomas in brain and potentially its use can be extended to describe brain metastases.*

Keywords: Tumor growth, Scaling analysis, Gliomas, Proliferation-invasion equation, Logistic growth

1. INTRODUCTION

Tumor growth models based on the reaction-diffusion equation have been proposed to describe the growth dynamics of brain gliomas. Early proposed models assumed an isotropic diffusion (invasion) and reaction terms due to cellular proliferation and death [1]. More refined models included invasion anisotropy assuming different scalar diffusion terms [2] and diffusion tensor anisotropy [3] to account for the difference in tumor cell motility in grey and white matter. In the present work, numerical simulations of tumor growth are carried out for low and high grade gliomas on a virtual brain framework [4]. At any step of the simulated tumor evolution, a scaling analysis procedure was performed [5,6,7] in order to determine tumor interface width, local roughness exponent and fractal dimension. Numerical results are correspondent to those previously obtained for real tumors [7].

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Simulations

Brain tumor growth can be modelled by a reaction-diffusion partial differential equation [1,2] given by

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D(\vec{r})\nabla c) + \rho c \frac{c_m - c}{c_m} \quad (1)$$

with the boundary condition $D\nabla c \cdot \hat{n} \partial\Omega = 0$, c is the tumor cells concentration, D represents the diffusion coefficient which describes tumor cell motility and takes different values for grey and white matter, D_g and D_w , respectively, c_m is the saturation tumor cell concentration and ρ is the tumor cell proliferation rate. Equation (1) is solved by a 3D finite difference method using a combination of Backward-Euler and Crank-Nicolson methods [8] in order to increase numerical stability, which is solved iteratively on a virtual brain framework Brainweb [4]. Simulations are performed for different tumor cell proliferation parameters ranging from low grade to high grade gliomas. Parameters are summarized in Table 1. Equation (1) is solved using an isotropic model for the diffusion coefficient which exhibits a spatial distribution or map depending on tissue distributions for grey and white matter, with diffusion coefficient values given in Table 1.

Table 1. Proposed parameters for the reaction-diffusion model

Parameter	Value	Reference
c_m	$10^5 \text{ cells} / \text{mm}^3$	[3]
ρ_{low}	$1.2 \times 10^{-3} \text{ day}^{-1}$	[2]
ρ_{high}	$1.2 \times 10^{-2} \text{ day}^{-1}$	[2]
D_g	$2.0 \times 10^{-3} \text{ mm}^2 / \text{day}$	[1]
D_w	$10^{-2} \text{ mm}^2 / \text{day}$	[1]

Time step was taken as 1-day and tumor configurations were calculated for 1-year periods. At any-time tumor configuration, the tumor interface was extracted and its geometrical properties were analyzed.

2.2 Scaling Analysis

Tumor interface in this three-dimensional model exhibit geometrical properties that can be determined through scaling analysis. The first to take into account is the interface statistical variance that can be written as [5,7]

$$W(s,t) = \left\{ \frac{1}{s} \sum_{r_i \in s} [r_i(t) - \langle r_i \rangle_s]^2 \right\}_{\Sigma} \quad (2)$$

where Σ represents the total tumor surface area, and symbols $\langle \bullet \rangle_s$ and $\{ \bullet \}_{\Sigma}$ represent local average on a scale of size s and global average, respectively. For small scales, equation (5) exhibits a power-law behavior $W(s) \sim s^{\alpha_{bc}}$ where α_{bc} is the local roughness exponent [5]. The second quantity to be evaluated is the tumor interface fractal dimension, which can be estimated through a box-counting algorithm. If the analyzed interface actually describes a growth process, both quantities are related [6, 7], $d_f + \alpha_{bc} = d_E$ where d_E is the Euclidean dimension of the space that contains the tumor interface. Figure 1 show previous results obtained for scaling analysis performed on brain tumor MRI [7].

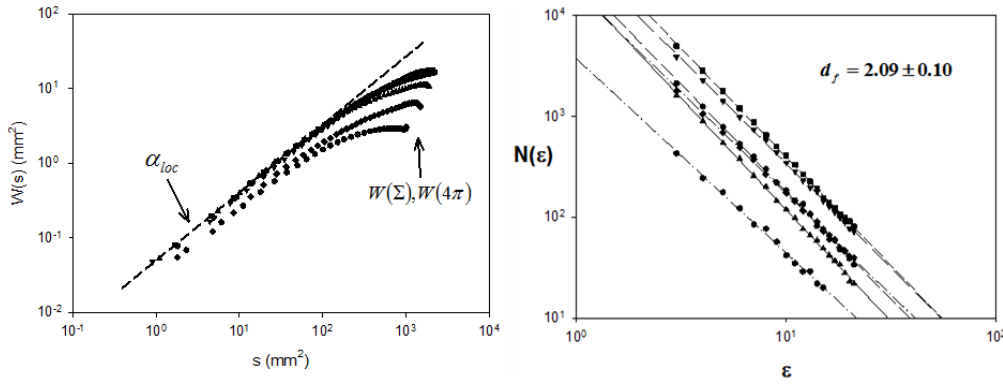


Figure 1- Power-law behavior of the tumor interface variance $W(s)$ (left) and box-counting algorithm result (right) for glioblastoma multiforme [7].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Two types of simulations were carried out: a) the proliferation parameter ρ takes the values given in Table 1 for low grade glioma, 0.0012 day^{-1} , with a time span of 20 years and high grade glioma, 0.012 day^{-1} , with a time span of 7 years, and b) the proliferation parameter ρ is varied in the range between 0.0024 day^{-1} to 0.0060 day^{-1} , with a time span depending on the achievement of terminal conditions, i.e. tumor size reaches patient life threat conditions, and also including the presence of tumor regions attaining latency or dormancy conditions: tumor cell concentrations near the saturation value, c_m and a distance to tumor interface equal or greater than a threshold

value r_L related to diffusion of nutrients (glucose) and estimated from the glucose diffusion coefficient of $5.79 \text{ mm}^2/\text{day}$ [9] to be of 2.5 mm for a 1-day time period.

Scaling analysis for any 1-year time period was performed. Results for the first set of simulations are shown in Figure 2 and scaling analysis of simulations is summarized in Table 2.

Table 2. Local roughness exponent and fractal dimension in simulated gliomas

Tumor grade	Number of cases	d_f	α_{loc}	$r^2(d_f)$	$r^2(\alpha_{loc})$
High grade	7	2.04 ± 0.08	0.95 ± 0.02	0.998	0.999
Low grade	17	2.28 ± 0.04	0.71 ± 0.05	0.997	0.998

Comparison of results in Table 2 and in Torres Hoyos et al [7] demonstrate that the roughness exponent (and fractal dimension) for a 7-years simulated high grade glioma are comparable to real Grade IV gliomas or glioblastoma multiforme, moreover, low grade gliomas exhibit tumor interface parameters very similar to those for benign tumors such as acoustic schwannomas and meningiomas. Also, as shown in Figure 2, there is a dependence on evolution time (or tumor grade) of the local roughness parameter, which is consistent with previously reported results [10-12].

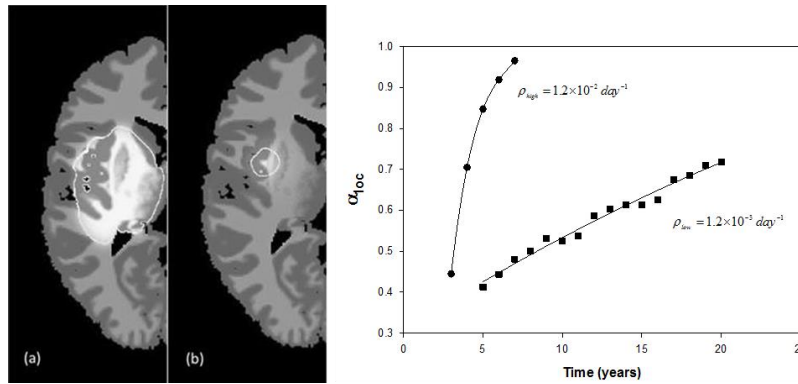


Figure 2- Left, axial section of (a) high grade glioma, 7 years and (b) low grade glioma, 20 years. Right, time evolution of local roughness exponent, α_{loc} .

The second set of simulations exhibit a more realistic behavior when compared to real T₁-weighted contrast enhanced MR images, particularly in regions where cells are in a latent or a necrotic state and are not available to the contrast agent. Simulations were stopped when terminal conditions were achieved, i.e. tumor size threatens patient life, allowing for survival time expectancy at any value of the proliferation parameter ρ . This situation is depicted in Figure 3, showing an evolution time from 11 to 20 years as the proliferation parameter is varied from 0.006 to 0.0024 day^{-1} . If a particular evolution time is selected, the dependence of the geometrical parameters of the tumor interface with the proliferation parameter can be established. Since according the first set of simulations, the higher the proliferation parameter, the higher the local roughness exponent, the maximum variation for the $\alpha_{loc}(\rho)$ dependence is expected at the evolution time corresponding to the terminal condition for 0.006 day^{-1} , which is 11 years. In Figure 4, tumor distributions are shown for different values of the proliferation parameter, ρ , and the corresponding $\alpha_{loc}(\rho)$. It is important to notice that $\alpha_{loc}(\rho)$ dependence shows an abrupt

transition from low grade to high grade glioma as the proliferation parameter is increased. Also, the transition value of the proliferation parameter seems to be coincident with the appearance of large latent and necrotic regions within the tumor.

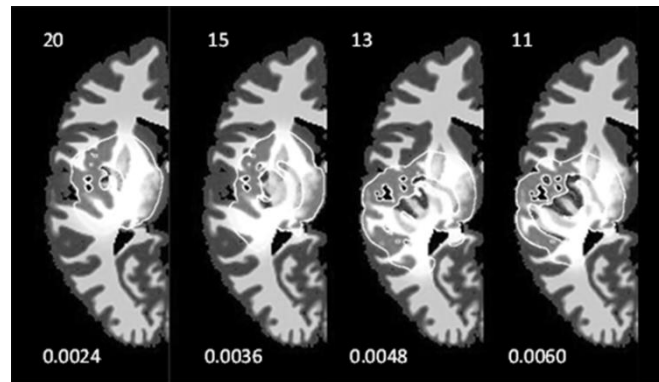


Figure 3- Tumor distributions at terminal condition. On top of each image is the stop time in years and below is the proliferation parameter ρ in day^{-1} .

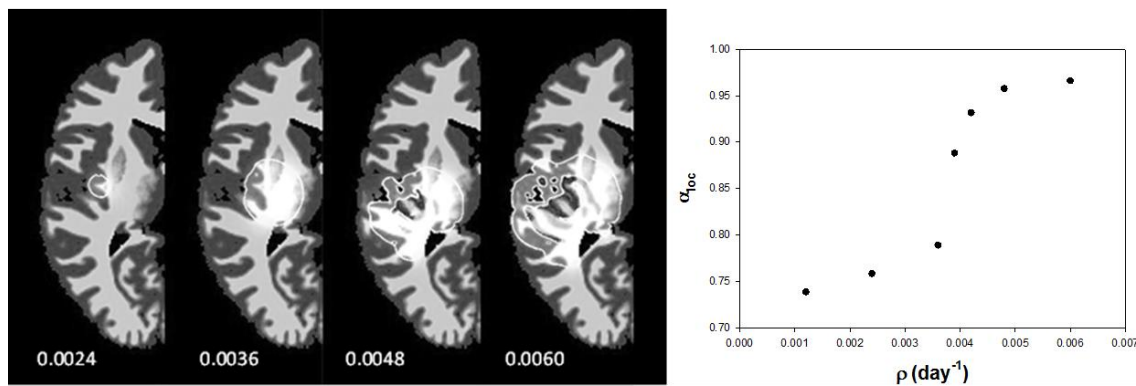


Figure 4- Left, tumor distributions obtained at a time evolution of 11 years. Right, $\alpha_{loc}(\rho)$ dependence.

4. CONCLUSIONS

Results found in simulated gliomas for the local roughness exponent are correspondent to those found in vitro [5] and in vivo [7,10]. Simulations including latency effects are very promising since they provide a simple framework for implementing clinical applications in cancer therapy.

Acknowledgements

We would like to thank Centro de Diagnóstico Docente Las Mercedes for all the collaboration in image classification and to the University of Córdoba, Montería, Colombia, for the financial support given to F. Torres Hoyos, leading to the achievement of doctoral degree.

REFERENCES

- [1].Tracqui, P., Cruywagen, G.C., Woodward, D.E., Bartoo, G.T., Murray, J.D., Alvord Jr., E.C., A mathematical model of glioma growth: the effect of chemotherapy on spatio-temporal growth. *Cell Proliferation*, vol. 28, n. 1, pp. 17-31, 1995.
- [2].Swanson, K., Alvord, E., Murray, J., A quantitative model for differential motility of gliomas in grey and white matter. *Cell Proliferation*, vol. 33, pp. 317-329, 2000.
- [3].Jbabdi, S., Mandonnet, E., Duffau, H., Capelle, L., Swanson, K., Peligrini-Issac, M., Guillevin, R., Bennali, H., Simulation of anisotropic growth of low-grade gliomas using diffusion tensor imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*, vol. 54, pp. 616-624, 2005.
- [4].Cocosco, C., Kollokian, V., Kwan, R., Evans, A., Brainweb : On line interface to a 3d mri simulated brain database. In *Neuroimage. Proceedings of the Third International Conference on the Functional Mapping of the Human Brain*, vol. 5, part 2/4, S425, 1997.
- [5].Brú, A., Pastor, J., Fernaud, I., Brú, I., Melle, S., Berenguer, C., Super-rough dynamics on tumor growth. *Physical Review Letters*, vol. 81, n. 18, pp. 4008-4011, 1998.
- [6].Barabasi, A.L., Stanley, H.E., *Fractal Concepts in Surface Growth*. Cambridge University Press, USA, 1995.
- [7].Torres Hoyos, F., Martín-Landrove, M., 3-D in vivo brain tumor geometry study by scaling analysis. *Physica A*, vol. 391, n. 4, pp. 1195-1206, 2012.
- [8].Raviart, P.A., Thomas, J.M., *Introduction a l'analyse des equations aux derivees partielles*. Paris: Masson. France, 1988.
- [9].Jain, R. K., Transport of molecules in the tumor interstitium: a review. *Cancer Research*, vol. 47, pp. 3039-3051, 1987.
- [10]. Quintana, A., Martín-Landrove, M., Pereira, D., Fractal properties and critical exponents for tumor staging and classification. In Cerrolaza, M., Rodrigues, H., Doblaré, M., Ambrosio, J. & Viceconti, M., eds, *Proceedings of III International Congress on Computational Bioengineering*, pp. 385-390, 2007.
- [11].Martín-Landrove, M., Pereira, D., Fractal properties and critical exponents in tumor. *Ciencia*, vol. 16, n. 2, pp. 203-207, 2008.
- [12]. Yáñez, M., López, B., Martín-Landrove, M., Brain tumor staging and classification by analysis of contour critical exponents. In Chacón, R., León, F., Duarte, V., Verastegui, O., eds, *Modelos Computacionales en Ingeniería: Desarrollos Novedosos y Aplicaciones, (CIMENICS 2010)*, pp. PS115-PS120, 2010.

ACCELERATING THE CONVERGENCE OF THE FEMSES METHOD USING MULTI-GRID TECHNIQUES

David M. Fernández B.

Jorgenson J. Zambrano A.

dfernandez@fing.luz.edu.ve

jzambrano@fing.luz.edu.ve

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Av. Goajira, Calle 67, Maracaibo-Venezuela, 4002

Maryam Mehri Dehnavi

mmehri@mit.edu

Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, MIT, The Stata Center, 32-G770, 32 Vassar Street, Cambridge, MA

Yousef El-Kurdi

Dennis Giannacopoulos

yousef.elkurdi@mail.mcgill.ca

dennis.giannacopoulos@mcgill.ca

Department of Electrical and Computer Engineering, McGill University, 3480 rue University Montreal Quebec Canada, H3A 0E9

Abstract. *The recent dominance of multicore and manycore microprocessors in modern computer systems has created the need to shift from sequential programming paradigms to parallel ones in order to make efficient use of this new technological trend. The scientific community has taken significant strides towards the parallel translation of important numerical techniques; however many of them are not susceptible to such transformations or exhibit little performance gains when parallelized, even when using sophisticated new parallel languages and libraries. Such numerical methods must be redefined to enable more parallel tasks than their sequential counterparts as required by these new architectures, a task that has proven to be challenging. One such effort was recently undertaken to find an alternative way to parallelizing the finite element method. The redefined version of this method, named the finite element method single element solution or FEM-SES, exposes more parallelism than what is possible with conventional approaches. The FEM-SES method parallel implementation performed up to 14 times faster than the sequential implementation and exhibited a linear scaling of its iteration count with increasing the problem size. On the other hand, the iteration count for FEM-SES was*

shown to be higher than the sequential version. This work extends the FEM-SES formulation to improve its convergence rate by combining it with multi-grid methods.

Keywords: FEM-SES, Multigrid method, Parallel computing

1. INTRODUCTION

Solving increasingly complex simulation problems (particle accelerators, Ko [1] and Rawat [2]) using the finite element method (FEM) requires more powerful computing systems, leading to the use of large computing clusters and parallel programming paradigms. Even smaller EM applications, in both low and high frequency domains, constantly demand detailed models and greater precision in simulated results.

These simulation demands have been partially satisfied by modern multicore and manycore processors. The evolution towards multicore/manycore heterogeneous systems seems to be the dominant trend in the foreseeable future. However, the scientific community must now rewrite legacy libraries and applications in parallel to realize the performance benefits offered by these modern computing resources as shown recently in Fernandez [3] and Dehnavi [4,5].

There are well established parallel techniques to implement FEM in parallel computer systems, but parallelizing FEM on multicore and manycore processors requires re-designing several of these techniques. In previous work we proposed an alternate way of solving the finite element method that is well suited for massively parallel manycore implementations named FEM single element solution (FEM-SES). This idea was first presented in Fernandez [6] as a new approach for computing the finite element method in parallel processors, but only sequential proof-of-concept results were shown at that time. In Fernandez [7] a parallel GPU implementation was developed for the proposed method. The performance results reported up to 14 times faster performance when using the GTX480 graphic card compared to an optimized multicore CPU code, thereof proving the potential of the FEM-SES method for general parallel processing. However, this increased parallelism comes at the cost of increased iteration count with respect to efficient FEM solvers (i.e. conjugate gradient, BiCGStab, GMRES, and others); hence the purpose of this work it to explore ways to accelerate the convergence rate of the FEM-SES method.

The remaining sections of this paper are organized as follows; Section 2 describes the FEM-SES method, its advantages and limitations compared to the traditional approach. The mathematical formulation and some implementation considerations for combining the FEM-SES method with the Multigrid method are presented in Section 3, and the last Section establishes concluding remarks and future work.

2. OVERVIEW OF THE FEM SINGLE ELEMENT SOLUTION METHOD

The classic FEM formulation can be presented as a seven step procedure (see Jin [8]) as follows (see Fig. 1): 1) Discretization of the problem domain; 2) Definition of boundary conditions (BC); 3) Construction of the element stiffness matrices; 4) Assembly of the global coefficient matrix imposing corresponding BCs; 5) Solution of the algebraic system; 6) Post-processing of results and if required 7) Mesh refinement and/or change of basis functions, restarting the process from the first step.

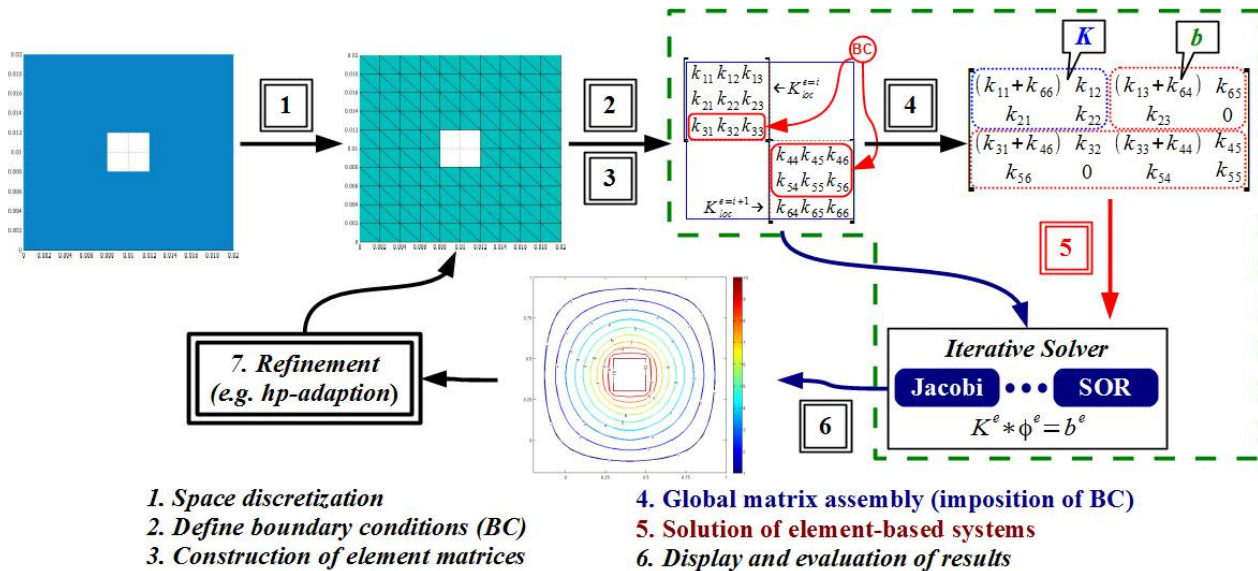


Figure 1- Comparison of the classic FEM and the FEM-SES methods. Changes to FEM are shown inside the green dashed line, where step 4 is skipped and step 5 is modified.

In FEM-SES we provide a new way to exploit large amounts of parallelism. This is achieved by decoupling the element solution from that of the whole mesh via computing element stiffness matrices, applying the boundary conditions to them, and solving them concurrently. Next, the disconnected solutions are averaged (node-wise) using a weighted sum over all concurrent nodes and iterated until convergence is achieved. By skipping step four of the FEM procedure described before, the proposed approach does not require building a global coefficient matrix. Thus the FEM-SES method uses the same steps 1, 2, 6, and 7 from the classic FEM formulation, skips step 4, and modifies steps 3 and 5. The mathematical formulation for FEM-SES can be found in Fernandez [6], and the green dashed line in Fig. 1 outlines the difference between classic FEM and FEM-SES.

The global solution is computed with a *2-step* iterative relaxation approach, as shown in Fig. 2. In this figure, *Step 1* applies a solution update scheme using the previously obtained *iterate- ϕ* and the modified local systems. The example shown in *Step 1* corresponds to a Jacobi type update on triangular elements with zero, one and two boundary conditions. In *Step 2*, the local solutions from overlapping nodes are summed using a weighted average to obtain the global solution. Finally, a convergence check is performed to either exit or repeat the process.

The most significant advantage of FEM-SES compared to classic FEM is that the former provides abundant fine-grained parallelism as required by manycore and multicore processors. The sources of parallelism in FEM-SES are: i) Element stiffness matrices can be built in parallel and preserved in distributed CPU/cores; ii) The solution of each element can be computed in parallel independently; and iii) The weighted average can be performed in parallel across different nodes taking into account the element connectivity. Among other advantages, FEM-SES does not require special numbering on the nodes to build the global coefficient matrix and there is no need to assemble this matrix. On the other hand, the relaxation procedure used exhibits slow convergence Fernandez [7]. The next section presents a combined FEM-SES/Multigrid method, which is expected to enhance the convergence of FEM-SES.

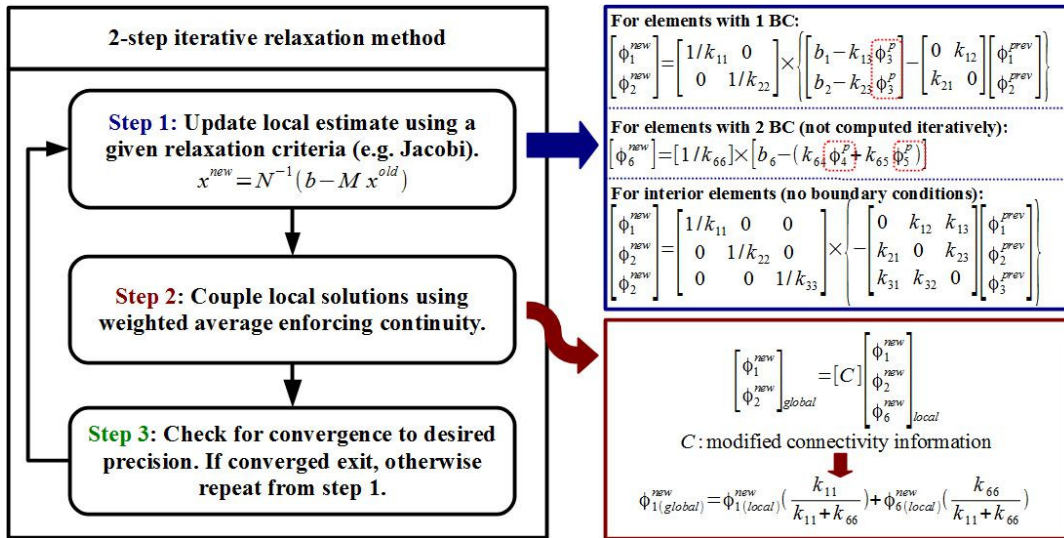


Figure 2- 2-step iterative relaxation method. Step 1 shows examples of how to compute the solutions for linear triangular elements with 1, 2, and 0 BCs. Step 2 shows how to obtain a global solution using weighted averages on the local estimates.

3. ACCELERATING THE FEM-SES METHOD WITH MULTIGRID TECHNIQUES

The FEM-SES method can be viewed as a combination of a decoupled FEM formulation solved with a stationary method. Traditional approaches to accelerate the convergence of iterative methods may fail or simply may not provide sufficient acceleration. For example, the use of preconditioners would be precluded since FEM-SES does not assemble a global coefficient matrix, while the use of weighted averages of the previous and current estimates of the solution might not yield significant benefits for convergence as the ones being sought.

A third approach, and the one taken in this work, is to employ Multigrid methods which have proven to be effective preconditioners for FEM, and have gained the reputation of being fast numerical solvers for finite difference (FD) formulations. Multigrid methods belong to a class of methods called *Multiresolution* methods that solve problems at multiple scales through a hierarchical discretization. The multiple discretizations are able to rapidly dampen certain components of the error. This concept is then extrapolated employing the multiple coarser discretizations (normally starting from the fine grid) to reduce different components of the error in each grid, and then projecting back an error correction to the fine grid. This process accelerates the convergence of the fine grid solution. For simple geometries with overlapping regular grids it is possible to project the errors (or solutions) from one grid to another easily, these methods are called Geometric MultiGrid (GMG). In contrast, when the fine grid is irregular it becomes difficult to define coarser grids and to project the errors, in those cases another variety is used called Algebraic MultiGrid (AMG). The most basic GMG process uses the following five steps:

- Smoothing:** reducing the high frequency error of the solution through several iterations on the fine grid using some iterative method (e.g. Jacobi, Gauss-Seidel, others).
- Restriction:** down sampling the residual ($r_f = b_f - A_f \times \tilde{x}_f$) from the fine grid points to the coarse grid (bigger step h size) using a restriction matrix/stencil ($r_c = R_c^f \times r_f$).
- Error solve:** solving for the error at the coarse grid ($A_c \times e_c = r_c$).

- (d) **Interpolation or Prolongation:** interpolation of the coarse grid error onto the fine grid. An interpolation matrix is used to obtain the error on the fine grid ($e_f = I_C^f \times e_C$).
- (e) **Reiterate over step (a) or Post-smother and finish:** finalize on the fine grid with an iterative method to obtain the solution using as initial guess $\tilde{x}_{f_guess} = \tilde{x}_{f_previous} + e_f$.

The procedure described before is known as a V-cycle, but other variations exist namely W-cycles and full Multigrid (FMG) that can render better results (see Fig. 3).

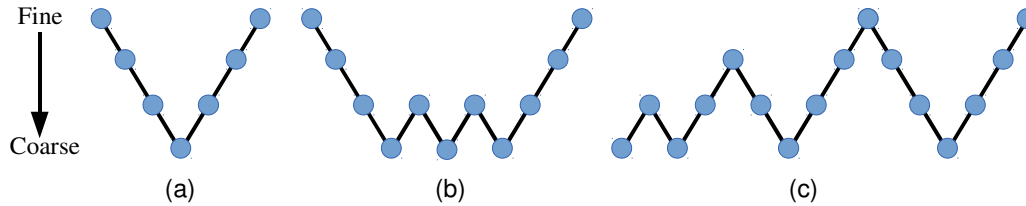


Figure 3- Multigrid cycles: (a) V-cycle, (b) W-cycle and (c) FMG-cycle.

To develop this idea we chose to use GMG with a V-cycle scheme for a regular grid discretization of a 2D electrostatic problem (elliptic operator). The first consideration to be made is related to the projection of the residual vector from the fine grid to the coarse grid. Because there is no global coefficient matrix in FEM-SES (see *step (b) restriction* above). The solution can be found by applying analogously a 2-step FEM-SES iteration to the residual per element.

- *Step 1:* compute the element residual with the latest local solution approximation as $r_{element} = b_{element} - N \times \tilde{x}_{element}^{new} - M \times \tilde{x}_{element}^{old}$ (where $A_{element} = N_{element} + M_{element}$).
- *Step 2:* couple the element residuals using weighted averages showed in the next

$$\text{expression, } r_{global} = \sum_{i=\text{overlapping_elements}} r_{element_node(i)} \times \left(k_{ii} / \left(\sum_{j=\text{overlapping_nodes}} k_{jj} \right) \right).$$

Once the global residual on the fine grid is computed it has to be restricted onto the coarse grid. The challenge here is again due to the lack of a global coefficient matrix. This time, the solution is borrowed from the FD method. As example, consider a regular 2D grid with constant step in the two directions, the *restriction (step (b) in the GMG)* can be applied with the Eq. (1).

$$r_C = (1/4) \times r_{f(2i,2j)} + (1/16) \times (r_{f(2i-1,2j-1)} + r_{f(2i-1,2j+1)} + r_{f(2i+1,2j-1)} + r_{f(2i+1,2j+1)}) + (1/8) \times (r_{f(2i-1,j)} + r_{f(2i+1,j)} + r_{f(2i,j-1)} + r_{f(2i,j+1)}) \quad (1)$$

A similar rationale is applied to the *error solve (step (c) of GMG)* to find the error. In this step, we also resort to a FD approach to compute the error using Eq. (2) and Eq. (3). Notice that Eq. (3) is derived from the discretized Laplacian operator, used as case study here. Equation (3) would change depending on the problem solved.

$$e_{C(i,j)}^{new} = (1/4) * (e_{C(i+1,j)}^{old} + e_{C(i-1,j)}^{old} + e_{C(i,j+1)}^{old} + e_{C(i,j-1)}^{old} - (r_{C(i,j)} \times (h^2))) \quad (2)$$

$$r_{C(i,j)}^{new} = r_{C(i,j)}^{old} - \left[(e_{C(i+1,j)}^{new} - 2 \times e_{C(i,j)}^{new} + e_{C(i-1,j)}^{new}) + (e_{C(i,j+1)}^{new} - 2 \times e_{C(i,j)}^{new} + e_{C(i,j-1)}^{new}) \right] / (h^2) \quad (3)$$

The *interpolation step (step (d) of GMG)* is solved in a standard Multigrid fashion for regular grids. First we copy overlapping coarse-to-fine node values (even nodes see Eq. (4.a)). Then a horizontal sweep is performed to fill in odd-numbered node values in each row of the fine grid, see Eq. (4.b). Next, the vertical sweeps are computed over the columns, filling in odd-numbered row values of the fine grid (see Eq. (4.c)), and finally a sweep over the coarse nodes is performed to compute odd-numbered *row/column* fine grid nodes using Eq. (4.d).

$$\begin{aligned}
(a) \quad x_{f(2i,2j)} &= x_{C(i,j)} \\
(b) \quad x_{f(2i,2j+1)} &= (x_{C(i,j)} + x_{C(i,j+1)})/2 \\
(c) \quad x_{f(2i+1,2j)} &= (x_{C(i,j)} + x_{C(i+1,j)})/2 \\
(d) \quad x_{f(2i+1,2j+1)} &= (x_{C(i,j)} + x_{C(i+1,j)} + x_{C(i,j+1)} + x_{C(i+1,j+1)})/4
\end{aligned} \tag{4}$$

Once the error is projected back to the fine grid, it is added to the best estimate of the solution on this grid and the FEM-SES method is reapplied (using this corrected vector as the initial guess) to obtain a final solution.

4. CONCLUDING REMARKS

This work presents the first phase of a research being conducted to develop a combined FEM-SES and Multigrid method. Such method would be expected to yield the great amount of parallelism provided by FEM-SES and the rapid $O(n)$ convergence rates that have made Multigrid methods so attractive. Several ideas are being tested including classic V-cycles, however due to the slow convergence rates showed by FEM-SES, it is expected to obtain even better results with FMG and other Multigrid cycles. The next phase will be to implement this new method on manycore/multicore processors to explore the parallel benefits. We expect then to continue the research on non regular meshes employing AMG methods in future works.

REFERENCES

- [1]. Ko, N. Folwell, L. Ge, A. Guetz, L. Lee, Z. Li, C. Ng, E. Prudencio, G. Schussman, R. Uplenchwar, and L. Xiao, Advances in electromagnetic modeling through high performance computing. *Proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconductivity*, vol. 441(1-2), pp. 258–262, 2006.
- [2]. V. Rawat, L.-Q. Lee, K. Ko, Z. Li, and C.-K. Ng. Frequency-Domain Finite Element Simulation of Particle Accelerators. . *In The 10th International Workshop on Finite Elements for Microwave Engineering*, Meredith-New Hampshire, October 2010.
- [3]. D. Fernández, D. Giannacopoulos and W. J. Gross. Multicore acceleration of CG algorithms using blocked-pipeline-matching techniques. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(8):3057–3060, 2010.
- [4]. M. Mehri Dehnavi, D. Fernández and D. Giannacopoulos. Finite element sparse matrix vector multiplication on GPUs. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(8):2982–2985, 2010.
- [5]. M. M. Dehnavi, D. M. Fernandez, J. Gaudiot, D. D. Giannacopoulos, Parallel Sparse Approximate Inverse Preconditioning on Graphic Processing Units, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 24, no. 9, pp. 1852-1862, Sept. 2013.
- [6]. D. Fernández, M. Mehride, W. Gross and D. Giannacopoulos, Alternate Parallel Processing Approach for FEM, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no: 2, pp. 399-402, 2012.
- [7]. David M. Fernández B., *Multicore Acceleration of Sparse Electromagnetics Computations*, PhD. Thesis, McGill University, 2011.
- [8]. J.-M. Jin. *The Finite Element Method in Electromagnetics*, 2nd Edition. Wiley-IEEE Press by John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.

A SIMPLE APPROACH TO ACCOUNT FOR CELL LATENCY AND NECROSIS IN A BRAIN TUMOR GROWTH MODEL

Johan Rojas

Rixy Plata

johan.rojas.z@hotmail.com

rixy_plata@hotmail.com

Centro de Física Molecular y Médica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Caracas-Venezuela.

Miguel Martín-Landrove

mglmrtn@yahoo.com

Centro de Física Molecular y Médica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Centro de Visualización Médica, Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela, Sebucán and Centro de Diagnóstico Docente Las Mercedes, Las Mercedes, Caracas - Venezuela.

Abstract. *Brain tumors have been successfully modeled by a reaction-diffusion equation, where cellular invasion is assumed to be of the diffusion type parameterized by a tensor similar to the molecular diffusion tensor, that can be measured by diffusion weighted MRI, and the proliferation term is taken of the logistic type. The model has been extended to take into account therapy terms, such as chemotherapy and radiotherapy, which in general act differently depending on the activity state of tumor cells. It is well known that as a consequence of tumor growth an important fraction of tumor cells, impaired of nutrients and oxygen, become to a latency state for which neither proliferation nor invasion are present. Latency and necrotic states are determined by concentration levels of nutrients and oxygen. Assuming a diffusive model for nutrient and oxygen concentration, effective latency and necrotic radii can be established, i.e. cells deep inside the tumor at a distance from the tumor interface bigger than these radii are either latent or necrotic. In order to take into account changes in cell states, elementary volumes are tagged appropriately: 0 tags volumes corresponding to tissues different to white and grey matter, 1 tags volumes corresponding to white and grey matter, 2 tags volumes for which cellular concentration is above 90% of maximum concentration as established by a logistic proliferation model. Volumes tagged 1 and 2 are accessible by the differential equation, while 0 is not. Latency and necrotic volumes are tagged 3 and 4 respectively. Including therapy terms, all tags*

except 0 and 4 are reversible, since latent cells can become active due to therapy induced death of active cells. Simulations were performed using a Matlab developed code.

Keywords: Tumor growth model, reaction-diffusion equation, cell latency, necrosis

1. INTRODUCTION

Tumor growth models based on the reaction-diffusion equation have been proposed to describe the growth dynamics of brain gliomas. Early proposed models assumed an isotropic diffusion, to account for the cellular invasion and reaction terms due to cellular proliferation and death [1]. More refined models included invasion anisotropy assuming different scalar diffusion terms [2] and diffusion tensor anisotropy [3] to account for the difference in tumor cell motility in grey and white matter. To consider the existence of different cell states: proliferative, hypoxic, hypoglycemic and necrotic, models include several differential equations for tumor cell states, oxygen/nutrient concentrations and tumor interactions with neighboring tissues [4-5], which usually need more parameters, besides invasion and proliferation parameters, to fully describe the system in detail. In the present work, a single proliferation invasion differential equation is considered that describes the dynamics of proliferative cells only; hypoxic and hypoglycemic cell states are considered to be in a latency or dormancy state, and as a consequence these states are excluded from the differential equation but in a reversible way, i.e. therapy usually bring those states back to be proliferative, which is one of the causes of disease reappearance. Also, latent cell states have a different response to therapy; a fact that is not considered at all in therapy proposed models [6-7].

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Proliferative-invasive equation

Proliferative tumor cells growth can be modelled by a proliferation-invasion partial differential equation [1,2] given by

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D(\vec{r})\nabla c) + \rho c \frac{c_m - c}{c_m} \quad (1)$$

with the boundary condition $D\nabla c \cdot \hat{n} \partial\Omega = 0$, c is the tumor cells concentration, D represents the invasion coefficient which describes tumor cell motility and takes different values for grey and white matter, D_g and D_w , respectively, c_m is the saturation tumor cell concentration and ρ is the tumor cell proliferation rate. Proliferation is assumed to be of the Verhulst or logistic type to account for limits in nutrient concentration and cellular size. Equation (1) is solved iteratively on a virtual brain framework Brainweb [8] for different values of the proliferation parameter, ρ , on the assumption of an isotropic, although heterogeneous, invasion model, with an invasion coefficient given by

$$D(\vec{r}) = C_g(\vec{r})D_g + C_w(\vec{r})D_w \quad (2)$$

where $C_g(\vec{r})$ and $C_w(\vec{r})$ are the normalized grey and white matter tissue concentrations, i.e. $C_g + C_w = 1$. Parameters used for the proliferative-invasive equation are summarized in Table 1.

Table 1. Parameters of the proliferative-invasive equation

Parameter	Value	Reference
c_m	$10^5 \text{ cells} / \text{mm}^3$	[3]
ρ_{low}	$1.2 \times 10^{-3} \text{ day}^{-1}$	[2]
ρ_{high}	$1.2 \times 10^{-2} \text{ day}^{-1}$	[2]
D_g	$2.0 \times 10^{-3} \text{ mm}^2 / \text{day}$	[1]
D_w	$10^{-2} \text{ mm}^2 / \text{day}$	[1]

2.2 Latency and necrosis states

As the tumor interface progresses, diffusion of nutrients is less effective to account for all the cellular energetic requirements, particularly if it attempts to remain in a proliferative-invasive state, and as a consequence, for a certain nutrient concentration threshold value a transition to a latent state occurs, and the cell no longer participates in equation (1). This condition can occur when cell concentrations in a surrounding neighborhood around a particular volume element or voxel attain almost saturation values c_m , therefore a scarcity of resources is present, and there is some effective distance to tumor interface that is related to the diffusion length for nutrients (glucose) and estimated from the glucose diffusion coefficient of $5.79 \text{ mm}^2/\text{day}$ [9] to be of 2.5 mm for a 1-day time period, from now on to be called D_G . To evaluate the glucose concentration the following expression is used

$$\langle f_j \rangle = \frac{1}{N_{V_R}} \sum_{i \in V_R} (1 - c_i) \times e^{-\frac{d_{ij}^2}{D_G}} \quad (3)$$

where V_R is a spherical volume of radius $R > D_G$ around the voxel j , d_{ij} is the distance between voxels and N_{V_R} is the total number of voxels inside the volume V_R , as shown in Figure 1.

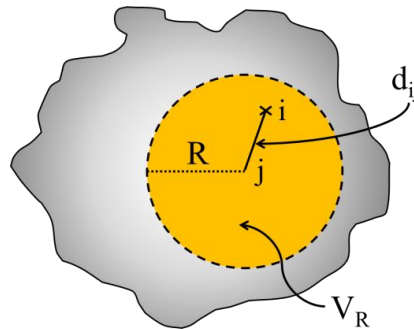


Figure 1- Search sphere used to determine nutrients concentration threshold for latency and necrosis states.

Each voxel contribution is weighted by the factor $(1 - c_i)$ which represents the remaining fraction of nutrients at that voxel. Table 2 summarizes cell classification, concentration thresholds and transitions between cell classes.

Table 2. Cell classification, thresholds and transition rules.

Class	Description	Threshold value	No therapy	Therapy
1	Equation (1)	$D > 0, c < 0.90$	$1 \rightarrow 2$	$1 \rightarrow 2$
2	Equation (1), hypoxic state	$D > 0, c \geq 0.90$	$2 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 3$	$2 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 3$
3	Latency, reversible state	$D > 0, \langle f \rangle \leq 0.02$	$3 \rightarrow 4$	$3 \rightarrow 2, 3 \rightarrow 4$
4	Necrosis, irreversible state	$\langle f \rangle \leq 0.006$	-	-

3. RESULTS AND DISCUSSION

Results for a high grade glioma are shown in Figures 2 and 3. Figure 2a shows the distribution of tumor classes for a 7-year evolution. The onset of necrosis appears at 3 years and according to Figure 2b, necrotic volume rapidly increases and becomes almost comparable to proliferative-invasive volume at the end of the 7-year time interval. Also, from Figure 2b, volumes at near saturation concentration (Class 2) states are comparable to latency (Class 3) states beyond the fourth year of time evolution, suggesting that an optimal radiotherapy treatment could be obtained if it is applied prior to the onset of latency, around the third year of tumor evolution. This fact is more evident in Figure 3, where the latent state reaches an almost constant percentage value of 8 – 9 % of total tumor volume beyond the fourth year of time evolution, which implies an improbable disease control beyond this point, which is consistent with clinical reality.

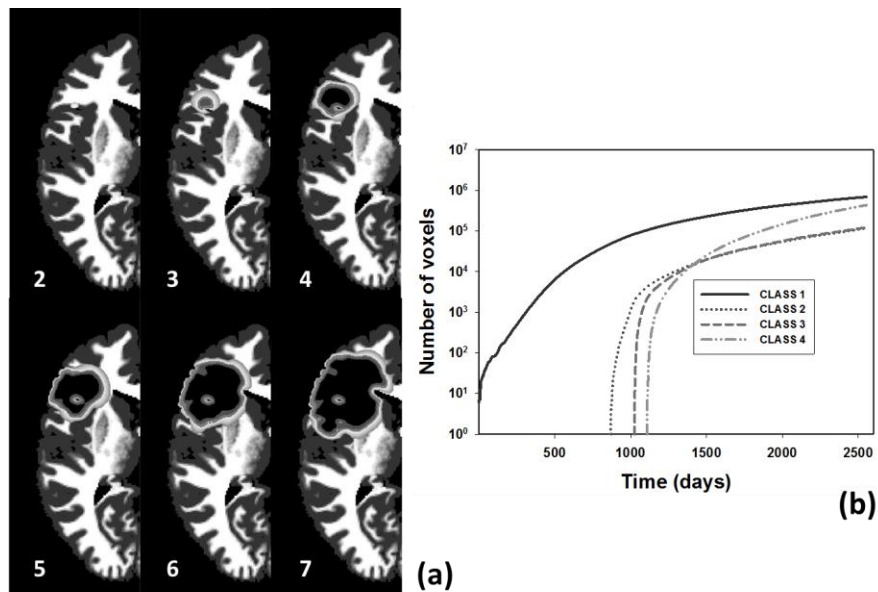


Figure 2 – Seven years' time evolution for a high grade glioma. (a) Distribution of tumor classes in an axial plane represented in grey levels, black corresponding to necrotic tissue. (b) Time evolution of the number of voxels for each class.

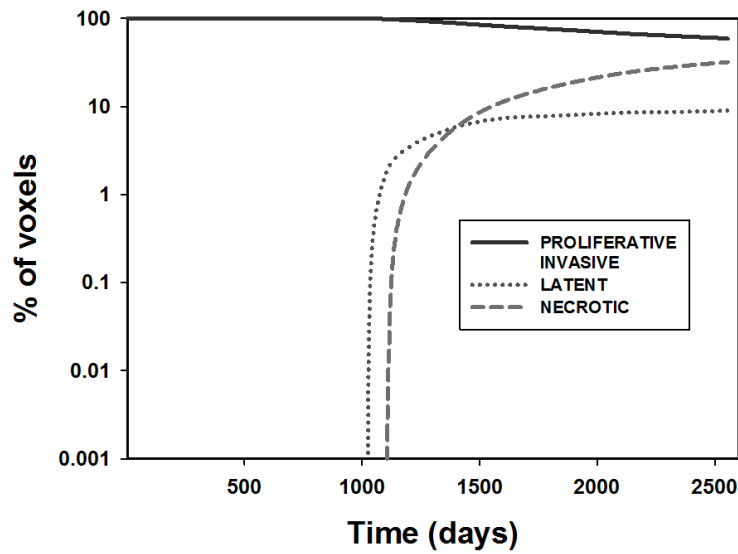


Figure 3 - Percentage time dependence for proliferative-invasive, latent and necrotic states.

4. CONCLUSIONS

The simple model proposed in the present work adequately simulates the general behavior observed in high grade gliomas based only on simple assumptions to account for latency and necrosis. Further work is addressed to the simulation of therapy and clinical determination of the model parameters, in order to apply it in actual treatment planning.

REFERENCES

- [1].Tracqui, P., Cruywagen, G.C., Woodward, D.E., Bartoo, G.T., Murray, J.D., Alvord Jr., E.C., A mathematical model of glioma growth: the effect of chemotherapy on spatio-temporal growth. *Cell Proliferation*, vol. 28, n. 1, pp. 17-31, 1995.
- [2].Swanson, K., Alvord, E., Murray, J., A quantitative model for differential motility of gliomas in grey and white matter. *Cell Proliferation*, vol. 33, pp. 317-329, 2000.
- [3].Jbabdi, S., Mandonnet, E., Duffau, H., Capelle, L., Swanson, K., Peligrini-Issac, M., Guillevin, R., Bannali, H., Simulation of anisotropic growth of low-grade gliomas using diffusion tensor imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*, vol. 54, pp. 616-624, 2005.
- [4].Eikenberry, S.E., Sankar, T., Preul, M.C., Kostelich, E.J., Thalhauser, C.J., Kuang, Y., Virtual glioblastoma: growth, migration and treatment in a three-dimensional mathematical model. *Cell Proliferation*, vol. 42, pp. 511-528, 2009.
- [5].Papadogiorgaki, M., Koliou, P., Kotsiakos, X., Zervakis, M.E., Mathematical modelling of spatio-temporal glioma evolution. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, vol. 10, pp. 47-77, 2013.

- [6]. Holdsworth, C.H., Corwin, D., Stewart, R.D., Rockne, R., Trister, A.D., Swanson, K.R., Phillips, M., Adaptive IMRT using a multiobjective evolutionary algorithm integrated with a diffusion–invasion model of glioblastoma. *Physics in Medicine and Biology*, vol. 57, pp. 8271–8283, 2012.
- [7]. Roniotis, A., Marias, K., Sakkalis, V., Manikis, G.C., Zervakis, M., Simulating radiotherapy effect in high-grade glioma by using diffusive modeling and brain atlases. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, vol. 2012, pp. 1-9, 2012.
- [8]. Cocosco, C., Kollokian, V., Kwan, R., Evans, A., Brainweb : On line interface to a 3d mri simulated brain database. In *Neuroimage. Proceedings of the Third International Conference on the Functional Mapping of the Human Brain*, vol. 5, part 2/4, S425, 1997.
- [9]. Jain, R. K., Transport of molecules in the tumor interstitium: a review. *Cancer Research*, vol. 47, pp. 3039-3051, 1987.

NUMERICAL SOLUTION OF A LINEAR MIXED-TYPE FUNCTIONAL DIFFERENTIAL EQUATION USING THE SEGMENTED TAU METHOD

Carmen Da Silva

carmen.dasilva@ciens.ucv.ve

Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela

Av. Los Ilustres, Los Chaguaramos, A.P. 20513, Caracas 1020-A, Venezuela

René Escalante

rescalante@usb.ve

Departamento de Cómputo Científico y Estadística, Universidad Simón Bolívar

Valle de Sartenejas, A.P. 89000, Caracas 1080-A, Venezuela

Abstract. *A new approach to solve numerically the boundary value problem defined with a linear mixed-type functional differential equation is presented. Autonomous and non-autonomous cases are considered. This approach use a segmented formulation of the Tau method, which provides a numerical solution in form of a piecewise polynomial, and this formulation allows us to approximate the solution on large intervals. The new scheme is validated in both autonomous and non-autonomous cases using examples with known exact solutions. For non-autonomous equation, the theory is developed assuming that the associated coefficients are polynomials of the same degree that the approximation sought. Our results in the autonomous case are comparing with those obtained from literature. A newest example for analyze the results in non-autonomous case is presented. The good numerical results obtained in the numerical experimentation of the proposed method provide evidence of its versatility to solve the considered problems on long intervals.*

Keywords: Mixed-type functional differential equation, Tau method, segmented Tau method.

1. INTRODUCTION

We consider the following linear non-autonomous functional differential equation with both advanced and delayed arguments

$$x'(t) = a(t)x(t) + b(t)x(t-1) + c(t)x(t+1), \quad (1)$$

where a , b and c are known continue functions. When a , b and c are constant functions, we say that Eq. (1) is autonomous. The study of this equation is motivated by applications in the analysis of the dynamic behavior of a competitive economy [1], nerve conduction [2], and travelling wave in a spatial lattice [3]. Several algorithms have been developed to approximate numerical solution of Eq. (1) on $[0, K-1]$ ($K \geq 2$ positive integer) assuming specific values on the intervals $[-1, 0]$ and $[K-1, K]$; [4,5]. These specific values are known as boundary conditions associated to Eq. (1). In this work, we will use the following notation for the boundary conditions:

$$\begin{aligned} x(t) &= \psi_1(t), \quad t \in [-1, 0], \\ x(t) &= \psi_2(t), \quad t \in [K-1, K]. \end{aligned} \quad (2)$$

Recently, we presented in [6] an algorithm that provides a numerical approximation to solution of boundary value problem defined for Eqs. (1) and (2) for autonomous case, applying the Tau method [7]. Now, in this paper, we provide a new definition of perturbation term when using the Tau method, and we present an extension of ideas for non-autonomous case. In the examples autonomous, we will compare our results with those obtained for other method found in the literature. The content of this article is distributed in four sections: the Tau method, segmented Tau approximation, numerical experimentation and conclusions.

2. THE TAU METHOD

The basic idea of the Tau method [7,8], is to find a polynomial that approximates the solution of differential equation $D[y(x)] = 0$, $x \in J$, subject to supplementary conditions, where D is a linear differential operator with polynomials or rational coefficients and J is a finite interval. The equation is disturbed by adding a term in the right-hand side, called perturbation term, defined as $H_n(x) = (\sum_{i=0}^r \tau_i x^i) (\sum_{j=0}^{n-r} C_j^{(n-r)} x^j)$, where $C_j^{(n-r)}$ is the j -th coefficient of Tchebyshev polynomial of the first kind defined on J of order $n-r$ and $\sum_{i=0}^r \tau_i x^i$ is a polynomial conveniently chosen in order to satisfy the supplementary conditions of the problem. Thus, $H_n(x)$ gives the best uniform approximation to the right-hand side of differential equation in J [7]. The parameters τ_i , $i = 0, \dots, r$, are determined so that the exact solution of the perturbed equation: $D[y_n^*(x)] = H_n(x)$, be a polynomial of degree n .

The differential operator D is associated with a sequence $\{Q_m(x)\}$ of polynomials, called canonical polynomials [7,8], such that, $D[Q_m(x)] = x^m$, $m \in N - S$, where N is the set of the nonnegative integers and S is a finite (or empty) set of N . Elements $\alpha \in S$, indicate that not exist a polynomial Q_α that satisfies the last equality. A polynomial with index α is called undefined canonical polynomial. The polynomial solution $y_n^*(x)$ is given in terms of the sequence of canonical polynomials associated to the linear differential operator.

In general, a system of linear equations for the Tau's parameters and coefficients of a polynomial of degree n is solved, so that this polynomial satisfies the perturbed equation and the supplementary conditions of the problem.

3. SEGMENTED TAU APPROXIMATION

We assume that the functions ψ_1 and ψ_2 of Eq. (2) are polynomials of degree n . Also, in the non-autonomous case, we suppose that the coefficients of Eq. (1) are polynomials of the same degree n . Otherwise, we would work with a polynomial approximation of these functions.

We consider the intervals of the form $(k, k + 1]$ with $k = 0, \dots, K - 2$. If $s = t - k$ for $t \in (k, k + 1]$ then $s \in [0, 1]$. We define $x_k(s) := x(s + k) = x(t)$, and we shifted $\psi_1(t)$ and $\psi_2(t)$, $t \in (k, k + 1]$, to the interval $[0, 1]$. Thus, Eqs. (1) and (2) are become:

$$\begin{cases} D^{(k)}[x_k(s)] := \frac{d}{ds} [x_k(s)] - a_k(s)[x_k(s)] = b_k(s)x_{k-1}(s) + c_k(s)x_{k+1}(s); \\ x_{-1}(s) := \psi_1(s - 1), \\ x_{K-1}(s) := \psi_2(s + K - 1), \end{cases} \quad (3)$$

where $a_k(s) := a(s + k)$ represent the shifted polynomial $a(t)$ of the step $(k, k + 1]$, to the interval $[0, 1]$. Analogous for $b_k(s)$ and $c_k(s)$. We applying the Tau method in each interval $(k, k + 1]$, with $k = 0, \dots, K - 2$.

3.1 Non-autonomous case

Using the theory developed in [7] about canonical polynomials, we can prove that the differential operator $D^{(k)}$ for $k \in \{0, \dots, K - 2\}$, has n undefined canonical polynomials, whose indexes associated are $0, 1, \dots, n - 1$. Moreover, those canonical polynomials associated with $D^{(k)}$, are generated with the following recursive formula,

$$Q_{n+m}^{(k)}(s) \begin{cases} -\frac{1}{\alpha_n^{(k)}} \left(s^m + \sum_{i=0}^{m-1} \alpha_{n-m+i}^{(k)} Q_{n+i}^{(k)}(s) \right) & \text{if } 0 \leq m \leq n, \\ -\frac{1}{\alpha_n^{(k)}} \left(s^m - m Q_{m-1}^{(k)}(s) + \sum_{i=1}^n \alpha_{n-i}^{(k)} Q_{n+m-i}^{(k)}(s) \right) & \text{if } m \geq n + 1. \end{cases} \quad (4)$$

It can be shown by mathematical induction, that $Q_{n+m}^{(k)}(s)$ corresponds to a polynomial of degree m , for all nonnegative integer m .

The perturbed differential equation is $D^{(k)}[x_k^*(s)] = b_k(s)x_{k-1}^*(s) + c_k(s)x_{k+1}^*(s) + H_n^{(k)}(s)$, where the perturbation term is defined as

$$H_n^{(k)}(s) = \begin{cases} \left(\sum_{i=0}^{n+1} \tau_i^{(0)} s^i \right) \left(\sum_{m=0}^{n-1} C_m^{(n-1)} s^m \right) & \text{if } k = 0 \\ \left(\sum_{i=0}^n \tau_i^{(k)} s^i \right) \left(\sum_{m=0}^n C_m^{(n)} s^m \right) & \text{if } 1 \leq k \leq K - 2 \end{cases}. \quad (5)$$

We assume that $x_k^*(s) = \sum_{i=0}^n \alpha_i^{(k)} s^i$, $s \in [0, 1]$. If $k = -1$ or $k = K - 1$, $x_k^*(s)$ is known polynomial ψ_1 or ψ_2 of the boundary conditions of Eq. (3). In addition, to ensure continuity in the approximation sought on the interval $(0, K - 1]$, the following condition (named continuity condition) must be satisfied: $x_k^*(0) = x_{k-1}^*(1)$, for $k = 0, \dots, K - 1$.

We substitute the perturbation term and polynomial $x_k^*(s)$ in the perturbed equation. Then, using the equality that relates $D^{(k)}$ and the canonical polynomials, and considering the linearity of the differential operator, we get an expression which has the notation of canonical

polynomials. This expression will contain terms relating with undefined canonical polynomials. We assume that coefficients of these terms are equal to zero, resulting $n(K - 1)$ linear equations. The simplify expression provides others $(n + 1)(K - 1)$ linear equations. The continuity condition gives K linear equations more. The system for unknowns: $\{a_i^{(k)}\}_{i=0}^n, \tau_{n+1}^{(0)}$ and $\{\tau_i^{(k)}\}_{i=0}^n$ with $k = 0, \dots, K - 2$, is solved using Householder QR factorization. The elements of the matrix and the vector of independent terms in the system of linear equations are given by the coefficients of $a_k, b_k, c_k, \psi_1, \psi_2$ and the coefficients of canonical polynomials of Eq. (4). Finally, using that $x_k^*(s) \approx x_k(s) := x(s + k) = x(t)$ for each k , we get a piecewise polynomial on the interval $(0, K - 1]$ which approximates the solution of the problem defined by Eqs. (1) and (2).

3.2 Autonomous case

Because the coefficients of Eq. (1) are now constant, the differential operator associated is the same for each step k , and is defined by, $D[x_k(s)] := x_k'(s) - ax_k(s)$, $s \in [0, 1]$. This differential operator not has undefined canonical polynomials. The formula for canonical polynomials can see in [6]. In comparison with Eq. (5), the perturbation term related with the perturbed differential equation for this case, has two parameters Tau for step $k = 0$ and one of them in the rest of the steps. When we look for the polynomial that satisfies both the perturbed differential equation and the continuity condition, we obtain $(n + 1)(K - 1) + K$ linear equations for unknowns $\{a_i^{(k)}\}_{i=0}^n, \tau_1^{(0)}$ and $\tau_0^{(k)}$ ($k = 0, \dots, K - 2$). The square system is solved too by Householder QR factorization.

4. NUMERICAL EXPERIMENTATION

In our experiments we use equations with known exact solutions. The first of them is related with the autonomous case, while the second experiment, corresponding to non-autonomous case.

Experiment 1. We consider Eq. (1) with $c = -3$, $a = \frac{0.9e^{0.9} + 0.3e^{-0.3}}{e^{0.9} - e^{-0.3}} - c(e^{0.9} + e^{-0.3})$ and $b = 0.9e^{0.9} - ae^{0.9} - ce^{-0.6}$. The exact solution is $x(t) = e^{0.9t} + e^{-0.3t}$ for $t \in \mathbb{R}$. The boundary conditions are chosen as the exact solution restricted to the intervals $[-1, 0]$ and $(K - 1, K]$.

Error between the piecewise polynomial approximations obtained by Segmented Tau Method and the analytical solution of the problem is estimated. This error is defined as $\frac{1}{N} \|\vec{x} - \vec{x}^*\|_2$, where \vec{x} and \vec{x}^* are vectors of N components corresponding to the values of the analytical and numerical solutions respectively, with the same grid of N points, and $\|\cdot\|_2$ is the Euclidean norm. In Table 1, we show the errors when $K = 3, 5, 7$ and 9 in the experiment 1. The Table 1 is divided in two major parts; the first six rows contain the error obtained by the Segmented Tau Method considering piecewise polynomial approximations of degrees $n = 3, 5, 8$ and 10; in the rest, we present the error generated by the method reported in [4], which is based in a central difference approximation and, because the nature of this method, use number increasing

of nodes $N = 16, 32, 64, 128$ and 256. When we calculate the error with our method, we use $N = 128$ in the formula of the error.

Table 1. The 2-norm errors on $(0, K - 1]$ for $K = 3, 5, 7$ and 9 , obtained by applying the Segmented Tau Method and the method reported in [4]

	$K = 3$	$K = 5$	$K = 7$	$K = 9$
Degree n	Error for Segmented Tau Method			
3	4.423e-005	1.651e-004	6.672e-004	3.027e-003
5	1.134e-007	2.953e-007	1.196e-006	5.426e-006
8	1.993e-012	6.302e-012	2.539e-011	1.154e-010
10	1.026e-015	8.840e-015	6.699e-014	7.926e-011
Nodes N	Error for Method Reported in [4]			
16	1.521e-004	1.067e-003	5.970e-003	1.048e-001
32	3.704e-005	2.605e-004	1.459e-003	7.979e-003
64	9.114e-005	6.429e-005	4.235e-004	8.336
128	2.258e-006	1.599e-005	1.246	2.859e+005
256	5.620e-005	1.801e-004	1.731e+003	4.257e+010

On central difference approximation, we expected that the error to decrease as the grid is refined; this can see in Table 1 when $K = 3$ and 5, but when K increased to 7 or 9, the error grows too. The error obtained with our method in this experiment, increases very slowly with K . In fact, the smallest errors shown in the Table 1 are registered with a piecewise polynomial of degree 10.

Experiment 2. We consider in Eq. (1) the coefficients $a(t) = \cos(t)$, $b(t) = -e^{2\sin((t+1)/2)}$ and $c(t) = e^{2\sin((t-1)/2)}$. The analytical solution in this case is: $x(t) = e^{2\sin(t/2)}$, $t \in \mathbb{R}$. Here, the boundary conditions are defined too as the analytical solution restricted to $[-1, 0]$ and $(K - 1, K]$.

To experiment 2, we calculate the absolute error in the infinity norm on $(0, K - 1]$ between the exact and numerical solutions by applying the method described in subsection 3.1. We use degrees 6, 7, 8 and 9, and considered $K = 3, 9, 13$ and 17. These errors are shown in the left-hand side of Fig. 1, concluding that with a piecewise polynomial of degrees 6 or 7, we obtained an approximation with two or more significant digits for all K . The graph of the analytical and numerical solutions and boundary conditions of experiment 2 for $n = 7$ and $K = 79$, is presented in the right-hand side of Fig. 1. The graph of numerical solution is on the graph of analytical solution. In this second experiment, we obtained favorable results for large values of K .

5. CONCLUSIONS

We have presented a new approach for the approximation of boundary value problem for a linear non-autonomous functional differential equation with both advanced and delayed arguments, using the segmented Tau method. With this method, numerical solutions are

generated as a piecewise polynomial of degree n , assuming that the coefficients in the non-autonomous case are approximated by polynomials of the same degree n . The ideas were also presented for the autonomous case. The numerical results obtained by our numerical experimentation in the autonomous case, indicate consistency with those reported by other authors elsewhere. We also observed that our method numerically solves the problems considered for long intervals.



Figure 1 – Left: Absolute error in ∞ -norm on $(0, K - 1]$ from different values of n and K .
Right: Graph of $x(t)$ for $n = 7$ and $K = 79$

Acknowledgements

The first author acknowledges financial support from the Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) at UCV.

REFERENCES

- [1] Rustichini, A., Hopf bifurcation for functional differential equations of mixed type. *Journal of Dynamics and Differential Equations*, vol. 1, n. 2, pp. 145-177, 1989.
- [2] Chi, H., Bell, J., & Hassard, B., Numerical solution of a nonlinear advance-delay-differential equation from nerve conduction theory, *Journal of Mathematical Biology*, vol. 24, pp. 583-601, 1986.
- [3] Abell, K. A., Elmer, C. E., Humphries, A. R., & Van Vleck, E. S., Computation of mixed type functional differential boundary value problems, *SIAM Journal of Applied Dynamical Systems*, vol. 4, n. 3, pp. 755-781, 2005.
- [4] Ford, N. J., Lumb, P. M., Lima, P. M., & Teodoro, M. F., The numerical solution of forward-backward differential equations: Decomposition and related issues, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 234, pp. 2745-2756, 2010.
- [5] Lima, P. M., Teodoro, M. F., Ford, N. J., & Lumb, P. M., Analytical and numerical investigation of mixed-type functional differential equations, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 234, pp. 2826-2837, 2010.
- [6] Da Silva, C., & Escalante, R., Segmented Tau approximation for a forward-backward differential equation, *Computers and Mathematics with applications*, vol. 62, n. 12, pp. 4582-4591, 2011.
- [7] Ortiz, E. L., The Tau method, *SIAM Journal of Numerical Analysis*, vol. 6, n. 1, pp. 480-492, 1969.
- [8] Lanczos, C., *Applied Analysis*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1956.

A COUPLED FEM-ODE MULTI-SCALE METHOD APPLIED TO THE MODELING OF EPM PROCESSES

Yves Du Terrail Couvat

Annie Gagnoud

Laurent Davoust

yves.duterrail@simap.grenoble-inp.fr

annie.gagnoud@cnrs.grenoble.fr

laurent.davoust@simap.grenoble-inp.fr

Laboratoire SIMaP , domaine universitaire

1340 Rue de la Piscine, 38400 Saint Martin d'Hères - France

Abstract. *We propose a method for modeling processes where small conductor elements (size varying from 1 micron to 1mm, and called particles or grains), are moving in salted water under an alternative electromagnetic field at media frequency (1KHz to 1 MHz). The physical problem involves electromagnetism solved by FEM coupled to trajectory equations solved by Runge-Kutta method. Electromagnetic FEM formulations are developed in 2 and 3 dimensions. For the multi-scale problems, a Chimera method is used. Multiple meshes are defined, one for the device and one for each small element. Meshes of particles are linked in the general numerical system through Lagrange interpolation laws. Separation of meshes is also accompanied with separation of state variables : each mesh is associated to its own state variables. Translation of each particle during time is modeled by a mesh glide along the trajectory inside the device mesh. Results obtained with the 2D electromagnetic formulations coupled to the trajectory equations will be presented and analyzed. 3D results are also presented for one static particle.*

Keywords: Multi-scale, Electromagnetic, FEM, ODE, Chimera

1. PHYSICAL SETTING

An induction device studied here (Fig. 1) is composed of a coil, a tank filled with a conductive (or not conductive) liquid and small conductive solid elements. The liquid container may be a cylinder or a rectangular box. Its size is 20 cm diameter or length. Particles are varying

in size, from $1\mu m$ to 10 mm and, in topology, from spherical to cylindrical, rectangular and even more complicated domain forms. Furthermore the number of particles may be some hundreds per cm.

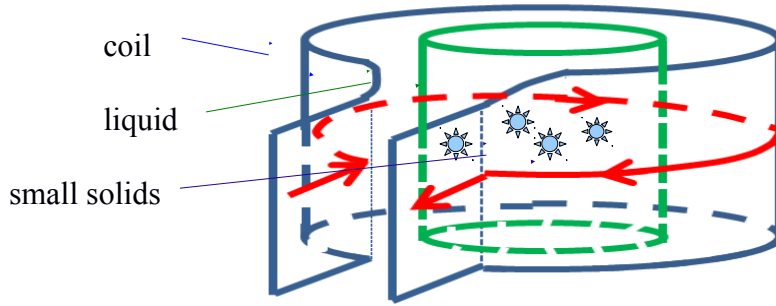


Figure 1 – Induction device

The aim of the study is to analyze the trajectories of these small solid objects under the effect of an alternative electromagnetic field with a frequency at some hundreds of KHz. The electromagnetic field acts on the particles but reciprocally, according to their sizes, particles may affect drastically the field distribution inside the container.

The analysis of the problem is based on the calculation of the electromagnetic field in the full device and on the exploration of forces acting on each small element. We can define two kinds of forces : electrical and mechanical.

- Mechanical forces are numerous : gravity, Archimedes and viscous breaking are the most important but according to the size, some additional terms like Basset forces and lift forces may be added. The general equation for particle motion is the following :

$$m_p \left(\frac{d\vec{w}}{dt} \right) = -C_v \vec{w} + (m_p - m_f) \vec{g} + \sum \vec{F} \quad (1)$$

where m_p is the particle mass, m_f the mass of a fluid particle, \vec{w} , the velocity vector,

C_v a coefficient for viscous forces, \vec{g} the gravity and \vec{F} the external forces due to electric and electromagnetic fields.

- Electric forces : different forces may occur according to high frequency electromagnetic fields and currents. The Maxwell equations are used considering conducting materials and no electric charges :

$$\text{curl } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} , \quad \text{curl } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} , \quad \text{div } \vec{D} = 0 , \quad \text{div } \vec{B} = 0 \quad (2)$$

with \vec{E} , electric field, \vec{H} , electromagnetic field, \vec{J} , current density, \vec{D} , displacement current and \vec{B} , magnetic flux density.

The material properties are defined inside the laws: $\vec{J} = \sigma \vec{E}$, $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, $\vec{H} = \nu \vec{B}$ where σ is the electric conductivity, ϵ the electric permittivity and ν the magnetic reluctivity. Due to the divergence free of induction \vec{B} , one can introduce the classical electromagnetic vector potential \vec{A} . A fundamental Helmholtz theorem states that a vector field can only be determined by specifying both its curl and its divergence. To force a unique solution for \vec{A} , we states that \vec{A} vector is divergence free (Coulomb Gauge). The maxwell equations expressed in function of \vec{A} and scalar potential V result finally in two generic equations :

$$\text{curl } \nu \text{ curl } \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + \sigma \text{ grad } V + \epsilon \text{ grad } \frac{\partial V}{\partial t} + \text{grad } \nu \times \text{curl } \vec{A} = \vec{J}_{\text{ext}} \quad (3)$$

$$\operatorname{div}\left(\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + \sigma \operatorname{grad} V + \epsilon \operatorname{grad} \frac{\partial V}{\partial t} + \operatorname{grad} v \times \operatorname{curl} \vec{A}\right) = 0 \quad (4)$$

Assuming a linear behavior of electromagnetic fields, we can develop the complex forms :

$$\operatorname{curl} v \operatorname{curl} \vec{A} + j \omega \sigma \vec{A} - \epsilon \omega^2 \vec{A} + \sigma \operatorname{grad} V + j \omega \epsilon \operatorname{grad} V + \operatorname{grad} v \times \operatorname{curl} \vec{A} = \vec{J}_{ext} \quad (5)$$

$$\operatorname{div}\left(j \omega \sigma \vec{A} - \epsilon \omega^2 \vec{A} + \sigma \operatorname{grad} V + j \omega \epsilon \operatorname{grad} V\right) = 0 \quad (6)$$

$$\text{We will consider Laplace forces } \vec{F} : \vec{F} = \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) \times \vec{B} \quad (7)$$

Consequently, \vec{F} is linked to distributions of \vec{A} , \vec{E} , V , σ and ϵ .

3. NUMERICAL MODEL

A FEM solver has been developed for the resolution of electromagnetic equations according to the Biro [1] decomposition. The following finite element formulations can be used :

- 2D cylindrical coordinates (r,z) using $r \vec{A}$ state variable.
- 2D cartesian coordinates (x,y) with perpendicular source current J_z .
- 2D cartesian coordinates with in plane source current (J_x, J_y) .
- 3D cartesian coordinates with current (J_x, J_y, J_z) or tension.

The trajectory is solved with a Runge-Kutta order 1 method, action c-2-2-2 in the next general algorithm :

```

I - Calculation of fluid velocities
II - weak influence : 'FEM Resolution of electromagnetic fields '
      DOMAIN = device without particles
III - resolution of trajectory equation
      III-1) initialize position of N Particles
      III-2) for each time step
            III-2-1) Strong influence : 'FEM Resolution of electromagnetic fields'
                  DOMAIN = device + N particles
            III-2-2) for each particle
                  c-2-2-1) calculate electric forces
                  c-2-2-2) calculate new position
            end
      end

```

Weak influence : In case of a population of 'small' grains, the magnetic field in the tank will not be affected by the presence of particles. The electromagnetic field calculation will be applied only on the mesh of the general device without grains. Particle meshes are used separately to evaluate the electric forces.

Strong influence : In case of a population of 'big' particles, the global magnetic field is linked to the particle positions. The FEM calculation is applied to the device and to the particles. Consequently mesh of device and particles are linked. The methodology which has been adopted here is the application of a Chimera method as proposed by Lions[2] and Romé [3]. Each particle has its own mesh including a small surrounding zone of liquid. In our approach each particle indexed by i has its own electromagnetic equations, and its own state variables \vec{A}_i and V_i .

A coupling exists between device fields \vec{A} and V and particle's fields \vec{A}_i and V_i . It is done by Lagrange interpolation between recovering zone of meshes (Fig 2, d and Fig. 3). Realization of coupling consists in replacing the discretized electromagnetic equations expressed on specific nodes in the general numerical system by the interpolation rules : nodes concerned are those of the fluid mesh covered by a particle mesh and those located on the boundary of a particle.(Fig. 2)

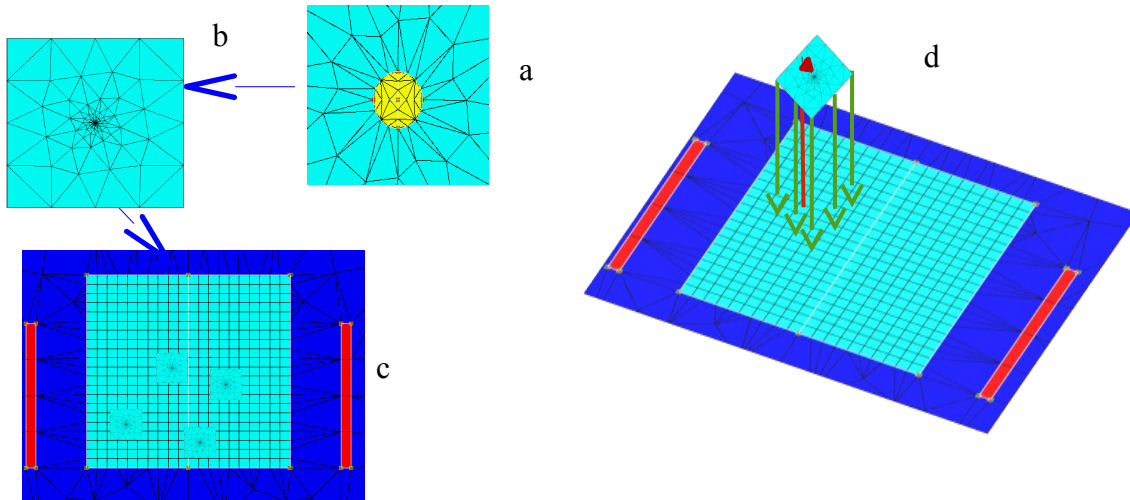


Figure 2 – Mesh superposition : a) zoom of a particle mesh, b) particle mesh ,c) general mesh of device and particles, d) scheme of principle for interpolation. : green arrows characterize interpolation for boundary nodes of particle and red arrow for liquid nodes

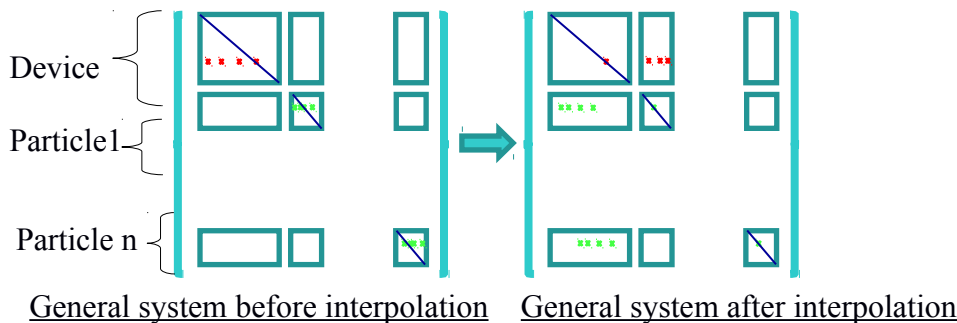


Figure 3 - Transformation of the numerical system resulting from Lagrange interpolations

4. APPLICATIONS

4.1 2D Cartesian Model

The geometric domain is built with a rectangular box of 20cm x 10 cm, 1 coil on each side , a box of air and some circular particles whose sizes and number values are variable. We study the effect of electromagnetic forces and evaluate the sensibility to some parameters. For these studies no fluid dynamics has been used and the fundamental dynamic law (1) is applied, considering only external electromagnetic force on each particle. The order 1 Euler method is used to solve numerically the trajectory equations.

Influence of particle size - Electromagnetic forces are integrated on each particle domain. Considering an iron particle in an AC field at 100KHz, the electromagnetic skin depth is 1 mm. Consequently particles of micrometer sizes will not influence the surrounding electromagnetic field. On the contrary, particles of mm size (=order of electromagnetic skin depth), will modify the global field and will moved more rapidly than small particles. In Fig. 4 a), trajectories of 3 particles have been compared. Paths of small particles are shorter than those of higher diameter, and different. Figure 4 b) shows the alteration of the field with a 100 microns particle.

Influence of particles number - Simulations start with a particle alone, then with one more particle and finally with 4 more. In the three cases, it appears clearly that these small elements interfere each other as shown on Fig. 5 a) and b). This is due to the modification of flux lines in the vicinity of the conductive object. On Fig. 5 c), flux line are represented around a 1mm particle.

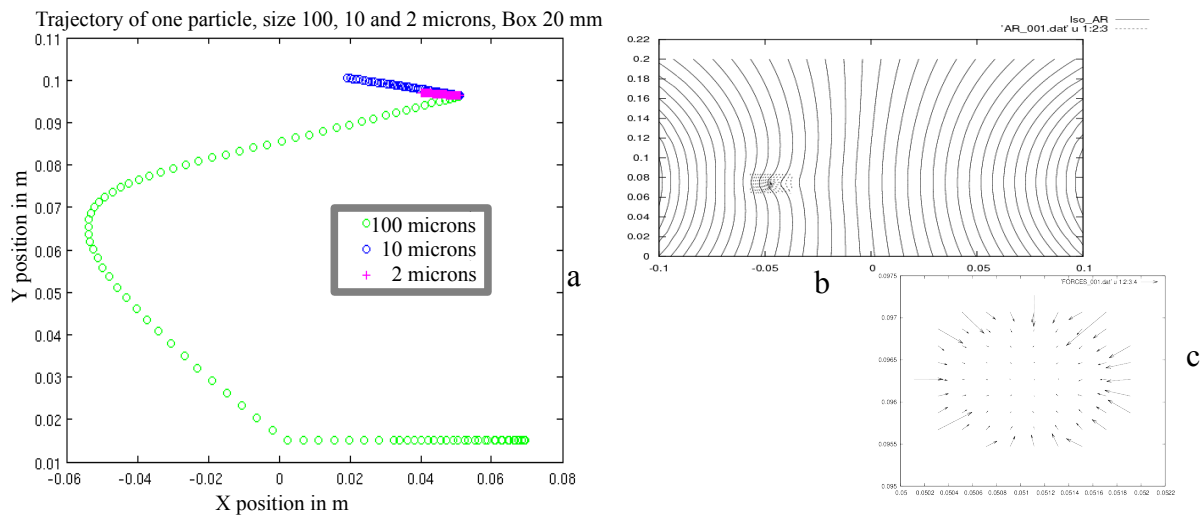


Figure 4 : a) relation particle sizes and trajectories, b) flux line in a tank with influence of one particle, c) electromagnetic forces inside a particle

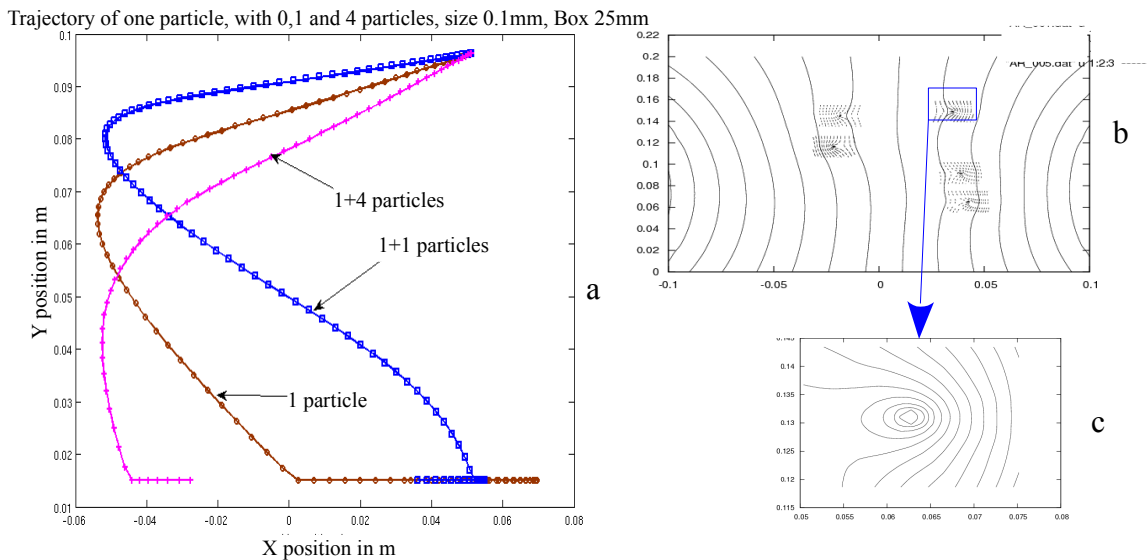


Figure 5 : a) influence of particles number and path, b) flux line in tank with 5 particles, c) flux line in a grain box.

4.2 3D Model

We consider a symmetric domain with a cylindrical coil and a rectangular tank. Only one quarter of the domain is described for the FEM problem. The particle is a 5mm size cube of iron (electric conductivity is $1e6$ SI). It is surrounded with a 3 cm size box of liquid. Particle and box are meshed together. This mesh is inserted in the global mesh of the domain composed of a coil, a 20 cm size salt water tank (electric conductivity is 10 SI) and a box of air. The system size is around 25000 degrees of freedom considering real and imaginary parts of complex variables \vec{A} and V . Results are presented in Fig. 6. The magnetic flux density \vec{B} all around the particle (Fig. 6b) and the power density in the tank (Fig. 6c) show that at the proximity of the particle, fields are perturbed. The distribution of power density in the tank is clearly deformed at its center where stays the particle and \vec{B} directions are drastically modified around the particle.

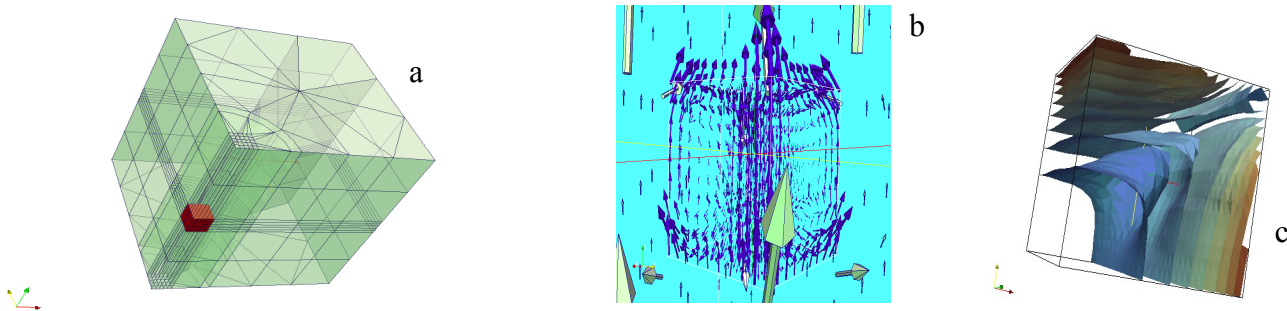


Figure 6 : 3D application of chimera method : a) mesh of 3D domain and tank (in red), b) magnetic flux density around a 5 mm particle inside the tank, c) power density iso-surfaces in the tank. (images generated with Paraview[®] software [4])

5. CONCLUSION

The Efficiency of Chimera method used to solve the multi scale problem related to small conductive particles moving in an electromagnetic field has been shown in 2 and 3 dimensions. Some problems still have to be analyzed like superposition of grain meshes, rotation forces. Fluid mechanics must be introduced in the future to validate correctly this model with experiments.

REFERENCES

- [1]. J.L. Lions, O. Pironneau, "Domain decomposition methods for CAD", C.R.A.S., 328, pp73-80, Paris 1999.
- [2]. C. Romé, "méthode de raccordement de maillages non-conformes pour la résolution des équations de Navier-Stokes ", PHD thesis., University of Bordeaux, France, June 2006.
- [3]. O. Biro, K. Preis, On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents, IEEE Transactions on magnetics, vol. 25, n. 4, pp. 3145-3159, July 1989.
- [4]. <http://www.paraview.org/>

ESTUDIO DEL USO DE DISTINTAS FAMILIAS DE WAVELETS EN LA RESOLUCION DE SISTEMAS DE ECUACIONES LINEALES RESULTANTES DE DISCRETIZACIONES MIMETICAS

Enrique V. Flores

Edwin E. Vargas

Demetrio J. Rey

evflores@uc.edu.ve

vargase@uc.edu.ve

drey@uc.edu.ve

Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Bárbula - Naguanagua, Estado Carabobo, Venezuela.

Resumen. *Se muestra el estudio del uso de distintas familias de wavelets en la resolución de los sistemas de ecuaciones lineales provenientes de discretizaciones miméticas en la solución numérica de ecuaciones diferenciales. Se determina el esquema numérico de un problema de valores en la frontera unidimensionales proveniente del uso de discretizaciones miméticas, se aplican filtros wavelets de distintas familias a los esquemas obtenidos, se resuelve el sistema resultante mediante métodos iterativos sin preconditionamiento y se determina el número de iteraciones y el error en la aproximación obtenida para los diferentes casos. Se hace una comparación de los resultados obtenidos entre los distintos filtros empleados. Se concluye que el número de iteraciones es sensible a la familia wavelet empleada, y que la diferencia en la cantidades de iteraciones al emplear distintas familias wavelets se hacen más notables a medida que aumenta el tamaño del sistema.*

Palabras Clave: Wavelet, Discretizaciones miméticas, Métodos iterativos

1. INTRODUCCION

En la solución numérica de problemas de valores en la frontera, existen diversas técnicas de discretización, las cuales permiten cambiar variables continuas por sus versiones discretas. Abouali y Castillo [1], señalan que las discretizaciones miméticas han surgido como técnicas de discretización que han sido empleadas en áreas tales como propagación de la ondas, estudios sísmicos, electrodinámica, y procesamiento de imágenes superando en precisión y desempeño a

otras técnicas de discretización de uso común en las áreas mencionadas. Hernández [2], indica que el empleo de éstas técnicas conduce a sistemas de ecuaciones lineales cuya matriz de coeficientes es, en forma general, dispersa; lo que indica que es apropiado el uso de métodos iterativos en la resolución de dichos sistemas. Castellanos [3], afirma que se estima que entre el 70 % y el 90 % del tiempo de un proceso de la aproximación numérica es ocupado en la resolución de dichos sistemas.

Acevedo [4], centra su trabajo en el empleo de la transformada wavelet discreta (DWT por sus siglas en inglés) en la resolución de grandes sistemas de ecuaciones lineales; sistemas que surgen en el proceso de solución de ecuaciones diferenciales, empleando filtros de la familia daubechies. No obstante, existe una importante cantidad de familias de funciones wavelets que han probado ser especialmente útiles; entre ellas destacan la Haar, Daubechies, Biortogonal, Coiflets, Symlets, Morlet, Sombrero mexicano y Meyer, entre otras. Jiménez y Jiménez [5] indican que estas familias presentan características que la definen y diferencian de las otra, las cuales permiten adaptarlas a determinadas aplicaciones. Blasco [6] señala que no se puede afirmar que exista una función wavelet óptima, sino que en cada caso particular, existirá una función wavelet que mejor se adapta a la data de interés.

El presente trabajo se centra en el estudio del uso de distintas familias de wavelets al emplear la DWT en la resolución de sistemas de ecuaciones lineales que surgen del uso de métodos miméticos.

2. PROBLEMA DE VALORES EN LA FRONTERA UNIDIMENSIONAL Y MÉTODOS MIMÉTICOS

Un problema de valores en la frontera unidimensional consiste en determinar en el intervalo $[a,b]$ la solución de la ecuación diferencial :

$$\frac{d^2}{dx^2}u(x) + a(x)\frac{d}{dx}u(x) + b(x)u(x) = f(x) \quad (1)$$

sometida a ciertas condiciones:

$$L_1u(a) + L_2\left(\frac{d}{dx}u\right)_{x=a} = \gamma_1, R_1u(b) + R_2\left(\frac{d}{dx}u\right)_{x=b} = \gamma_2 \quad (2)$$

conocidas como condiciones de Robin.

Hernández [2], afirma que la Ec. (1) puede expresarse, en términos del operador nabla como:

$$\nabla \bullet \nabla u + a \left[\vec{v}(x) \bullet \nabla u \right] + bu = f \quad (3)$$

siendo $\vec{v}(x) = (1)$, sujeta a las condiciones:

$$L_1u + L_2 \vec{n} \bullet \nabla u = \gamma_1 \text{ en } x = a \quad (4)$$

$$R_1u + R_2 \vec{n} \bullet \nabla u = \gamma_2 \text{ en } x = b$$

Siendo $\vec{n} = (1)$. ∇u recibe el nombre de Gradiente de u , $\nabla \bullet \nabla u$ recibe el nombre de Divergencia de u , y $\vec{n} \bullet \nabla u$ recibe el nombre de Derivada en la dirección normal a la frontera.

Así mismo, Hernández[2] señala que una técnica para la obtención de la solución aproximada del problema de valores en la frontera en emplear la discretización en diferencias finitas. Un método numérico se le denomina mimético si produce discretizaciones en diferencias finitas para los operadores Gradiente, Divergencia y Derivada en la dirección normal a la frontera, que satisfacen la identidad de Green generalizada. La aplicación de métodos miméticos al problema de valores en la frontera planteado conduce a un sistema de ecuaciones lineales de la forma:

$$Ax = b \quad (5)$$

3. APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA EN LA RESOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES LINEALES SURGIDOS DE LOS MÉTODOS MIMÉTICOS

Acevedo[4] plantea que un sistema tal como el descrito por la Ec. (5) puede transformarse a un sistema de la forma:

$$\hat{A} \hat{x} = \hat{b} \quad (6)$$

donde:

$$\hat{A} = WAW^T \quad (7)$$

$$\hat{x} = Wx \quad (8)$$

$$\hat{b} = Wb \quad (9)$$

siendo W la matriz de transformación wavelet; la cual puede definirse como:

$$W = \begin{pmatrix} H \\ G \end{pmatrix}_{n \times n} \quad (10)$$

donde:

$$H = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & \cdots & h_L & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & h_2 & \cdots & h_L & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_3 & h_4 & \cdots & h_L & 0 & \cdots & \cdots & 0 & h_1 & h_2 \end{pmatrix}_{\frac{n}{2} \times n} \quad (11)$$

$$G = \begin{pmatrix} g_1 & g_2 & \cdots & g_L & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & g_1 & g_2 & \cdots & g_L & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_3 & g_4 & \cdots & g_L & 0 & \cdots & \cdots & 0 & g_1 & g_2 \end{pmatrix}_{\frac{n}{2} \times n} \quad (12)$$

H y G son las representaciones matriciales de dos filtros denominados pasa-alto y pasa-bajo respectivamente. El filtro pasa-alto, el cual determina información de alta frecuencia, queda determinado por los coeficientes $\{h_i\}_{i=1}^L$; mientras que el filtro pasa-bajo, el cual determina información de baja frecuencia, queda determinado por los coeficientes $\{g_i\}_{i=1}^L$. Este conjunto de coeficientes queda determinado por la familia wavelet que sea elegida. Obtenida la solución \hat{x} el

sistema descrito por la Ec. (6) la solución x del sistema descrito por la Ec. (5) se obtiene mediante:

$$x = W^T \hat{x} \quad (13)$$

El procedimiento descrito se puede emplear solo para sistemas cuyo tamaño sea $n = 2^k$, $k \in \mathbb{N}$.

4. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

Se toma como problema de valores en la frontera a resolver un caso particular del mostrado por Hernández y Buchar[7], el cual se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dx^2} u(x) + \xi \frac{d}{dx} u(x) &= \frac{e^{-x}(1-\xi)}{e^{-1}}, \quad 0 < x < 1 \\ (-e^{-1})u(0) - (1-e^{-1})\left(\frac{d}{dx}u\right)_{x=0} &= -1 \\ (-e^{-1})u(1) + (1-e^{-1})\left(\frac{d}{dx}u\right)_{x=1} &= 0 \end{aligned}$$

Se determina el sistema descrito por la Ec. (6) de tamaño $n = 2^k$, $k \in \{4,5,6,7,8,9\}$ para el valor de $\xi = 10$. Las familias de wavelets empleadas son las familias daubechies, symlets, biorthogonal y reverse biorthogonal, usando en cada caso un número de coeficientes $m=4,6,8$. En cada caso se calcula la cantidad de iteraciones y el error relativo en la aproximación de la solución del sistema mediante el uso del método iterativo BICGSTAB sin preconditionamiento.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos pueden observarse en las Fig. 1 a la Fig. 6. Puede notarse que el número de iteraciones y el error relativo es sensible a la familia que se emplee. En los experimentos realizados, se observa que las familias daubechies y symlets tienen comportamientos similares en relación al número de iteraciones y al error relativo en la aproximación. La familia biorthogonal es la que ofrece menor error relativo en la aproximación a expensas de un aumento en el número de iteraciones. La familia reverse biorthogonal ofrece en la mayoría de los casos el menor número de iteraciones con un mayor error relativo. Las diferencias entre las cantidades de iteraciones al emplear distintas familias wavelets se hacen más notables a medida que aumenta el tamaño del sistema. En forma general, el error en la aproximación aumenta a medida que aumenta el tamaño del sistema.

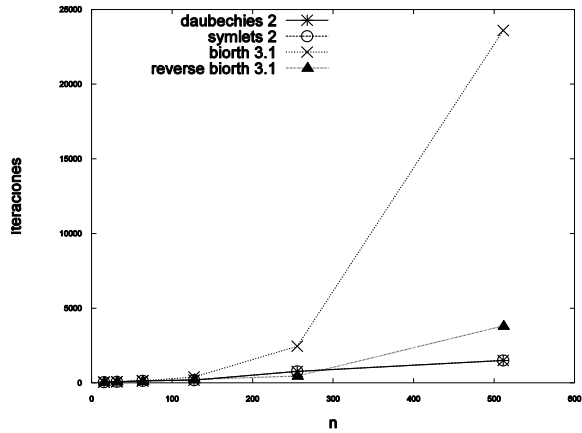


Figura 1: Iteraciones vs tamaño del sistema, caso $m=4$

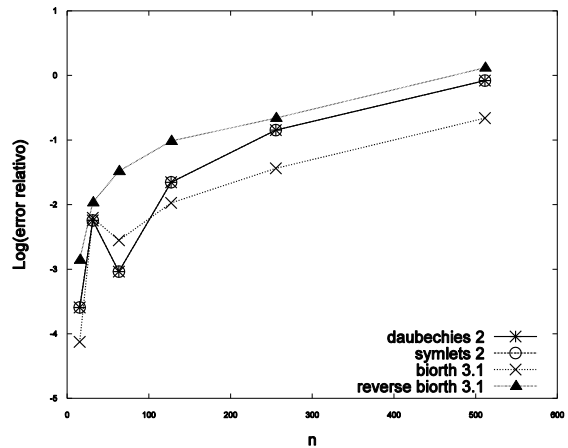


Figura 2: Log(Error Relativo) vs tamaño del sistema, caso $m=4$

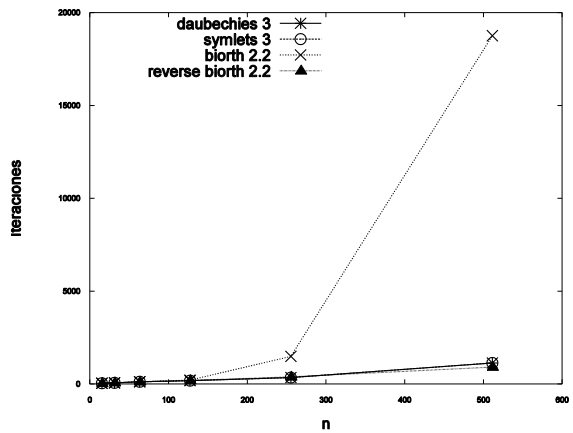


Figura 3: Iteraciones vs tamaño del sistema, caso $m=6$

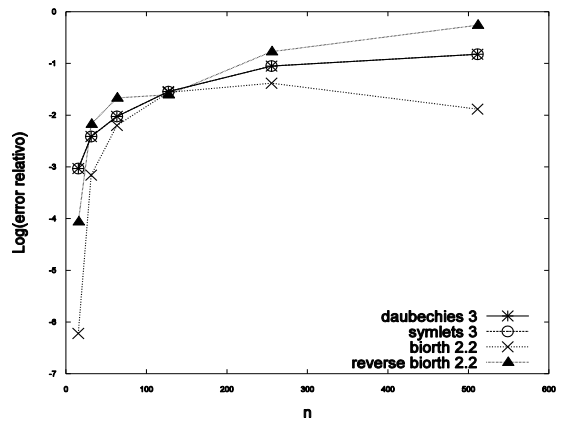


Figura 4: Log(Error Relativo) vs tamaño del sistema, caso $m=6$

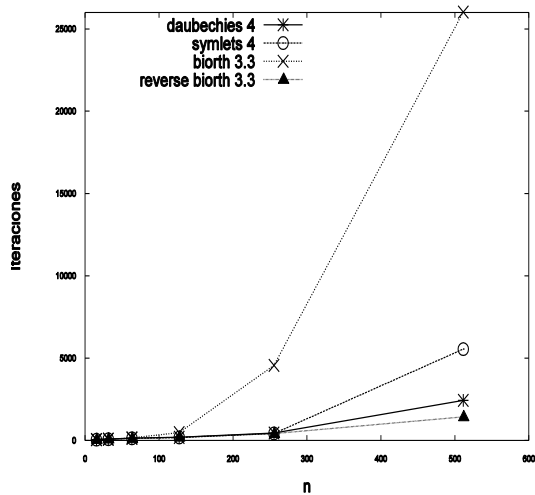


Figura 5: Iteraciones vs tamaño del sistema, caso $m=8$

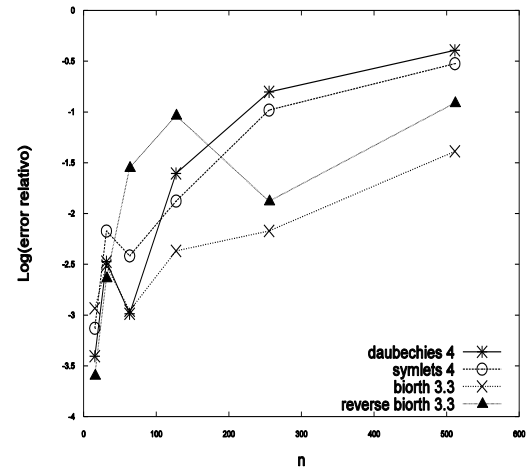


Figura 6: Log(Error Relativo) vs tamaño del sistema, caso $m=8$

6. CONCLUSIONES

Puede concluirse el uso de distintas familias de wavelets en conjunto con métodos iterativos en los sistemas de ecuaciones provenientes del uso de discretizaciones miméticas es sensible a la familia wavelet que se emplee. Las diferencias entre las cantidades de iteraciones al emplear distintas familias wavelets se hacen más notables a medida que aumenta el tamaño del sistema.

REFERENCIAS

- [1].Abouali, M., Castillo, J., High-Order Compact Castillo-Grone's Mimetic Operators. *Computational Science & Engineering Faculty and Students Research Articles*. San Diego State University, College of Sciences, San Diego, California, USA, 2012.
- [2].Hernández, F., *Estudio de los Sistemas Lineales Dispersos provenientes de discretizaciones miméticas. Caso: Operador de Convección-Difusión*. Trabajo Especial de Grado de Maestría. Universidad de Carabobo, 2005.
- [3].Castellanos, J., *Soporte de memoria out-of-core para biblioteca de solución de sistemas dispersos*. Tesis Doctoral. Universidad de Carabobo, 2012.
- [4].Acevedo, L., *Computación Paralela de la Transformada Wavelet; Aplicaciones de la Transformada Wavelet al Álgebra Lineal Numérica*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- [5].Jiménez C., Jiménez J., *Clasificación de señales de voz utilizando Transformada de Wavelet y Máquinas de Vectores de Soporte*. Trabajo de ascenso no publicado. Universidad de Carabobo, 2010.
- [6].Blasco, S., *Técnicas de umbralización orientadas a la implementación de sistemas portátiles de monitorización de electrocardiogramas*. Proyecto de Fin de Carrera. Universidad de Sevilla, 2007.
- [7].Hernández, F., y Buchart, C., Discretización de la Ecuación Escalar de Convección-Difusión Utilizando Métodos Miméticos. *Simulación y Modelado en Ingeniería y Ciencias, SVMNI*, pp. CT27-CT34, 2006.

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE GASES Y SUS MEZCLAS CONSIDERANDO EL PRINCIPIO DE ESTADOS CORRESPONDIENTES UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL.

Richard R. Rodríguez A.

Zulay Niño

rirodrig@uc.edu.ve

Centro de Investigaciones Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIAUC), Valencia Venezuela.

Miguel Luis

Facultad de Ciencia y Tecnología, Dpto. Química, de la Universidad de Carabobo, Valencia Venezuela.

Demetrio Rey Lago.

Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado (IMYCA) de la Universidad de Carabobo, Valencia Venezuela.

Resumen. *Se desarrolló una herramienta computacional para determinar las propiedades termodinámicas de gases y sus mezclas; particularmente, para el caso de las mezclas de gases producto de la combustión en motores de combustión interna. Se considera el Principio de Estados Correspondientes, a través de varios modelos publicados en literatura especializada. Las propiedades termodinámicas de los gases consideradas son: Presión (P), Temperatura (T), volumen específico (v), factor de compresibilidad (Z), entalpía (h), entropía (s) y energía interna (u). La investigación se dividió en cuatro fases: identificación de los fundamentos teóricos, diseño del algoritmo de cálculo, implementación del algoritmo en lenguaje de programación y verificación de los resultados obtenidos. El algoritmo de cálculo se basa en los requerimientos de la Termodinámica y la Química utilizándose los modelos de Reynolds, Redlich-Kwong, Pitzer, y las reglas de Kay, Van der Waals, Prausnitz, Amagat y Dalton. Para la determinación de las propiedades fue necesario el desarrollo e implementación de rutinas de aproximación numérica como: solución de ecuaciones de una variable, ajuste de curvas e integración y diferenciación numérica. El algoritmo de cálculo fue codificado en Visual Basic 6.0 y Maple 12.0. Los resultados obtenidos del uso de la herramienta computacional, a través del modelo de Reynolds, fueron objeto de comparación con los reportados por Nelson-Obert, verificándose que concuerdan satisfactoriamente tanto en lo cuantitativo como en lo fenomenológico; en ninguna aplicación se*

apreció un error relativo superior al 4.9%. También fueron objeto de comparación resultados de otros modelos utilizados. El programa desarrollado puede simplificar, confiablemente, el trabajo de determinación de propiedades termodinámicas de gases y sus mezclas en condiciones reales. Permite analizar de manera eficiente la relación funcional que hay entre las diversas propiedades de los gases y sus mezclas. Al comparar con resultados experimentales, permite discernir sobre la precisión y aplicabilidad entre los diversos modelos propuestos.

Palabras claves: Mezcla de gases, Principio de estados correspondientes, Propiedades termodinámicas y Gases reales.

1. INTRODUCCIÓN

Según Smith *et al* [1] los gases y sus mezclas se comportan de manera diferente a determinadas temperaturas y presiones, pero se comportan de manera similar a temperaturas y presiones normalizadas respecto a sus temperaturas y presiones críticas. A lo anterior se le denomina *Principio de Estados Correspondientes*. El factor de compresibilidad Z para todos los gases es aproximadamente el mismo a iguales Presiones y Temperaturas normalizadas o reducidas. Este factor Z se puede evaluar como:

$$Z = \frac{Pv}{RT} \quad (1)$$

Para Cengel y Boles [2] una descripción precisa del comportamiento P - T de los gases, dentro de un amplio intervalo de temperaturas y presión, se requiere del uso de ecuaciones complejas que permitan la determinación de propiedades sin la utilización de gráficos o tablas.

2. PROPIEDADES TERMODINAMICAS DE LAS MEZCLAS DE GASES NO REACTIVAS

2.1 Ecuaciones de estado $P - v - T - Z$

Ecuación de Reynolds. El modelado del diagrama generalizado de compresibilidad, el cual representa el comportamiento normalizado de unos 400 datos experimentales, según Reynolds [3], se obtiene a través de la ecuación siguiente:

$$Z = 1 + r \cdot B(\tau) + r^2 \sum_{i=7}^{10} A_i \cdot \tau^{i-7} + r^3 \sum_{i=11}^{13} A_i \tau^{i-11} + r^4 A_{14} \tau + r^5 (A_{15} \tau^2 + A_{16} \tau^3) + r^6 A_{17} \tau^2 + r^7 (A_{18} \tau^2 + A_{19} \tau^3) + r^8 A_{20} \tau^3 + \{r^2 (A_{21} \tau^3 + A_{22} \tau^4) + r^4 (A_{23} \tau^3 + A_{24} \tau^5) + r^6 (A_{25} \tau^3 + A_{26} \tau^4) + r^8 (A_{27} \tau^3 + A_{28} \tau^5) + r^{10} (A_{29} \tau^3 + A_{30} \tau^4) + r^{12} (A_{31} \tau^3 + A_{32} \tau^4 + A_{33} \tau^5)\} \cdot e^{-\gamma r^2} \quad (2)$$

En la Ec. 2, las constantes A_i y γ y los parámetros adimensionales r , τ y B se encuentran publicados en Reynolds [3]. En este caso se trata la mezcla de gases reales como una sustancia pseudopura aplicando las reglas de mezclado de Kay, publicadas en Van Wylen *et al* [4].

Ecuación de Redlich-Kwong. Para una mezcla de gases en condiciones reales queda:

$$P_m = \frac{\bar{R}T_m}{v_m - b_m} - \frac{a_m}{(T_m)^{1/2} v_m (v_m + b_m)} \quad (3)$$

En este caso, las reglas de mezclado aplicadas con más frecuencia para determinar los parámetros a_m y b_m son las clásicas del tipo Van der Waals publicadas en Van Wylen *et al* [4], en conjunto con las de Prausnitz, publicadas en Prausnitz *et al* [5].

Correlación del tipo Pitzer. El factor de compresibilidad de la mezcla se determina como:

$$Z_m = Z_m^0 + \omega_m Z_m^1 \quad (4)$$

Para este modelo se pueden utilizar las correlaciones propuestas por Abbott [6] para Z_m^0 y Z_m^1 y se utiliza la regla de mezclado de Kay, publicadas en Van Wylen *et al* [4].

2.2 Propiedades h, u y s de mezclas de gases reales

Según Smith *et al* [1] proponen las correlaciones termodinámicas siguientes para el cálculo de las desviaciones con respecto al modelo ideal, llamadas propiedades residuales H_m^R y S_m^R :

$$h_m = h_{0m} + H_m^R \quad (5)$$

$$s_m = s_{0m} + S_m^R \quad (6)$$

$$u_m = h_m - Z_m \bar{R}(T_m) \quad (7)$$

Según Smith *et al* [1], para la evaluación de la entalpía de una mezcla de gases ideales se emplea la ecuación:

$$h_{0m} = hgim + Cp_{hm}(Tm - T_0) \quad (8)$$

y la entropía depende de la presión o el volumen de la mezcla, así como de su temperatura, con la finalidad de facilitar los cálculos se cuenta con la ecuación siguiente:

$$s_{0m} = sgim + Cp_{sm} \cdot \ln(T_m/T_0) - \bar{R} \cdot \ln(P_m/101.325) \cdot n_m - \bar{R} \cdot \sum_{i=1}^n n_i \cdot \ln(y_i) \quad (9)$$

donde la presión de la mezcla (P_m) debe estar expresada en kPa.

Propiedades residuales de Reynolds. Las funciones desviación de entalpía y entropía, ver Ec. 10 y 11, respectivamente; son básicamente función del modelo del factor generalizado de compresibilidad.

$$\frac{h^o(T) - h}{RT_c} = - \int_0^r \frac{1}{r} \left(\frac{\partial Z}{\partial \tau} \right)_r dr + \left(\frac{1 - Z}{\tau} \right) \quad (10)$$

$$\frac{s^o(T,P)-s}{R} = -\tau \int_0^r \frac{1}{r} \left(\frac{\partial Z}{\partial \tau} \right)_r dr + \int_0^r \left(\frac{Z-1}{r} \right) dr - \ln(Z) \quad (11)$$

Propiedades residuales establecidas por Redlich-Kwong. Se utilizan las Ecs. 12 y 13 mostradas a continuación:

$$H_m^R = \left[Z_m - 1 - \left(\frac{3a_m}{2b_m \bar{R}T_m^{1.5}} \right) \ln(1 + h_r) \right] \bar{R}T_m \quad (12)$$

$$S_m^R = \bar{R} \left(\frac{H_m^R}{\bar{R}T_m} - \ln(\gamma_m) \right) \quad (13)$$

Los parámetros h_m y γ_m se determinan según las correlaciones publicadas en Smith *et al* [1].

Propiedades residuales establecidas por las correlaciones tipo Pitzer. En este modelo se utilizan las ecuaciones siguientes:

$$H_m^R = \bar{R}T_{pc}P_{pr} \left[B_m^0 - T_{pr} \frac{dB_m^0}{dT_{pr}} + \omega m \left(B_m^1 - T_{pr} \frac{dB_m^1}{dT_{pr}} \right) \right] \quad (14)$$

$$S_m^R = -\bar{R}P_{pr} \left(\frac{dB_m^0}{dT_{pr}} + \omega m \frac{dB_m^1}{dT_{pr}} \right) \quad (15)$$

3. RESULTADOS

Como una muestra de las potencialidades de la herramienta se consideró la mezcla de gases producto de la combustión del iso-octano señalada en la Tabla 1. Las condiciones de referencia consideradas son: $T_0=298$ K, $h_{gi}=s_{gi}=0$ y $P_0=101.325$ kPa.

Tabla 1. Elementos y compuestos químicos constituyentes de la mezcla de gases.

elemento	Ar	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	NO	NO ₂	N ₂
Moles	0.00786	0.07541	0.01277	0.07008	0.10575	0.05027	0.00003	0.63025

Tabla 1. Elementos y compuestos químicos constituyentes de la mezcla de gases. (Finalización)

elemento	N ₂ O	O ₂
moles	0.00001	0.04757

En la Fig. 1 se aprecian los resultados para el factor de compresibilidad para los modelos de Reynolds basado en el diagrama de Nelson-Obert [6] (N-O), Redlich-Kwong (R-K) y Pitzer (P). En la Fig. 2 y 3 se aprecian los resultados para la entalpía y entropía de la mezcla según los modelos considerados.

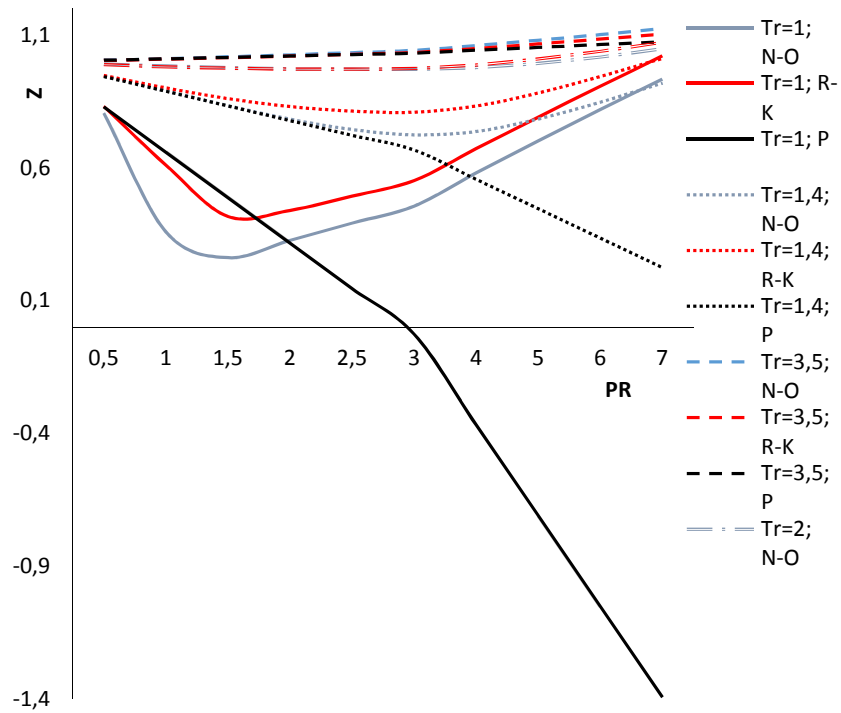


Figura 1. Comportamiento del factor de compresibilidad Z de la mezcla.

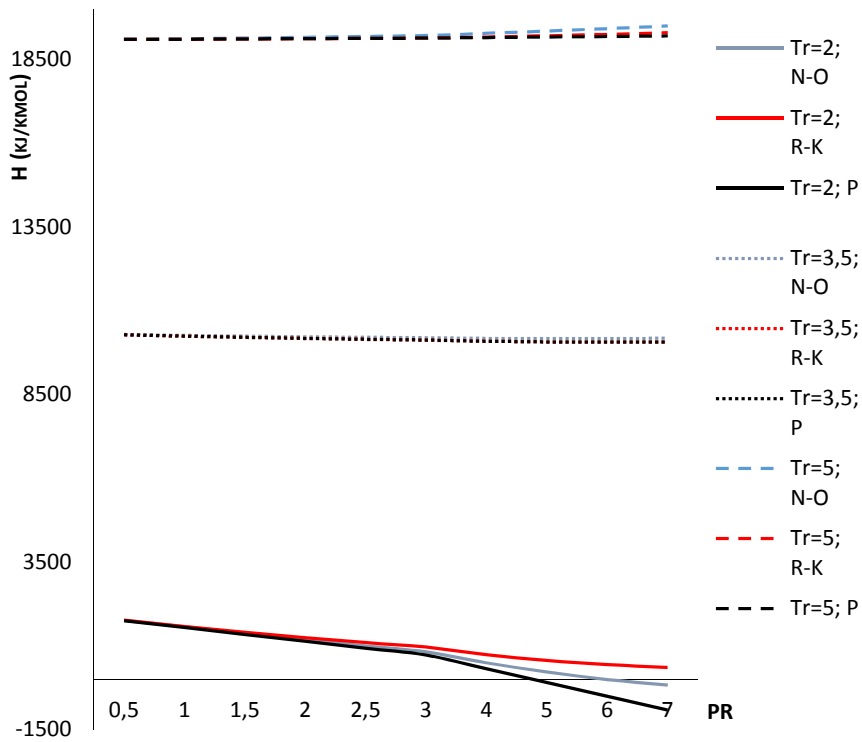


Figura 2. Comportamiento de la entalpía h de la mezcla.

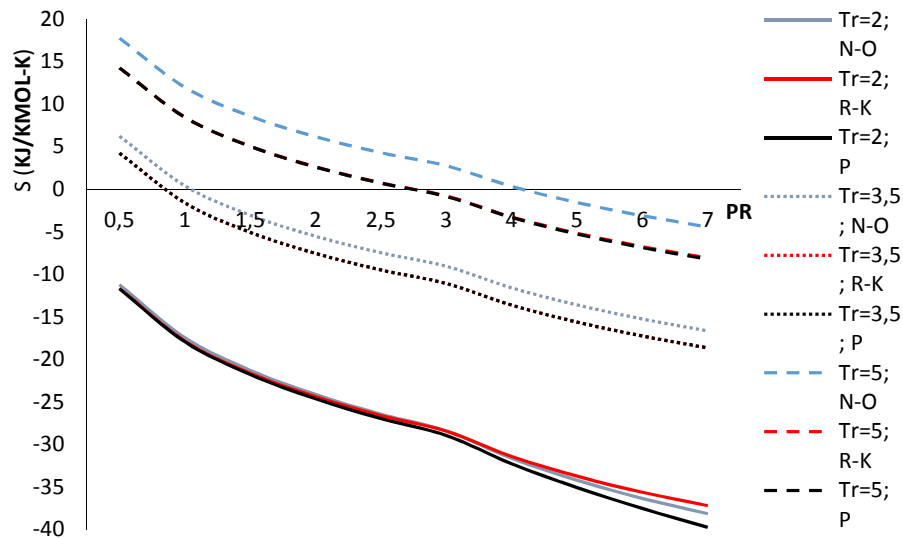


Figura 3. Comportamiento de la entropía s de la mezcla.

4. CONCLUSIONES

Se ha utilizado el modelo propuesto por Reynolds [3] para obtener el comportamiento de las propiedades P - v - T - Z - h - u - s de mezclas de gases obteniéndose resultados aceptables en el área de la ingeniería, con errores relativos menor al 4.9% con respecto al diagrama de Nelson-Obert [7]. También se utilizaron otros modelos, los cuales menos complejos, pero con precisión limitada en el amplio intervalo de presiones y temperatura reducidas aplicables en el campo ingenieril.

La herramienta computacional desarrollada es sencilla y funcional. Agiliza la ejecución de los cálculos de propiedades de gases y sus mezclas en condiciones reales, evitando al usuario realizar cálculos repetitivos y complicados. De igual forma, permite al investigador realizar análisis de manera rápida y sistemática de los factores y relaciones funcionales presentes en las propiedades termodinámicas de las mezclas de gases en condiciones reales.

REFERENCIAS

- [1]. Smith, J., Van Ness, H. y Abbott, M. (2007). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. (7ma ed.). Mc Graw Hill.
- [2]. Cengel, Y. y Boles, M. (2006). *Termodinámica*. (5da ed.). México, D. F.: Mc Graw Hill.
- [3]. Reynolds, W. (1979). *Thermodynamics Properties in SI. Graphs, Tables and Computational Equations for Forty Substances*. Department of Mechanical Engineering, Stanford University, California, E.E.U.U.
- [4]. Van Wylen, G., Sonntag, R. y Borgnakke, C. (2002). *Fundamentos de Termodinámica*. (2da ed.). LIMUSA
- [5]. Prausnitz, J., Lichtenthaler, R. y Gomes, E. (2000). *Termodinámica molecular de los equilibrios de fases*. (3era ed.). Prentice Hall.
- [6]. Abbott, M. *Cubic equations of state*. AIChE J., vol. 19, pp. 596-601, May 1973
- [7]. Nelson, L. y Obert, F. *Generalized Compressibility Charts*. Chemical Engineering, Vol. 61, July 1954, p.203

A COMPARATIVE STUDY OF TWO COMPACT FINITE DIFFERENCES METHODS: STANDARD VS.MIMETIC

Luis J. Córdova

lcordova14@gmail.com

Departamento de Matemática, Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela

Otilio Rojas

rojasotilio@gmail.com

Escuela de Computación, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

Beatriz Otero

botero@ac.upc.edu

Departamento de Arquitectura de Computadores, Universitat Politècnica de Catalunya - TECH,
Barcelona, Spain

José Castillo

jcastillo@mail.sdsu.edu

Computational Science Research Center, San Diego State University, California, USA

Abstract. *In this work, we implement two fourth-order compact finite differences (CFD) methods and use them to model wave propagation on a elastic string. The formulation of the first method employs the standard implicit CFD constructed on nodal grids and requires solving tridiagonal linear systems at each time iteration. A new second scheme is implemented using the staggered mimetic CFD operators that explicitly approximate derivatives at mid-cell points. The name mimetic stands for FD operators that satisfy in a discrete sense, some of conservative properties fulfilled by the continuous divergence and gradient operators. Both CFD methods are combined to high-order Runge-Kutta schemes for time integration. Numerical results show that the mimetic CFD scheme is slightly more accurate but yields similar fourth-order convergence than the nodal CFD method. In this paper, we also compare the CPU cost of both compact schemes to an explicit Leap-frog staggered solver to show the high computational efficiency of the mimetic CFD scheme.*

Keywords: Finite differences, compact schemes, mimetic operators, acoustic waves.

1. INTRODUCTION

Lele [1] proposed Taylor-based construction mechanisms of CFD on 1-D nodal and staggered grids, and then Carpenter et al. [2] studied the stability properties of various high-order CFD nodal formulations of the advection equation. These works have been followed by successful 2-D

and 3-D applications of CFD to electromagnetic and fluid dynamics [3, 4], the concepts underneath these techniques have become better known. Essentially, CFD are implicit formulas that involve discrete evaluations of the underlying solution and its derivatives, and it must be solved for the latter simultaneously on the whole discretization grid. As an example, let us consider that $[-1, 1]$ is divided into N uniform intervals of width h , and the values V_j represent the evaluation of the smooth function $v(x)$ at discrete points $x_j = -1 + jh$ where $j = 0, \dots, N$ and $Nh = 2$. The second order central FD approximation to $v'(x_j)$ satisfies

$$v'(x_j) - \frac{V_{j+1} - V_{j-1}}{2h} = \frac{h^2}{6} v'''(x_j) + \frac{h^4}{120} v^{(4)}(x_j) + \dots \quad (1)$$

A similar Taylor expansion for $v'(x)$ shows the second order difference between $v'(x_j)$ and the average value of its neighbors,

$$v'(x_j) - \frac{v'(x_{j+1}) - v'(x_{j-1}))}{2} = \frac{h^2}{2} v'''(x_j) + \frac{h^4}{24} v^{(4)}(x_j) + \dots \quad (2)$$

A simple reduction of above identities proves that the following equality holds up to order $O(h^4)$

$$\frac{1}{3} V'_{j-1} + \frac{4}{3} V'_j + \frac{1}{3} V'_{j+1} = \frac{V_{j+1} - V_{j-1}}{h} \quad (3)$$

where discrete values V'_j have replaced the evaluations of the exact $v'(x)$. The implicit FD formula in (3) can be used to jointly compute unknown values V'_j along the whole grid after considering special formulations at boundaries $j = 0$ and $j = N$. For brevity, let us assume that $V'_0 = V'_N = 0$, and define the vector $V = [V_0 \ \dots \ V_N]^T$ of approximate solutions, with a similar definition for vector V' whose components are the discrete derivative values. Moreover, we introduce the reduced derivative vector $V'_r = [V'_1 \ \dots \ V'_{N-1}]^T$. Then, for a given V , fourth-order approximations to $v'(x)$ can be computed at interior grid points by solving the linear system

$$PV'_r = QV \quad (4)$$

for matrices P and Q written after formula (3)

$$P = \begin{bmatrix} \frac{4}{3} & \frac{1}{3} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{4}{3} & \frac{1}{3} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{4}{3} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{3} & \frac{4}{3} & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{3} & \frac{4}{3} & \frac{1}{3} & 0 \end{bmatrix}, Q = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

The spatial fourth-order FD operator described by Eq. (3) is compact because involves only three grid points for numerical differentiation as opposed to the five-point stencil used on nodal grids for explicit approximation to $v'(x)$. Because of this compactness, the linear system (4) is tridiagonal and matrix P results symmetric and positive definite, which allows using Cholesky factorization to efficiently compute V'_r . Carpenter and collaborators [2] have used spatial discretizations similar to Eq. (4) on solving wave propagation problems in combination to Runge-Kutta (R-K) schemes for time integration. Third- and fourth-order R-K time-advancement algorithms are suitable for semi discretizations (treating time as continuous) of hyperbolic equations due to the high order accuracy and large stability envelope (see, Gear [5]), with a low increase of storage cost compared to standard leap-frog time integration. In this work, we implement such strategy (also known as the method of lines) to solve the second-order wave equation in a 1-D elastic string. Our method combines the traditional fourth-order R-K

integration in time with the spatial CFD formula in Eq. (4), but additionally requires of the following CFD scheme in the light of more general boundary conditions. On the lattice described above, let us consider a nonzero value V'_0 related to its neighbor V'_1 , and to the evaluations of higher-order derivatives at same location, through the Taylor expansion,

$$\frac{2}{3}V'_0 + \frac{4}{3}V'_1 = 2V'_1 - \frac{2}{3}h v''(x_1) + \frac{1}{3}h^2 v'''(x_1) - \frac{1}{9}h^3 v^{(4)}(x_1) + \dots \quad (6)$$

Next, we add the evaluation of the Taylor expansion for $v(x)$ (around x_1) at the point x_0 (weighted by $-\frac{5}{3}$) to a similar evaluation at the point x_2 (weighted by $\frac{1}{3}$), and derive the following approximation to V'_1

$$\frac{1}{h} \left[-\frac{5}{3}V_0 + \frac{4}{3}V_1 + \frac{1}{3}V_2 \right] = 2v'(x_1) - \frac{2}{3}h v''(x_1) + \frac{1}{3}h^2 v'''(x_1) - \frac{1}{18}h^3 v^{(4)}(x_1) + \dots \quad (7)$$

Eqns. (6) and (7) can be easily reduced to a third-order CFD formula that accounts for non-zero Neumann boundary conditions at x_0 , and a antisymmetric version also holds at the grid point x_N . A slightly different version of Eq. (4) is obtained if we assume this time that $V_0 = V_N = 0$,

$$SV' = TV_r \quad (8)$$

for the reduced vector of nodal approximations V_r (to $v(x_j)$), and matrices T and S given by

$$S = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{4}{3} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{4}{3} & \frac{1}{3} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \vdots & \frac{1}{3} & \frac{4}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{3} & \frac{4}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \frac{4}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}, T = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} \frac{4}{3} & \frac{1}{3} & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -\frac{1}{3} & -\frac{4}{3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

In this work, we also implement two different numerical schemes based on the Castillo-Grone mimetic discretizations [6]. To introduce this framework, let us consider a domain Ω with smooth boundary $\partial\Omega$ within a vector field \mathbf{v} and a scalar field u are differentiable. The product rule and the Gauss' divergence theorem allow us writing

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot \mathbf{v} u dV + \int_{\Omega} \nabla u \cdot \mathbf{v} dV = \int_{\partial\Omega} u(\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}}) dS \quad (10)$$

Castillo and Grone propose the following discrete analog of Eq. (10) using the weighted inner products $\langle \cdot, \cdot \rangle_Q$, and $\langle \cdot, \cdot \rangle_P$, in addition to the approximation divergence operator D ($D \approx \nabla \cdot$), the discrete gradient operator G ($G \approx \nabla$), and the boundary operator B ($B \approx \frac{\partial}{\partial \hat{\mathbf{n}}}$)

$$\langle DV, U \rangle_Q + \langle GU, V \rangle_P = \langle BV, U \rangle \quad (11)$$

The differentiation matrices D and G , joint to (quadrature rules) Q and P are built according to the evaluations V and U of fields \mathbf{v} and u , respectively, on a staggered grid that discretizes Ω . The operator B incorporates the projection of \mathbf{v} on the exterior normal vector $\hat{\mathbf{n}}$. In the 1-D case, Authors consider nodal distribution of discrete V_j in $\Omega = [-1, 1]$ given above and the staggered evaluations of $u(x)$ at cell centers $x_{j+\frac{1}{2}} = -1 + \left(j + \frac{1}{2}\right)h$ for $j = 0, \dots, N-1$, in addition to its

boundary evaluations, all collected in the vector $U = [U_0 U_{\frac{1}{2}} \dots U_{N-\frac{1}{2}} U_N]^T$. The approximations DV are computed at cell centers while the estimates GU are calculated at grid nodes. Second- and fourth-order D and G , as well as quadratures P , Q , and operator B are

proposed in the original references [6] and [7]. Here, we only denote them according to its nominal accuracy, for instance \mathbf{D}_2 and \mathbf{D}_4 represent the second- and fourth-order mimetic divergence, with similar notation for the gradient \mathbf{G} .

2. TEST PROBLEM

Motion of an elastic string subject to traction free conditions at boundaries $\mathbf{x} = \pm 1$ is modeled by the following hyperbolic system for the traction \mathbf{u} and the particle velocity \mathbf{v}

$$\begin{cases} u_t = v_x; \\ v_t = u_x; \\ u(-1, t) = u(1, t) = 0 \end{cases} \quad -1 < x < 1, t \geq 0 \quad (12)$$

Initial conditions for \mathbf{u} and \mathbf{v} are set up in such a way that exact solutions corresponds to

$$u(x, t) = \sin(2\pi x) \cos(2\pi t), \quad v(x, t) = \cos(2\pi x) \sin(2\pi t) \quad (13)$$

3. A COMPACT NODAL SCHEME

Spatial discretization of both \mathbf{u} and \mathbf{v} is performed on the nodal grid introduced above on $[-1, 1]$. Notice that boundary conditions in combination to the first equation in (12) implies that $\mathbf{v}_x = \mathbf{0}$ at $\mathbf{x} = \pm 1$, and that allows using the CFD formulations in Eqns. (4) and (8) to write this semi discretization of system (12)

$$\mathbf{P}[\mathbf{U}_r]_t = \mathbf{Q}\mathbf{V}, \quad \mathbf{S}\mathbf{V}_t = \mathbf{T}\mathbf{U}_r \quad (14)$$

Again, the sub index “r” stands for the reduced vector \mathbf{U} that omits both zero boundary values and the sub index “t” represents time differentiation. In this scheme, we use the traditional fourth-order R-K integration method to advance the solution of the $2N$ time-dependent ODE’s given by Eqn. (14). MATLAB R2011a is the implementation framework used for scheme (14) and the solution of embedded linear systems at each R-K iteration exploit the properties of matrices \mathbf{P} and \mathbf{S} . The following numerical schemes are implemented in the same platform.

4. A COMPACT MIMETIC STAGGERED SCHEME

The CFD scheme in Eqn. (14) falls into the family of implicit approaches. Abouali and Castillo in [8] present a novel approach for explicit compact differentiation in a 1-D staggered grid that avoids solving any linear system. As first step, Authors decompose the fourth-order mimetic divergence \mathbf{D}_4 as the product of an auxiliary operator \mathbf{R}_4^D and the second-order \mathbf{D}_2 , that is $\mathbf{D}_4 = \mathbf{R}_4^D \mathbf{D}_2$. Interior rows of \mathbf{R}_4^D actually have only three non-zero elements which reduces by one the interior bandwidth of \mathbf{D}_4 . Then, the nested application of $\mathbf{R}_4^D \mathbf{D}_2 \mathbf{V}$ yields a fourth-order approximation of \mathbf{v}_x at the cell centers $\mathbf{x}_{j+\frac{1}{2}}$. A similar auxiliary operator \mathbf{R}_4^G is proposed in [8]

for the gradient approximation of \mathbf{u}_x at grid nodes \mathbf{x}_j . Vectors \mathbf{V} and \mathbf{U} follow the nodal and staggered distribution introduced above, respectively. We refer the reader to [8] for explicit expressions of operators \mathbf{R}_4^D and \mathbf{R}_4^G . The following semidiscretization of Eqn. (14) corresponds to a novel compact mimetic scheme on 1-D staggered grids

$$[\mathbf{U}_r]_t = \mathbf{R}_4^D \mathbf{D}_2 \mathbf{V}, \quad \mathbf{V}_t = \mathbf{R}_4^G \mathbf{G}_2 \mathbf{U} \quad (15)$$

To be consistent with the nodal CFD scheme, we also numerically integrate Eqn. (15) by means of the fourth-order R-K method.

5. A LEAP-FROG MIMETIC STAGGERED SCHEME

As a reference basis, we also implement a standard FD solver of systems (12) using the fourth-order divergence D_4 and gradient G_4 , combined to a second-order Leap-Frog discretization of time derivatives. This process leads to the following scheme, which is staggered in both, space and time, and represents a 1-D version of methods used by Rojas et al. [9, 10] for wave propagation,

$$[U_r]^{m+1} = [U_r]^m + \Delta t D_4 V^{m+\frac{1}{2}}, \quad V^{m+\frac{3}{2}} = V^{m+\frac{1}{2}} + \Delta t G_4 U^{m+1} \quad (16)$$

Above, Δt represents the time step, and the super indexes indicate staggered time iterations.

6. NUMERICAL RESULTS

In this paper, we only present a preliminary convergence analysis of schemes described above based on their numerical solutions to the test problem given in section 2. A set of eight simulations are performed by each scheme using a common range of grid intervals $N = 10, 20, 50, 100, 200, 400, 1200, 3600$, and simulation time $T = 25$ units. Time step is adjusted according to a scheme-dependent Courant-Friedrichs-Lewy bound cfl^{MAX} , which is experimentally determined and this value fits $\Delta t = \frac{2\text{cfl}^{\text{MAX}}}{N}$. Figure 1a depicts L2 misfits of numerical solutions at time $T = 25$ for each N and a perfect fourth-order convergence (straight line) is also shown as reference. On this logarithmic scale, linear least-square regressions are used to estimate the experimental order of convergence for each scheme as we increase N , and fitted slopes are given in Table 1. Both compact schemes show a superior nearly fourth-order convergence thanks to the high-order R-K time integration, as compared to the Leap-Frog staggered scheme that achieves second-order accuracy. Only on coarse grids with $N < 100$, the latter scheme improves the precision of both compact methods. Figure 1a also reveals a minor higher accuracy of the compact mimetic scheme relative to its nodal competitor, and this favorable behavior is consistently shown at all grid sizes, as a consequence of the staggered differentiation. As a quantitative reference, L2 errors of these schemes are $8.50\text{e-}04$ and $1.12\text{e-}03$ in the case of $N = 100$, respectively, which makes the compact mimetic scheme $\sim 25\%$ more accurate. Table 1 also presents the cfl^{MAX} limit heuristically found per each scheme, and opens ground for a comparative analysis of computational cost in the light of a fixed simulation time T (for a given N , total iterations vary among our schemes). We use the MATLAB built-in *cputime* to measure the CPU time spent by each compact scheme to fully complete the simulation for each N . Figure 1b shows these elapsed times relative to the execution time reported by the Leap-frog staggered scheme. Even though, the large cfl^{MAX} bound of the compact nodal scheme, the CPU consumption of solving its embedded linear systems makes this scheme $\sim 50\%$ more costly than the Leap-frog scheme. On the other hand, the compact mimetic scheme exploits its explicit calculations and larger CFL stability limit to reduce computations times to a 50% or even to 30% of the elapsed time spent by the reference scheme on fine grids with $N \geq 200$.

7. CONCLUSIONS

In this work, we use staggered mimetic CFD in space to implement a fourth-order scheme to model wave propagation on a 1-D elastic string with free ends. Coupling to Runge-Kutta high-order time integration leads to this scheme a large Courant-Friedrichs-Lewy stability bound $\text{cfl}^{\text{MAX}} \sim 1.2$ in our preliminary numerical test. Using similar R-K time integration, we implement a second compact scheme that employs implicit nodal FD and achieves stable results up to $\text{cfl}^{\text{MAX}} \sim 1.3$. In same experiments, the former mimetic scheme results slightly more accurate given its staggering differentiation, and only requires a $\frac{1}{3}$ or even a $\frac{1}{5}$ of the execution time spent

by the latter on fine grids with nodes $N \geq 200$. The efficiency gain of the mimetic scheme relies on its explicit differentiation that avoids solving any embedded linear systems as it is indeed required by the nodal scheme (at each time iteration). On same fine grids, computation times of the CFD mimetic scheme is $\sim 50\%$ (or even less) of the execution time of an alternative fourth-order mimetic method based on explicit Leap-frog time integration, but with lower $cfl^{MAX} \sim 0.8$.

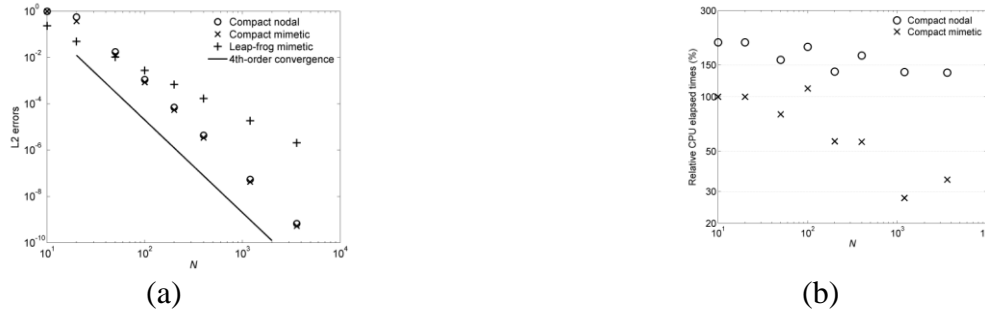


Figure 1- (a) L2 misfits of computed numerical solutions at time $T=25$ for each N . (b) Computation time of compact schemes for each N relative to the execution time of the Leap-Frog method.

Table 1. Courant-Friedrichs-Lewy bounds and convergence orders

Scheme	cfl^{MAX}	Convergence rates
Compact nodal	1.29	3.75
Compact mimetic	1.21	3.76
Leap-frog mimetic	0.85	1.96

REFERENCES

- [1]. Lele, S. (1992), *Compact finite difference schemes with spectral-like resolution*, Journal of Computational Physics 103, 16-42.
- [2]. Carpenter, M., Gottlieb, D., Abarbanel, S. (1993), *Stable and accurate boundary treatments for compact, high-order finite-difference scheme*, Applied Numerical Mathematics, 12, 55-87 (1993).
- [3]. Shang, J., (1999), *High-order compact-difference schemes for time-dependent Maxwell equations*, Journal of Computational Physics, 153, 312-333.
- [4]. Erturk, E. (2009), *Comparison of wide and compact fourth order formulations of the Navier-Stokes equations*, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 60, 992-1010.
- [5]. Gear, C. W. (1971), *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [6]. Castillo, J. E. and Grone, R. D. (2003), *A matrix analysis approach to higher order approximations for divergence and gradient satisfying a global conservation law*, SIAM J. Matrix Anal. Appl., 25, 128-142 (2003).
- [7]. Castillo, J. E., et al. (2001), *Fourth- and sixth-order conservative finite difference approximations of the divergence and gradient*, Applied Numerical Mathematics, 37, 171-187.
- [8]. Abouali, M. and Castillo, J. E. (2012), *High-order compact Castillo-Grone's Mimetic Operators*. Report of Computational Science Research Center at San Diego State University. CSRCR02 1-13.
- [9]. Rojas, O., Day, S., Castillo, J. and Dalguer, L. A. (2008), *Modelling of rupture propagation using high-order mimetic finite differences*. Geophys. J. Int. 172, 631-650.
- [10]. Rojas, O., Otero, B., Castillo, J. E. and Day, S. M. (2013), *Low dispersive modeling of Rayleigh waves on partly staggered grids*, Computational Geosciences, 1-17 (2013).

ALGORITMO PARA RESOLVER EL PROBLEMA DINÁMICO DIRECTO EN UN MANIPULADOR MÓVIL SOMETIDO A RESTRICCIONES HOLONÓMICAS

Araujo G., Pedro F.

Provenzano R., Sebastián E.

pfaraujo@ula.ve

prse@ula.ve

Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes

Facultad de Ingeniería, Edif B, Av. Alberto Carnevalli, La Hechicera, Mérida, Venezuela

Resumen. *En este trabajo son desarrolladas las ecuaciones dinámicas de movimiento para un sistema manipulador móvil, haciendo uso de las ecuaciones de Gibbs-Appell. El mecanismo impone en el modelo restricciones de tipo no holonómica, que son consideradas en el análisis, e incorporadas a las ecuaciones dinámicas. Se modela un sistema mecánico basado en un brazo manipulador tipo serial con juntas de revolución apoyado sobre un vehículo triciclo. Para la transformación de las variables cinemáticas se hace uso de, la notación de Sheth-Uicker para modelar la plataforma móvil y la Denavit-Hartenberg para modelar el brazo robótico.*

Se desarrolla un algoritmo que permite resolver el problema dinámico directo, de una manera eficiente, a partir de dos algoritmos que se realizaron en investigaciones anteriores, pero que modelaban la plataforma móvil y el brazo manipulador por separado. El algoritmo propuesto se implementa en un programa comercial, y los resultados obtenidos son comparados, para su comprobación, con un modelo desarrollado en un programa de simulación dinámica.

Palabras claves: Manipulador móvil, Gibbs-Appell, Simulación Dinámica.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica ha tenido un desarrollo significativo en las últimas décadas, gracias en gran parte a la evolución que ha alcanzado la informática, lo que se ha visto reflejado en el creciente número de investigaciones en el área. El desarrollo de la robótica se ha extendido a todas sus áreas, teniendo especial énfasis en el estudio de cadenas abiertas, realizándose muchas investigaciones acerca del modelado de brazos robóticos [1]. En cuanto al modelado del comportamiento dinámico de un brazo robótico, el problema se enfoca en encontrar algoritmos eficientes computacionalmente, más que un principio mecánico que mejor se adecue al robot en estudio.

Por otra parte, la evolución que han tenido los manipuladores robóticos, debido a la necesidad de hacer manipulaciones en entornos de trabajo peligrosos, así como de aumentar su maniobrabilidad, ha generado la construcción e investigación de manipuladores móviles, modelando robots móviles, especialmente cuando hay restricciones de tipo no holónoma [2].

Al respecto, se encuentran en la literatura estudios de manipuladores móviles, haciendo uso de los principios mecánicos, como el Newton-Euler, Lagrange-Euler, pero que presentan el inconveniente de no modelar restricciones no holónomas. Sin embargo, cualquiera que sea el principio utilizado para lograr un algoritmo eficiente, resulta en una complejidad semejante [3].

Toma importancia las ecuación de Gibbs-Appell (G-A), pues manejan de manera indistinta las restricciones holonómicas y no holonómicas. Así, al estudiar un manipulador móvil a partir de G-A se evita el problema de no incluir las restricciones no holonómicas, aunque podría suponerse que al utilizar este principio mecánico, no se afecta la complejidad computacional del modelo.

2. ECUACIONES DE GIBBS-APPELL

La función de Gibbs ha sido definida a partir de distintos criterios, y en consecuencia se presenta de diferentes maneras, en este trabajo se ha desglosado, como la suma de dos términos, uno vinculado a la aceleración lineal del cuerpo rígido y el otro a su aceleración angular:

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} m_i (\ddot{r}_{G_i})^T \ddot{r}_{G_i} + \frac{1}{2} (\dot{\vec{\omega}}_i)^T \mathbf{I}_{G_i} \dot{\vec{\omega}}_i + (\dot{\vec{\omega}}_i)^T (\vec{\omega}_i \wedge \mathbf{I}_{G_i} \vec{\omega}_i) \right] \quad (1)$$

donde $\vec{\omega}$ y $\dot{\vec{\omega}}$ son la velocidad y aceleración angular, \mathbf{I}_{G_i} es el tensor de inercia, m es la masa, \ddot{r}_G es la aceleración del centro de masas, de esta manera se tiene la función de Gibbs, expresada en coordenadas cartesianas para un sistema mecánico conformada por n cuerpos rígidos.

3. NOTACIONES DENAVIT-HARTENBERG Y SHETH-UICKER

En este trabajo, se ha decidido utilizar dos notaciones para el mecanismo en análisis; en la plataforma móvil se emplea la notación S-U, mientras que la notación D-H se utiliza en el brazo manipulador, de esta manera se pueden definir los sistemas de coordenadas locales, y sus matrices de transformación. La razón de utilizar estas dos notaciones se debe al hecho de que para robots móviles se hace conveniente el uso de la notación S-U, pues fue diseñada especialmente para denotar mecanismos con partes rodantes, frente a la ambigüedad que proporciona la notación D-H, cuando existen múltiples pares en una junta. No obstante, la notación D-H resulta muy ventajosa por la utilización mínima de parámetros que requiere, y por la facilidad para ser modeladas, se logra así, una utilización adecuada de ambas notaciones.

4. CINEMÁTICA Y DINÁMICA DEL MODELO

En primer lugar, para determinar la cinemática de la plataforma móvil, según Gracia y colegas en 2001 [4], apoyado en la notación S-U, se determina la incidencia de las velocidades y aceleraciones aplicadas en las ruedas de un robot, en el movimiento global del cuerpo del robot. De esta forma, el jacobiano de un triciclo, que es el modelo de este trabajo, se expresa así:

$$\begin{bmatrix} \bar{R} \dot{x}_R & \bar{R} \dot{y}_R & \bar{R} \dot{\theta}_R \end{bmatrix}^T = [\cos \beta \quad 0 \quad \text{sen } \beta / b]^T \cdot \bar{C} \dot{x}_C \quad (2)$$

en donde ${}^{\bar{c}}\dot{x}_C$ representa la velocidad lineal de la rueda, ${}^{\bar{R}}\dot{x}_R$ y ${}^{\bar{R}}\dot{y}_R$ la velocidad lineal en el punto central del eje trasero del vehículo, ${}^{\bar{R}}\dot{\theta}_R$ representa la velocidad angular del eje trasero, β es el ángulo de rotación de la rueda delantera y b es la distancia longitudinal entre los dos ejes. Con esta ecuación se definen las velocidades del vehículo en función de las velocidades de sus ruedas.

Las aceleraciones del robot móvil Muñoz [5] la obtiene, al derivar la expresión que relaciona las velocidades del cuerpo del robot con las velocidades de la rueda por medio del jacobiano:

$$\begin{bmatrix} {}^{\bar{R}}\ddot{x}_R & {}^{\bar{R}}\ddot{y}_R & {}^{\bar{R}}\ddot{\theta}_R \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -\dot{\beta} \sin \beta & 0 & \dot{\beta}/b * \cos \beta/b \end{bmatrix}^T \cdot {}^{\bar{c}}\dot{x}_C + \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta/b \end{bmatrix}^T \cdot {}^{\bar{c}}\dot{x}_C \quad (3)$$

Finalmente, a partir de Eq. 2 y Eq. 3 se determinan la cinemática de la base móvil del robot.

En cuanto a la cinemática del brazo robótico, la misma se define apoyado en la notación D-H. Así, en las siguientes líneas se describen las expresiones por medio de las cuales se determinan de manera recursiva las variables cinemáticas del mecanismo para pares de revolución [1]:

$${}^i\vec{\omega}_i = {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\vec{\omega}_i + {}^i\dot{z}_i \dot{q}_i \quad (4)$$

$${}^i\vec{\omega}_i = {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\vec{\omega}_{i-1} + {}^i\dot{z}_i \dot{q}_i + [{}^iR_{i-1} {}^{i-1}\vec{\omega}_i \wedge ({}^i\dot{z}_i \dot{q}_i)] \quad (5)$$

$${}^i\ddot{r}_{O_i} = {}^iR_{i-1} [{}^{i-1}\ddot{r}_{O_{i-1}} + {}^{i-1}\vec{\omega}_{i-1} \wedge ({}^{i-1}\vec{\omega}_{i-1} \wedge {}^{i-1}\vec{r}_{O_{i-1},O_i}) + {}^{i-1}\vec{\omega}_{i-1} \wedge {}^{i-1}\dot{r}_{O_{i-1},O_i}] \quad (6)$$

$${}^i\ddot{r}_{G_i} = {}^i\ddot{r}_{O_i} + {}^i\vec{\omega}_i \wedge ({}^i\vec{\omega}_i \wedge {}^i\vec{r}_{O_i,G_i}) + {}^i\dot{\omega}_i \wedge {}^i\vec{r}_{O_i,G_i} \quad (7)$$

en donde ${}^i\vec{\omega}_i$ y ${}^i\dot{\omega}_i$ representan la velocidad y aceleración angular de la barra i respecto del sistema de coordenadas i , ${}^iR_{i-1}$ es la matriz de rotación, \dot{q}_i y \ddot{q}_i es la velocidad y aceleración angular absoluta de la barra i , ${}^i\ddot{r}_{O_i}$, ${}^{i-1}\dot{r}_{O_{i-1},O_i}$ y ${}^i\ddot{r}_{G_i}$ son vectores que se definen según D-H. Estas ecuaciones permiten relacionar las variables cinemáticas del brazo manipulador del sistema mecánico, de tal manera que las ecuaciones (2, 3, 4, 5, 6 y 7), determinan el análisis cinemático completo del manipulador móvil.

Para la dinámica de la plataforma móvil, Martinenko, 2004 [6], desarrolló las ecuaciones que modelan la dinámica de un robot móvil, que se comporta como un triciclo.

Para la aplicación de la ecuación de G-A en un sistema mecánico cualquiera, se describe un breve procedimiento [7], y que es aplicado por [6]. En su investigación, [6] desarrolla la ecuación de G-A para la plataforma móvil descrita, tomando en consideración dos cuasi velocidades, la velocidad lineal del punto medio del eje trasero del vehículo (V), y la velocidad angular relativa del eje delantero respecto a la plataforma del vehículo ($\dot{\beta}$), obteniendo la función de Gibbs. Luego, la derivada parcial de la función de Gibbs respecto de las cuasi aceleraciones, da como resultado la fuerza generalizada que se relaciona con dicha aceleración [7], es decir, $\partial S/\partial \dot{V} = Q_V$; $\partial S/\partial \dot{\beta} = Q_{\dot{\beta}}$; se obtiene un sistema de dos ecuaciones diferenciales, que deben ser expresadas, tal que permitan calcular las aceleraciones lineal y angular de la plataforma móvil.

$$\dot{V} = \frac{b^2 F}{\mu_0 b^2 - I_2 t g^2 \beta} - \frac{b t g \beta M}{\mu_0 b^2 - I_2 t g^2 \beta} + \frac{t g \beta (I_2 - m_0 b^2) V \dot{\beta}}{\cos^2 \beta (\mu_0 b^2 - I_2 t g^2 \beta)} \quad (8)$$

$$\dot{\beta} = \frac{b t g \beta F}{I_2 t g^2 \beta - \mu_0 b^2} - \frac{b^2 \mu_0 M}{I_2^2 t g^2 \beta - \mu_0 I_2 b^2} + \frac{b m F}{\cos^2 \beta (I_2 t g^2 \beta - \mu_0 b)} \quad (9)$$

en donde b es la distancia entre los ejes delanteros y traseros del vehículo, F es la fuerza a aplicar en el punto medio del eje trasero del vehículo, M es el momento a aplicar en el eje delantero para

rotar el vehículo; $m = 3m_E + 3m_F + m_C + m_B$; $I_2 = I_B + m_F(r_F^2/2 + 3l_F^2)$ $m_0 = b^{-2}(I_2 + I_C + m_E r_E^2/2 + m_C a^2 + m_B b^2 + 3m_F b^2 + 3m_E l_E^2)$; $\mu_0 = m + m_0 t g^2 \beta$; m_E es la masa de la rueda trasera, m_F es la masa de la rueda delantera, m_C es la masa de la plataforma, m_B es la masa del eje delantero. I_B es el momento de inercia del eje delantero alrededor de su punto de rotación respecto a la plataforma, I_C es el momento de inercia de la plataforma del vehículo sobre su centro de gravedad, $2l_E$ es la longitud del eje trasero, $2l_F$ la longitud del eje delantero, r_E radio de las ruedas traseras y r_F de las delanteras. \dot{V} es la aceleración lineal del punto central del eje trasero, $\ddot{\beta}$ es la aceleración angular de las ruedas delanteras con respecto al vehículo.

Con la Eq. 8 y la Eq.9 se determinan las aceleraciones lineal y angular de la plataforma móvil. Luego, a través de un proceso de integración numérica, se determinan las velocidades y posiciones de la plataforma móvil.

Finalmente, para determinar la dinámica del brazo manipulador se toma en cuenta que la ecuación de G-A, se puede presentar de diferentes maneras, tal y como lo han expresado distintos autores. Una de estas formas parte de la siguiente expresión:

$$S = \frac{1}{2} \ddot{\vec{q}}^T \mathbf{D} \ddot{\vec{q}} + \vec{\varphi}^T \ddot{\vec{q}} + f(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) \quad (10)$$

Esta expresión muestra la función de Gibbs en términos de las coordenadas generalizadas y de una manera bastante compacta; \mathbf{D} representa la matriz de inercia del sistema en estudio, $\vec{\varphi}$ es un vector que agrupa fuerzas centrífugas, gravitatorias y de coriolis (vector bias), luego aparece un término que no es relevante en el análisis puesto que no es función de la aceleración.

Esta manera de expresar la función de Gibbs, resulta ser bastante apropiada para resolver el PDD, pues tal y como es planteada por Provenzano, 2001 [1], luego de derivarla parcialmente respecto a las aceleraciones de nudos y de reordenarla, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\ddot{\vec{q}} = \mathbf{D}^{-1}(\vec{\tau} - \vec{\varphi}) \quad (11)$$

En la Eq. 11 se puede observar que para determinar el vector de aceleraciones es necesario conocer varios términos, la matriz de inercia, el vector bias, el vector de fuerzas o pares generalizados que ejercen los actuadores ($\vec{\tau}$), para luego resolver la ecuación. Seguido de un proceso de integración, se consiguen las velocidades y posiciones de los elementos del sistema.

Por lo tanto, todo el proceso comienza con plantear un método para hallar la matriz de inercia del sistema, luego el vector bias, y seguidamente se ensambla la ecuación con el vector de fuerzas aplicadas en los nodos, para determinar así las aceleraciones generalizadas.

El primer paso para determinar la dinámica de la plataforma móvil, es definir la matriz de inercia. Haciendo doble derivación parcial, respecto a las aceleraciones de nudo, de la Eq. (10), encontramos que la matriz de inercia \mathbf{D} es igual a la segunda derivada de la función de Gibbs en función de las aceleraciones de nudos, conocida como la matriz hesiana de la función de Gibbs:

$$\mathbf{D}_{jk} = \sum_{i=j}^n \left[m_i \left(\frac{\partial^i \vec{r}_{G_i}}{\partial \dot{q}_k} \right)^T \frac{\partial^i \vec{r}_{G_i}}{\partial \dot{q}_j} \right] + \sum_{i=j}^n \left[\left(\frac{\partial^i \vec{\omega}_i}{\partial \dot{q}_k} \right)^T \mathbf{I}_{G_i} \frac{\partial^i \vec{\omega}_i}{\partial \dot{q}_j} \right] \quad (12)$$

La primera sumatoria se relaciona con las aceleraciones lineales y la segunda a las angulares.

En lo que respecta a los términos de la derivada parcial de las aceleraciones angulares respecto de las aceleraciones de los nudos ($\partial^i \vec{\omega}_i / \partial \dot{q}_k$), estos se desarrollan a partir de la derivación de la Eq.(6), y se puede resolver por un método recursivo según se presenta en [1].

Por su parte, los términos que se vinculan con la aceleración lineal, en primer lugar, se determina el término $\partial^2 \vec{r}_{0_i} / \partial \ddot{q}_j$, necesario para definir los términos $\partial^i \vec{r}_{G_i} / \partial \ddot{q}_k$, y se desarrolla al diferenciar la Eq. (7). Se puede determinar esta expresión por un procedimiento recursivo [1].

Ahora se puede determinar la derivada parcial del vector de la aceleración del centro de gravedad, al derivar la Eq. (8). Otra vez, según [1], se resuelve de manera recursiva.

Las ecuaciones, con las que se determinan las derivadas parciales de las aceleraciones angulares y lineales, son sustituidas en la Eq.(12) y de esta manera se obtiene la matriz de inercia.

El siguiente paso, es determinar el vector bias para el brazo robótico; para esto se utiliza un método propuesto por Walker y Orin, 1982 [8], en donde afirman que el vector bias se puede determinar de una manera eficiente, al adecuar correctamente los algoritmos que se utilizan para determinar el PDI, pero anulando, los términos que se relacionan con las aceleraciones de nudos.

En consecuencia, para determinar el vector bias, se utiliza un algoritmo para determinar el PDI presentado también en [1], que permite calcular el vector de fuerzas generalizadas en el brazo robótico. Luego, los elementos cinemáticos que intervienen en esta ecuación, es decir, las velocidades y aceleraciones angulares y lineales, se calculan a partir de las Eq. (4), (5), (6) y (7).

Ahora la expresión dinámica definitiva para determinar el vector bias del brazo manipulador robótico, siguiendo el procedimiento descrito, resulta en lo siguiente:

$$\tau_j = \sum_{i=j}^n \left\{ m_i (-\vec{g})^T {}^i R_{i-1} \left[\left(\frac{\partial^i \vec{r}_{0_{i-1}}}{\partial \ddot{q}_j} + {}^{i-1} R_j {}^j \vec{z}_j \wedge {}^{i-1} \vec{r}_{0_{i-1}, 0_i} \right) + {}^i R_j {}^j \vec{z}_j \wedge {}^i \vec{r}_{0_i, G_i} \right] + ({}^i \vec{\omega}_i \wedge {}^i I_{G_i} {}^i \vec{\omega}_i) \right\} \quad (13)$$

Una vez determinado el vector bias y la matriz de inercia del sistema mecánico, se puede determinar las aceleraciones de los nudos a partir de la Eq. (12), luego de un proceso de integración se determinan las velocidades y posiciones de los nudos. En conclusión, la determinación integral del mecanismo se logra por intermedio de las Eqs. 9, 10, 12, 13 y 14.

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN.

En esta parte, se presenta un ejemplo de aplicación, para un robot manipulador en estudio. Se determinan las aceleraciones generadas en el manipulador, al aplicar un estado de carga dado.

En lo que respecta a las características que se utilizan para el robot, las mismas se basan en el hipotético caso de colocar un robot PUMA 600, de la compañía Unimation y Co., sobre un vehículo Seekur desarrollado por Adept Mobile Robots, pero con ciertas modificaciones.

Con el algoritmo propuesto basado en las ecuaciones descritas, fue desarrollado y comparado, para su comprobación, con un modelo realizado en un programa comercial de simulación. Se considera, como condiciones iniciales, que el vehículo se encuentra en reposo y sus velocidades y aceleraciones en todos sus puntos son nulas. Al vehículo se le aplica una fuerza, que le genera un desplazamiento longitudinal, y un par que lo rota. Finalmente, sobre cada una de las articulaciones del brazo se aplican pares, que son representados según el vector t y que expresan los pares aplicados desde el brazo 1 hasta el final.

A continuación, se muestran gráficas en donde se indican las aceleraciones obtenidas en el mecanismo; se pueden comparar las curvas que muestran el resultado, según el algoritmo propuesto en este trabajo (PDD-MM), con las realizadas con el programa comercial (PDD-CO); en estas gráficas se observan buenas aproximaciones entre ambos modelos, sin embargo, cuando el valor del momento aplicado en el eje delantero del vehículo se incrementa, la diferencia entre los resultados obtenidos de ambos modelos se acentúa. Es sabido que el modelado de partes rodantes conduce a un mayor error, debido en parte a que el deslizamiento que se produce en la rueda con respecto al suelo, es mucho más complejo que producido por medio de un par inferior.

Además, el modelo desarrollado a partir del algoritmo propuesto, se comporta más estable

que el realizado por el programa comercial. Los resultados obtenidos por el programa comercial, presentan alguna perturbación, que no se observa en los obtenidos del algoritmo propuesto.

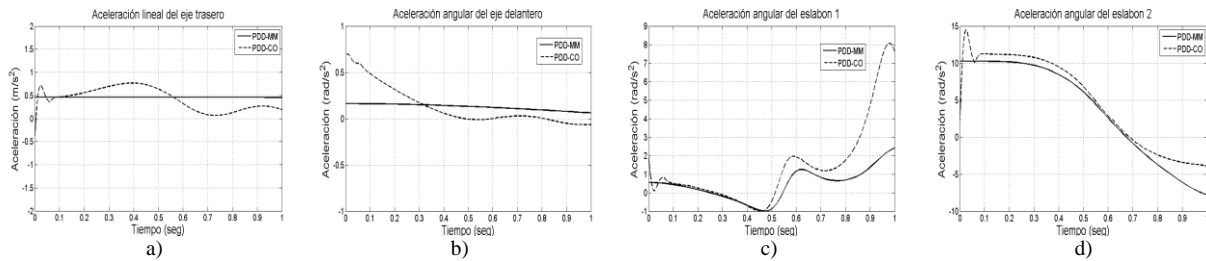


Fig 1. Aceleración a) lineal eje trasero b) angular eje delante c) angular eslabón 1 d) angular eslabón 2

7. Conclusiones.

En este trabajo se utilizaron las ecuaciones de G-A para modelar un robot manipulador móvil, que consta de un brazo manipulador robótico de seis grados de libertad conformado por pares de revolución sobre una plataforma móvil definida con un vehículo tipo triciclo. Se desarrolló un algoritmo que ha permitido resolver el PDD del manipulador móvil. La configuración del modelo, generó restricciones de tipo no holónoma, que fueron consideradas en el análisis, e incorporadas a las ecuaciones dinámicas.

Los resultados obtenidos en la simulación realizada por el algoritmo desarrollado y los obtenidos del programa comercial, mostraron gran semejanza. Pero, se observó que a medida que aumentaba el par ejercido en el eje delantero, las diferencias aumentaron, probablemente por la dificultad en modelar el deslizamiento ejercido en las ruedas, cuando estas comienzan a rotar.

REFERENCIAS

- [1]. Provenzano, Sebastián. “Aplicación de las ecuaciones de Gibbs-Appell a la dinámica de robots”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2001.
- [2]. Tanner, H; Kyriakopoulos, K; Krikelis, N.J. “Modeling of multiple mobile manipulator handling a common deformable object”. NTUA. Atenas, Grecia. 2000
- [3]. Mata, V.; Provenzano, S.; Valero, F.; Cuadrado, J.L. “Serial-robot dynamics algorithms for moderately large numbers of joints”. Mechanism and Machine Theory. Vol 37. 2002.
- [4]. Gracia. Tornero. “Application of kinematic modeling methods to wheeled mobile robots”. 5th WSES International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers. 2001.
- [5]. Muñoz M., V.; Gil-Gomez, G.; Garcia C. “Modelado cinemático y dinámico de un robot móvil omni-direccional”. Jornadas de Automática, Universidad de León. España. 2003.
- [6]. Martinenko, Yu G. “The theory of the generalized Magnus effect for non-holonomic mechanical systems”. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Vol 68. N° 6. 2004
- [7]. Ginsberg, J. “Advanced engineering dynamics”. 2da edición. Cambridge University. 1998.
- [8]. Walker, M.; Orin, D. E. “Efficient dynamics computer simulation of robotic mechanisms”. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol 104. 1982.

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DURACIÓN DEL ENTRENAMIENTO DE UN MODELO OCULTO DE MARKOV A TRAVÉS DE LA REGRESIÓN DE COX

Jabbour, Georges

jabbour@ula.ve

Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes
Av. Alberto Carnevalli, Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez. Mérida - Venezuela

Maldonado, José Luciano

maldonaj@ula.ve

Instituto de Estadística Aplicada y Computación, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales,
Universidad de Los Andes, Av. Las Américas, Núcleo La Liria. Mérida - Venezuela

Resumen. *En el presente artículo se analiza, a través del modelo de regresión de Cox, la influencia que tienen ciertos factores en el costo computacional asociado al entrenamiento de un Modelo Oculto de Markov (MOM), cuando este se realiza a través del algoritmo de Baum-Welch. Los factores considerados corresponden a la estructura del MOM (tipo de modelo: Ergódico o Bakis; número de estados, número de gaussianas y tipo de matriz de covarianzas asociada a las funciones gaussianas: “completa” o “esférica”), la forma de generar las probabilidades iniciales (aleatoriamente o uniformemente) y ciertos parámetros relacionados con las señales de entrenamiento y su pre-procesamiento (la longitud de la señal y los parámetros que definen su escalamiento: coeficientes de amplificación, α , y traslación, θ). Además, por conveniencia, se definió una medida llamada Tiempo Promedio por Observación (TPO) para cuantificar el costo computacional del entrenamiento de MOM con señales de diferente longitud. Las pruebas realizadas consistieron en 76800 entrenamientos de MOM para señales provenientes del habla. Los resultados de la Regresión de Cox indicaron que los parámetros más influyentes en el TPO, según su orden de importancia, son: el tipo de covarianza, el número de Gaussianas, el tipo de modelo, el coeficiente de amplificación, el número de estados y la longitud de la señal de entrenamiento. Además, la media global del TPO fue de 5.64 ms; mientras que la mejor combinación, que consistió en 2 gaussianas, 2 estados, probabilidades iniciales aleatorias, covarianza completa, modelo Bakis, $\alpha=45$ y $\theta=9$; presentó un TPO promedio de 3.36 ms; en contraste con la combinación menos eficiente, que requirió un TPO promedio de 8.32 ms.*

Palabras claves: Modelos Ocultos de Markov, Algoritmo de Baum-Welch, Regresión de Cox, Reconocimiento Automático del Habla, Procesamiento de Señales.

1. INTRODUCCIÓN

La creación de los Modelos Ocultos de Markov (MOM) ha representado un importante avance en el área del Reconocimiento Automático del Habla (RAH). En el RAH, en las dos últimas décadas, los adelantos más significativos han sido aportados por los MOM, de hecho, hasta el momento sigue siendo la herramienta más utilizada, puesto que en este campo aún no se ha encontrado otro método que supere sus resultados [1].

El algoritmo más popular para entrenar MOM es el de Baum-Welch, el cual se caracteriza por requerir de una considerable cantidad de cómputos. No obstante, la eficiencia de este algoritmo depende de una serie de factores asociados a la arquitectura del MOM, los parámetros del mismo algoritmo y la longitud de las señales que se utilicen en el proceso [1]. En este sentido, el presente artículo pretende generar resultados que permitan a los investigadores y usuarios de este tipo de métodos conocer los factores que influyen en la eficiencia del referido algoritmo, y así, facilitar su uso. Para ello, se recurre a la Regresión de Cox (Análisis de Supervivencia).

2. MODELOS OCULTOS DE MARKOV

Un Modelo Oculto de Markov (MOM) es un modelo probabilístico cuyo objetivo es representar el comportamiento de un fenómeno aleatorio que consta de dos procesos estocásticos, uno oculto y otro observable (que depende del oculto), como se ilustra en la figura 1 [2].

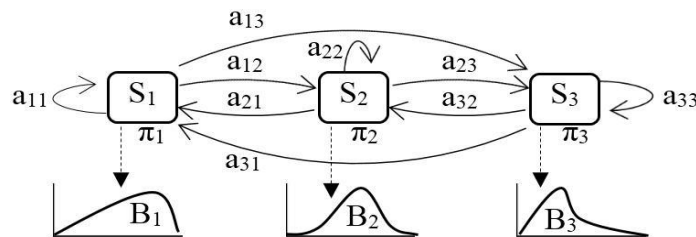


Fig. 1. Estructura de un MOM

La figura 1 está basada en el caso particular de un modelo cuyo proceso oculto tiene 3 estados. La red formada por los nodos (estados) \$S_1\$, \$S_2\$ y \$S_3\$ representa precisamente al proceso estocástico oculto, en donde \$\pi_i\$ (\$i=1,2,3\$) es la probabilidad de que el estado inicial sea \$S_i\$; y \$a_{ij}\$ (\$i,j=1,2,3\$) es la probabilidad de transición del estado \$i\$ al estado \$j\$ en un paso. Cuando el proceso oculto se encuentra en el \$j\$-ésimo estado, entonces el proceso observable se comporta de acuerdo a la función de densidad de probabilidad \$B_j\$, que tiene la siguiente forma [2]:

$$B_j(O) = \sum_{g=1}^G C_{jg} \Phi[O, \mu_{jg}, U_{jg}] \quad 1 \leq j \leq Q \quad (1)$$

En (1), \$Q\$ es el número de estados, \$O\$ es la secuencia de observaciones (señal) que se desea modelar, \$C_{jm}\$ es el coeficiente de combinación de la \$m\$-ésima fdp cuando el sistema se encuentra en el \$j\$-ésimo estado y \$\Phi\$ generalmente es una función Gaussiana multivariante (siendo \$G\$ el número de funciones Gaussianas) que posee un vector de medias \$\mu_{jm}\$ y matriz de covarianzas \$U_{jm}\$. Esta última matriz puede tener diferentes formas: diagonal, completa o esférica; a lo cual en lo sucesivo se le llamará Tipo de Covarianza (TC).

Otra característica importante que forma parte de la estructura de un MOM es la Clase del

Proceso Oculto (CPO), determinada por la forma como se conectan los estados. La figura 1 corresponde a un modelo Ergódico, es decir, uno en donde todas las transiciones de estados son posibles. No obstante, existe otra topología que es bastante popular, especialmente en las aplicaciones relacionadas con el Reconocimiento Automático del Habla (RAH), que recibe el nombre de Bakis o modelo de izquierda a derecha, que posee la siguiente forma [2]:

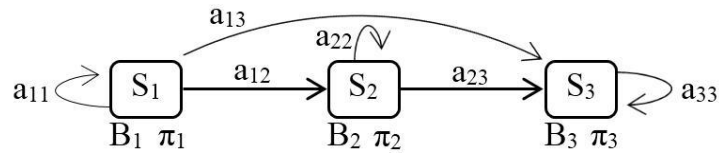


Fig. 2. Modelo Bakis

Una vez definida la arquitectura del MOM, se procede con su entrenamiento. El método más popular para entrenar MOM es el de Baum-Welch, el cual es un método iterativo que comienza con ciertos valores iniciales de a_{ij} ($i, j=1, \dots, Q$) y π_i ($i=1, \dots, Q$) y los va gradualmente modificando para incrementar la verosimilitud del modelo [3]. Este proceso de reajuste finaliza cuando ocurre alguno de los siguientes eventos: la convergencia del algoritmo o la realización de la cantidad máxima de iteraciones (eventos controlados por medio de los parámetros ϵ e *Iteraciones*, respectivamente). Los valores iniciales antes mencionados generalmente son obtenidos a partir de números aleatorios, aunque en esta investigación se ha considerado adicionalmente un esquema alternativo que consiste en hacer $a_{ij}=1/Q$ (distribución uniforme). La forma de obtener las probabilidades iniciales es denotada por A_0 , que toma el valor cero cuando se utiliza la opción de los números aleatorios y toma el valor 1 para el segundo mecanismo planteado.

Adicionalmente, se ha incluido en este estudio la posibilidad de escalar los datos antes de utilizarlos para entrenar el MOM, según la siguiente expresión:

$$O' = \alpha \left(\frac{O - \min}{\max - \min} \right) + \theta \quad (2)$$

En (2), *min* y *max* corresponden a los valores mínimo y máximo de O ; mientras que α y θ son los coeficientes de amplificación y traslación de la señal, respectivamente. Este tipo de escalamiento es sumamente útil cuando la amplitud de la señal original es pequeña, lo cual puede generar fallas que impiden la culminación exitosa del proceso de entrenamiento [4].

Por otro lado, para medir la eficiencia de cada entrenamiento, se definió un indicador al que se llamó **Tiempo Promedio por Observación** (TPO), que es igual al tiempo promedio (en ms) que duró el entrenamiento por cada observación. Por ejemplo, si el entrenamiento de un MOM en particular duró 90 ms para una señal formada por 30 observaciones, entonces el TPO es igual a 3 ms. El motivo de este indicador proviene del hecho de que las señales consideradas son de diferente tamaño y no es justo comparar la duración total de sus entrenamientos directamente.

3. ANÁLISIS DE SUPERVIVENCIA A TRAVÉS DE LA REGRESIÓN DE COX

En el análisis de supervivencia, uno de los principales objetivos consiste en determinar la influencia que poseen ciertos factores sobre el tiempo que transcurre desde que se inicia algún proceso en particular hasta que ocurre cierto evento de interés (llamado *Muerte*) [5].

Entre los conceptos asociados al análisis de supervivencia, son de especial interés la *función*

de supervivencia y la función de riesgo [6]. En detalle, la función de supervivencia, $S(t)$, representa la probabilidad de que cierto individuo esté vivo en el instante t ; mientras que la función de riesgo, $H(t)$, es una medida inversamente proporcional a la función de supervivencia, es decir, a mayor supervivencia menor riesgo, y viceversa [5][6].

Uno de los métodos que forman parte del análisis de supervivencia es el de la regresión de Cox, el cual se basa en un modelo de regresión que permite determinar la influencia que poseen ciertos factores sobre la función de riesgo, y por ende, sobre el tiempo esperado que transcurre hasta la ocurrencia del evento muerte (en un contexto dado). En este modelo, la variable dependiente es el riesgo en el que se encuentra un individuo en el instante t , y cuyas variables independientes son factores que se cree que pueden influir sobre tal riesgo [5]; específicamente:

$$H(t) = H_0(t)e^{\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p} \quad (3)$$

en donde $H_0(t)$ es un valor constante, irrelevante para el presente estudio. En este caso, el interés se centra en las variables independientes X_i ($i=1, \dots, p$), cuyo efecto se mide directamente a través de sus coeficientes β_i ($i=1, \dots, p$). Si $\beta_i > 0$, entonces la presencia del i -ésimo factor aumenta el riesgo, mientras que, si $\beta_i < 0$, entonces el i -ésimo factor reduce el riesgo [5].

4. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Los datos utilizados consistieron en señales de voz provenientes del habla venezolana, obtenidas por telefonía fija. Se obtuvo una muestra formada por 4 señales con la siguiente descripción: (Sexo del Hablante, Procedencia, Número de Observaciones, Contenido Fonético) = {(F, Mérida, 990, “do”); (M, Zulia, 806, “ko”); (F, Aragua, 694, “si”); (M, Barinas, 962, “de”)}; para un total de 3452 observaciones y 8 fonos. Cada señal fue dividida en segmentos de longitud L y cada uno de estos fue tratado como una señal independiente.

Se entrenó un MOM para cada señal resultante de la segmentación, para cada una de las posibles combinaciones de los siguientes parámetros: $L=\{30, 40\}$; $G=\{2, 3\}$; $Q=\{2, 3\}$; $A_0=\{0, 1\} \equiv \{a_{ij}$ se obtiene a partir de un número aleatorio, $a_{ij}=1/Q\}$; $TC=\{0, 1\} \equiv \{\text{Completa, Esférica}\}$; $CPO=\{0, 1\} \equiv \{\text{Ergódico, Bakis}\}$; $\alpha=\{15, 30, 45\}$ y $\theta=\{0, 0.2*\alpha\}$. Además, para cada prueba se hizo una réplica con el fin de incrementar la confiabilidad de los resultados, requiriéndose en total 76800 entrenamientos de MOM. Además, en cada prueba, se registró el TPO. Los parámetros *Iteraciones* y ϵ fueron fijados en 100 y 10^{-4} [7], respectivamente.

Con los resultados obtenidos, se ajustó un modelo de Cox tomando los factores L , G , Q , A_0 , TC , CPO , α y θ como variables independientes y a la variable TPO como el tiempo de supervivencia. Se asumió la ocurrencia del *evento muerte* cuando el algoritmo se detuvo debido a la convergencia; de manera que, mientras más rápido se completa el entrenamiento, más rápido ocurre la muerte (menor supervivencia). Así, el modelo de regresión evaluado fue el siguiente:

$$H(t) = H_0(t)e^{\beta_1 L + \beta_2 G + \beta_3 Q + \beta_4 A_0 + \beta_5 TC + \beta_6 CPO + \beta_7 \alpha + \beta_8 \theta} \quad (4)$$

5. RESULTADOS

En las Tablas 1 y 2 se resumen los resultados correspondientes al modelo de regresión de Cox definido en la Ec. (4).

Tabla 1. Prueba del Omnibus (bondad de ajuste)*

-2 Log (Verosimilitud)	Chi-cuadrado	GL	Sig.
1545174.392	5546.428	8	0.000

Tabla 2. Resultados del modelo de Cox[†]

Var	L	G	Q	A ₀	TC	CPO	α	θ
β	0.008	-0.258	-0.108	-0.005	-0.390	-0.158	0.009	-0.001
Wald	107.977	1248.940	218.284	0.389	2822.026	464.517	775.185	1.280
Sig.	0.000	0.000	0.000	0.533	0.000	0.000	0.000	0.258

La Tabla 1 indica que, según la prueba del Omnibus [5], no se rechaza la hipótesis de que el modelo se ajusta bien a los datos, lo cual indica que el modelo obtenido es válido.

En la Tabla 2 se asume que las variables L, G, Q, α y θ son cuantitativas, mientras que A₀, TC y CPO son variables dicotómicas. Según esta tabla, se puede concluir con un 99.99% de confianza que a mayor valor de G y Q (mientras más gaussianas y mientras más estados tenga el MOM), menor riesgo, o equivalentemente, mayor supervivencia experimenta el proceso de entrenamiento, y por lo tanto, mayor será el tiempo necesario hasta que se alcance la condición de convergencia (evento muerte). Al aumentar el número de Gaussianas de 2 a 3, se espera que el entrenamiento incremente el TPO en 17.73%, mientras que al aumentar el número de estados de 2 a 3, se espera que el incremento del TPO sea del 5.87%. Por el contrario, mientras más larga sea la señal, menor será el TPO esperado; es decir, toma menos tiempo entrenar un MOM con una señal de longitud nL que entrenar n modelos con señales de longitud L. Las señales de longitud 40 requirieron un TPO 4.52% menor que el de las señales de longitud 30.

En cuanto al escalamiento de la señal, la amplificación tuvo un efecto acelerador en el entrenamiento (a mayor amplificación, menor TPO esperado); mientras que la traslación no influyó sobre los resultados. Así, al ir de $\alpha=15$ a $\alpha=30$ se redujo el TPO en 7.89%; y al ir de $\alpha=30$ a $\alpha=45$ se redujo el TPO en 7.28%.

La forma de generar las probabilidades de transición iniciales, A₀, no resultó ser significativa, de modo que es indiferente comenzar el proceso de entrenamiento a partir de probabilidades aleatorias o probabilidades uniformes.

Por otro lado, la covarianza esférica (TC=1) disminuye el riesgo (aumenta la supervivencia) de convergencia con respecto a la covarianza completa (TC=0), y por lo tanto, el entrenamiento toma menos tiempo cuando se utiliza la covarianza completa. Con la covarianza esférica los entrenamientos fueron un 33.08% más lentos que con la covarianza completa. Del mismo modo, el entrenamiento de los modelos ergódicos tomó en promedio un 13.16% más tiempo que el de los modelos Bakis.

En los 76800 entrenamientos realizados, la media del TPO fue de 5.64 ms. No obstante, dentro de los parámetros considerados, la mejor combinación consistió en 2 gaussianas, 2 estados, probabilidades iniciales aleatorias, covarianza completa, modelo Bakis, $\alpha=45$ y $\theta=9$. Con

* Los valores de la Tabla 1 representan lo siguiente: **-2*Log(Verosimilitud)**: es un estadístico de prueba de la bondad de ajuste del modelo, cuya hipótesis nula establece que todos los coeficientes del modelo son nulos, es decir, que el modelo no se ajusta bien a los datos. Este estadístico se distribuye chi-cuadrado con **GL** grados de libertad. **Sig.**: nivel de significancia del estadístico antes mencionado. Si $\text{Sig} < p$, $0 \leq p \leq 1$, entonces se rechaza la hipótesis nula, y en tal caso, se concluye que el modelo se ajusta bien a los datos con un nivel de confianza del $100*(1-p)\%$.

† Los valores de la Tabla 2 representan lo siguiente: **Var**: nombre de la variable; **β** : valor de su coeficiente en el modelo de Cox (β_i); **Wald**: valor del estadístico de Wald, que es un estadístico de prueba de la significancia de una variable, cuya hipótesis nula establece que tal variable no es significativa (su coeficiente es nulo). **Sig.**: nivel de significancia del estadístico de Wald. Si $\text{Sig} < p$, $0 \leq p \leq 1$, entonces la respectiva variable es significativa al $100*(1-p)\%$.

estos parámetros, el TPO promedio fue de 3.36 ms. Por el contrario, la peor combinación, con un TPO promedio de 8.32 ms, estuvo formada por 3 gaussianas, 3 estados, probabilidades iniciales aleatorias, covarianza esférica, modelo ergódico, $\alpha=15$ y $\theta=3$; demostrándose así, que el costo computacional de entrenar un MOM puede aumentar drásticamente si no se seleccionan correctamente los parámetros involucrados en tal proceso.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de la Regresión de Cox indicaron que los parámetros que más afectan la eficiencia del algoritmo de Baum-Welch son (por orden de importancia): el tipo de covarianza, el número de Gaussianas, el tipo de modelo, el coeficiente de amplificación, el número de estados y la longitud de la señal de entrenamiento. La forma de seleccionar las probabilidades iniciales del MOM y el coeficiente de traslación (del escalamiento) tuvieron un efecto despreciable.

La mejor combinación de parámetros consistió en 2 gaussianas, 2 estados, probabilidades iniciales aleatorias, covarianza completa, modelo Bakis, $\alpha=45$ y $\theta=9$; con los cuales se logró un TPO promedio de 3.36 ms. Con estos parámetros, la reducción del TPO fue del 40.26% con respecto a la media de todas las posibles combinaciones de parámetros (5.64 ms); demostrándose así la importancia de tomar adecuadamente las decisiones que se presentan durante la construcción de un MOM, cuando la reducción del costo computacional está entre los objetivos.

En cuanto a la señal, se descubrió que mientras larga sea su longitud, menos tiempo de entrenamiento será necesario por cada observación, es decir, toma menos tiempo entrenar un MOM con una señal de longitud nL que entrenar n modelos con señales de longitud L . Aunque generalmente la longitud de la señal no es una decisión que se toma al construir un MOM, este resultado puede ser útil en algunas aplicaciones (como el RAH, en donde ocasionalmente se suelen segmentar las señales).

REFERENCIAS

- [1]. Juang, B., y Rabiner, L., Automatic Speech Recognition - A Brief History of the Technology. Elsevier Encyclopedia of Language and Linguistics, 2005.
- [2]. Rabiner, L., A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition, Proceedings of the IEEE, vol. 77, n. 2, pp. 257–286, 1989.
- [3]. Cappé, O., Moulines, E., y Rydén, T., Inference in Hidden Markov Models, Springer, 2005.
- [4]. Murphy, K., Hidden Markov Model (HMM) Toolbox for Matlab, 2005. Se encuentra en: <http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/HMM/hmm.html>. Fecha de consulta: 02 Marzo 2013.
- [5]. Harrell, F., Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis, 1era Edición, pp. 465 – 507, Springer, 2001.
- [6]. Berry, M., y Linoff, G., Data Mining Techniques, 2da Edición, pp. 383-420, Wiley, 2004.
- [7]. Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., y Flannery, B., Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 2007.

HEURÍSTICA COOPERATIVA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE LA TARDANZA PONDERADA TOTAL EN UNA MÁQUINA

Jhon Edgar Amaya

jedgar@unet.edu.ve

Laboratorio de Computación de Alto Rendimiento (LCAR), Universidad Nacional Experimental del Táchira

Av. Universidad, Paramillo, San Cristóbal, Venezuela

María de los Ángeles Tarazona

maria.tarazona@unet.edu.ve

Departamento de Matemática, Universidad Nacional Experimental del Táchira

Av. Universidad, Paramillo, San Cristóbal, Venezuela

Resumen. *En la presente investigación se propone una reciente alternativa algorítmica que consiste en la utilización de una técnica híbrida basada en la implementación de mecanismos cooperativos. Se utilizó una heurística cooperativa para solucionar diferentes instancias del problema de la tardanza ponderada total en una máquina (SMTWTP), en particular para 40, 50 y 100 trabajos. Dentro de esta heurística cooperativa se evaluaron varias metaheurísticas para analizar su comportamiento, específicamente se utilizaron dos algoritmos meméticos y dos esquemas de búsqueda local (HC, ILS). Para determinar el rendimiento de cada propuesta algorítmica se llevó a cabo un análisis de rangos. Se obtuvo que los efectos de la aplicación de la heurística cooperativa son promisorios, pues presenta mejores resultados que sus algoritmos constitutivos para las instancias abordadas del problema. Además, parece mostrar espacio para futuras mejoras en su desempeño, al establecer mecanismos de calibración de sus parámetros.*

Plabras claves: Heurística cooperativa, Metaheurísticas, SMTWTP.

1. INTRODUCCIÓN

En la literatura científica se han abordado diferentes técnicas heurísticas para la resolución de problemas de optimización combinatoria. En este trabajo se utiliza una técnica híbrida basada en la implementación de mecanismos cooperativos enfocada en la resolución del problema de la tardanza ponderada total en una máquina (SMTWTP). Este es un problema representativo en el campo de planificación de manufactura e investigación de operaciones [1] y se considera un

problema NP-hard [2]. Ha sido abordado mediante diferentes enfoques desde métodos exactos [3] hasta metaheurísticas [4].

El SMTWTP consiste en un conjunto de trabajos que deben ser procesados en una sola máquina, donde cada trabajo consta de una sola operación que tiene un tiempo de procesamiento asociado, en él se define una propiedad que indica la importancia de cada uno de estos trabajos. Cada trabajo debe ser completado antes de su fecha límite y si este no es el caso, entonces se incurre en un retardo [5]. El retardo tiene una connotación económica importante en el sentido de que se trata de costes que se deben evitar tanto como sea posible. El objetivo del problema es encontrar una secuencia de trabajos para minimizar la tardanza ponderada total (TWT), i.e., minimizar el producto de la tardanza e importancia relativa de cada trabajo.

En este trabajo se presenta un estudio para la solución del SMTWTP, mediante técnicas híbridas de metaheurísticas basadas en métodos de búsqueda local y algoritmos basados en poblaciones. En particular, se generó una novel estrategia cooperativa basada en [6] para la solución del SMTWTP. En la fase experimental se llevó a cabo un estudio de las diferentes propuestas algorítmicas sobre la base de las evaluaciones de la función fitness y un conjunto de instancias descritas en OR-library.

El trabajo se estructura como sigue. La Sección 2 presenta la descripción formal del SMTWTP así como también, las investigaciones principales en el área. La Sección 3 presenta los diferentes esquemas metaheurísticos utilizados para la resolución del SMTWTP. La Sección 4 muestra los resultados computacionales obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones respectivas.

2. PROBLEMA DE LA TARDANZA PONDERADA TOTAL EN UNA MÁQUINA

El SMTWTP consiste en un conjunto de trabajos $J = \{J_1, \dots, J_n\}$ que deben ser procesados en una sola máquina, donde cada trabajo J_j consta de una sola operación que tiene un tiempo de procesamiento asociado p_j con $p_j \in \mathbb{R}^+$. En la definición del problema se incluye también una propiedad que indica la importancia w_j de cada trabajo J_j con $w_j \in \mathbb{R}^+$. Cada trabajo J_j debe ser completado antes de su fecha límite D_j y si este no es el caso, entonces se incurre en un retardo T_j que se mide como,

$$T_j = \max\{s_j + p_j - D_j, 0\} \quad (1)$$

donde s_j representa el tiempo de comienzo del trabajo J_j . El objetivo del problema es encontrar una secuencia de trabajos para minimizar la *tardanza ponderada total*. Formalmente, se puede expresar la función de fitness *TWT* como,

$$TWT = \min\left\{\sum_{j=1}^n w_j T_j\right\} \quad (2)$$

donde w_j es el parámetro asociado a la importancia del trabajo J_j y T_j es la tardanza asociada al trabajo J_j calculada mediante la Ecuación (1).

Varios estudios han demostrado que se pueden utilizar diferentes enfoques para resolver el SMTWTP con éxito al ofrecer soluciones razonablemente buenas con un número moderado de recursos. Boejko et al. [7] presentan un algoritmo de Búsqueda Tabú que utiliza la definición de una vecindad para el caso del SMTWTP, basada en la aplicación combinada de movimientos de inserción e intercambio. La idea consiste en realizar varios movimientos simultáneamente en una sola iteración del algoritmo y permitir acelerar la convergencia de las buenas soluciones. den Besten et al. [8] investigan la aplicación de ILS para resolver el SMTWTP. También se incluyen

propuestas de algoritmos basados en poblaciones para la solución del SMTWTP, como por ejemplo, Ferrolho & Crisóstomo [9] que presentan un algoritmo genético con diferentes operadores de mutación y cruzamiento, evalúan su rendimiento y desarrollan un programa en C++ denominado HybFlexGA para su aplicación. Recientemente se han presentado enfoques híbridos para la solución del SMTWTP [10], específicamente mediante algoritmos meméticos (MAs) debido a que proveen un mecanismo para equilibrar el aprendizaje individual y la evolución, a través de la asociación de la búsqueda local aplicada por los individuos y los operadores genéticos.

3. PROPUESTAS PARA LA RESOLUCIÓN DEL SMTWTP

En esta sección se aborda el SMTWTP mediante diferentes metaheurísticas, en particular se presentan los detalles de cada enfoque algorítmico incluyendo los métodos de búsqueda local así como las variantes meméticas y el enfoque cooperativo.

3.1. Búsqueda Local (LS)

Se utilizaron como algoritmos de búsqueda local ILS y HC, basados ambos en la definición de la vecindad *swap* [1], donde dos soluciones son vecinas si solamente se diferencian en dos posiciones de la secuencia. Para simplificar el esfuerzo computacional se realiza una exploración parcial de la vecindad, con sólo αn soluciones candidatas. El valor de α se establece en 4. En el caso de HC, la búsqueda se reanuda desde un punto inicial diferente si se produce el estancamiento antes de consumir el número asignado de las evaluaciones. Por último, en el caso del ILS se utiliza una versión basada en la propuesta de Blum [11], es decir, HC como método de búsqueda local con exploración parcial de la vecindad, una perturbación sobre la base de un movimiento *block* (consiste en una permutación se obtiene por medio de otra, a través de un intercambio de bloques de trabajos al azar) y el parámetro *NIC* se fijó en 2000.

3.2. Algoritmos Meméticos

Se diseñaron dos versiones particulares de algoritmos meméticos de la forma GA+LS, modificando el enfoque de mejora local, para ello se utilizaron los métodos de búsqueda local: HC e ILS, llamando a las diversas versiones de los MAs como MAHC y MAILS, respectivamente. Se estableció un GA elitista generacional que reemplaza el peor individuo de la población. Los parámetros utilizados por los MAs fueron una población de 30 individuos, una probabilidad de cruce igual a 1 y la probabilidad de mutación de $1/n$ donde n es el número de trabajos (en este caso el número de genes por individuo) con una selección de torneo binario. La mutación se realiza mediante la aplicación de un movimiento *block* y la recombinación utiliza el PBX [9]. Por otra parte, en todos los MAs, la búsqueda local se aplica a cualquier individuo con una probabilidad de $p_{LS} = 0.05$ y la mejora usa como máximo $LS_{evals} = 200$ evaluaciones.

3.3. Heurística Cooperativa

El modelo consiste de un conjunto de agentes [6] que son cargados con una metaheurística particular y con soluciones iniciales aleatorias para explorar subespacios de búsqueda del problema de forma concurrente. El proceso de búsqueda es realizado por cada agente durante una cantidad de tiempo particular (o número de evaluaciones si fuese el caso), luego de lo cual se

procede a elegir la mejor solución encontrada por cada agente y se distribuye en el modelo cooperativo mediante una topología de comunicación específica. Las topologías de comunicación planteadas son:

Ring. Existe una lista circular de agentes en el que cada nodo sólo envía la información a su sucesor.

Broadcast. La que la mejor solución en cada punto de sincronización se transmite a todos los agentes.

Random. Cualquiera de dos agentes puede eventualmente comunicarse en cualquier punto de sincronización.

En general, se utiliza la siguiente notación para referirse a un mecanismo cooperativo. Sea ϕ un algoritmo cooperativo que está compuesto por un número de agentes d , una topología de comunicación $\Lambda \in \{Broadcast, Random, Ring\}$ y un número de ciclos $cyc\ max$, entonces $\phi = cyc\ max\ \Lambda(a_1, a_2, \dots, a_d)$. Se utilizaron como parámetros 5 ciclos y un número máximo de tres agentes, así como las tres topologías de comunicación mencionadas anteriormente.

4. RESULTADOS COMPUTACIONALES

Los algoritmos se implementaron en Java y se ejecutaron en una PC (Intel Celeron 1.5 GHz 512 MB) bajo Linux Debian (kernel 2.6.16-2-686). Cada uno de los algoritmos se evaluó en las 125 instancias del problema definidas en OR-library para 40, 50 y 100 trabajos. Además, cada instancia fue ejecutada kn^2 evaluaciones donde k es una constante definida experimentalmente como 2000 y n es el número de trabajos. La elección de esta relación está dada por el hecho de que la complejidad del problema es directamente proporcional al número de trabajos. Se impuso un número máximo de evaluaciones de la función de *fitness* para encontrar la solución óptima por parte de cada algoritmo, el objetivo es establecer el esfuerzo computacional independiente de la plataforma computacional utilizada (hardware, lenguaje, sistema operativo). Para la evaluación se

utilizó el error cuadrático medio definido como: $E_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_i} (TWT_i - o_i)^2}{N_i}}$, donde N_i es el número de instancias, para nuestro caso 125. TWT_i es el valor medio de *fitness* de la i -ésima instancia y o_i es el valor óptimo de la i -ésima instancia.

En general, se establecieron 10 esquemas algorítmicos, a saber, 5Br(ILS,ILS,ILS), 5Br(ILS,MAILS,MAILS), 5Ra(ILS,ILS,ILS), 5Ra(ILS,MAILS,MAILS), 5Ri(ILS,ILS,ILS), 5Ri(ILS,MAILS,MAILS), MAHC, MAILS, ILS y HC con los parámetros y sus consecuentes valores descritos en la Sección 3. En la Tabla 1 se resumen los resultados computacionales. Se puede ver que el mejor rendimiento corresponde a los algoritmos cooperativos 5 Λ (ILS,ILS,ILS) ya que presentan el menor error cuadrático medio para los tres tamaños de trabajos. El peor fue el esquema de HC (como era de esperar), lo que indica que tiende a estancarse en algún atractor de un mínimo local y su incapacidad para escapar de éste.

En general los algoritmos meméticos tienen un rendimiento superior a sus componentes individuales, por ejemplo, si analizamos la Tabla 1 podemos observar que en el caso de 40 trabajos, MAILS tiene un E_r mucho menor que el ILS individual. Por otra parte, se puede observar que los algoritmos cooperativos presentan mejores resultados, lo cual demuestra que el sistema en su conjunto es más robusto, pero que la selección de los algoritmos que integran la heurística cooperativa tiene un fuerte impacto en el rendimiento de los mismos. Además, se

observa que los algoritmos cooperativos tienen un mejor equilibrio intensificación-diversificación como se muestra en los resultados.

Tabla 1. Resultados computacionales basados en el E_r

	40 trabajos	50 trabajos	100 trabajos
5Br(ILS,ILS,ILS)	8,23	38,18	477,67
5Br(ILS,MAILS,MAILS)	11,35	54,55	496,86
5Ra(ILS,ILS,ILS)	8,34	38,99	483,92
5Ra(ILS,MAILS,MAILS)	15,50	67,81	582,73
5Ri(ILS,ILS,ILS)	8,84	35,34	464,02
5Ri(ILS,MAILS,MAILS)	11,66	52,67	519,16
MAHC	95,81	284,94	1905,69
MAILS	9,95	46,26	429,64
ILS	20,38	43,16	483,19
HC	695,78	955,17	3129,78

Con el fin de analizar el significado de los resultados y obtener una perspectiva global sobre cómo se comparan entre sí, se ha utilizado un enfoque basado en rangos. Para ello, se ha calculado el rango r_j^i de cada algoritmo j en cada instancia i (rango 1 para el mejor, y el rango k para el peor, donde $k = 10$ es el número de algoritmos, en caso de empate, se asigna un rango promedio). La distribución de estos rangos se muestra en la Fig. 1. Cabe señalar que los métodos 5Br(ILS,ILS,ILS) y 5Ri(ILS,ILS,ILS) representaron los mejores algoritmos para este problema.

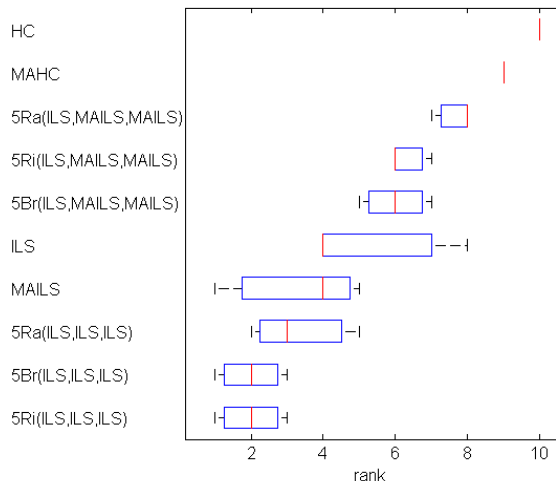


Figura 1. Rangos de distribución de las diferentes versiones metaheurísticas. La mediana está marcada con una línea vertical.

5. CONCLUSIONES

En el artículo se presenta un estudio comparativo de diferentes esquemas cooperativos de la forma $5\Lambda(\text{ILS,ILS,ILS})$ y $5\Lambda(\text{ILS,MAILS,MAILS})$, para la resolución del SMTWTP. Las propuestas cooperativas muestran un comportamiento en general mejor que las metaheurísticas como ILS o las versiones híbridas para este problema. Sin embargo, se observa que el mecanismo cooperativo puede tener margen de mejora al implementar agentes con metaheurísticas con algún

mecanismo con memoria, ya que los experimentos sugieren que a medida que mejoran las metaheurísticas constitutivas mejor es el comportamiento del algoritmo cooperativo. Como trabajo futuro se propone el estudio de nuevas propuestas cooperativas e híbridas, así como la prueba en nuevas instancias del problema del SMTWTP.

REFERENCIAS

- [1]. Geiger, M.J.: On Heuristic Search for the Single Machine Total Weighted Tardiness Problem - Some Theoretical Insights and their Empirical Verification. *European Journal of Operational Research* 207(3) (2010) 1235–1243.
- [2]. Lawler, E.: A Pseudopolynomial Algorithm for Sequencing Jobs to Minimize Total Tardiness. In: *Annals of Discrete Mathematics*. Volume 1. (1977) 331–342
- [3]. Valente, J.M.S., Alves, R.A.F.S.: Beam Search Algorithms for the Single Machine Total Weighted Tardiness Scheduling Problem with Sequence-dependent Setups. *Computers & Operations Research* 35(7) (2008) 2388–2405.
- [4]. Bilge, U., Kurtulan, M., Kirac, F.: A Tabu Search Algorithm for the Single Machine Total Weighted Tardiness Problem. *European Journal of Operational Research* 176(3) (February 2007) 1423–1435.
- [5]. Abdul-Razaq, T.S., Potts, C.N., Van Wassenhove, L.N.: A Survey of Algorithms for the Single Machine Total Weighted Tardiness Scheduling Problem. *Discrete Applied Mathematics* 26(2-3) (1990) 235–253.
- [6]. Amaya, J. E., Cotta, C., & Fernández-Leiva, A. J.: Memetic cooperative models for the tool switching problem. *Memetic Computing*, 3(3) (2011) 199–216.
- [7]. Boejko, W., Grabowski, J., Wodecki, M.: Block approach-Tabu Search Algorithm for Single Machine Total Weighted Tardiness Problem. *Computers & Industrial Engineering* 50(1-2) (2006) 1–14.
- [8]. den Besten, M., Stützle, T., Dorigo, M.: Design of Iterated Local Search Algorithms. An Example Application to the Single Machine Total Weighted Tardiness Problem. In: *Proceedings of the EvoWorkshops on Applications of Evolutionary Computing*, London, UK, Springer-Verlag (2001) 441–451.
- [9]. Ferrolho, A., Crisostomo, M. Single Machine Total Weighted Tardiness Problem with Genetic Algorithms. In 2007 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications (2007) 1–8.
- [10]. M'Hallah, R.: Minimizing Total Earliness and Tardiness on a Single Machine using a Hybrid Heuristic. *Computers & Operations Research* 34(10) (2007) 3126–3142.
- [11]. Blum, C.: Iterated Local Search and Constructive Heuristics for Error Correcting Code Design. *Int. J. Innov. Comput. Appl.* 1 (April 2007) 14–22

MÉTODO DE PROYECCIONES GENERALIZADAS ALTERNANTES CON HIPERPLANOS DE SEPARACIÓN PARA DOS CONJUNTOS

Maricarmen Andrade

maricarmen.andrade@ciens.ucv.ve

Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Ciudad Universitaria, Av. Los Estadios, Los Chaguaramos, Caracas-Venezuela

René Escalante

rescalante@usb.ve

Departamento de Cómputo Científico y Estadística, División de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas-Venezuela

Abstract. *Como consecuencia de la aplicación directa del algoritmo de las proyecciones generalizadas, esperamos que el error de la suma de las distancias (ESD) a los conjuntos involucrados disminuya con el número de iteraciones. En la práctica, es posible detectar puntos iniciales para los cuales el algoritmo converge a un punto fijo no factible (i.e., que no pertenece al conjunto solución) llamado punto trampa. En estos casos, la propiedad de reducción del ESD falla. Con el objeto de evitar las trampas al momento de aplicar el denominado método de proyecciones generalizadas alternantes, cuando al menos un conjunto de los considerados no sea convexo, proponemos usar una estrategia, antes no considerada en la literatura conocida por nosotros, que involucra el uso de hiperplanos de separación, de manera que en lugar de proyectar sobre los conjuntos directamente, se proyecte de manera sucesiva y cíclica sobre uno de los conjuntos y el hiperplano de separación, hasta alcanzar la convergencia a un punto en la intersección de los conjuntos involucrados.*

Key words: Método de proyecciones generalizadas, Conjuntos no convexos, Punto trampa, Error de la suma de las distancias, Hiperplano de separación.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de encontrar un punto en la intersección de una colección de conjuntos dados se presenta en diferentes áreas de las matemáticas aplicadas y en la ingeniería, tales como: restauración de imágenes, la búsqueda de señales electrónicas, en óptica, probabilidades y estadística, solución de ecuaciones lineales, etc [1].

El método de las proyecciones alternantes (MAP) fue formulado en 1933 por John von Neumann [2], quién trató el problema de encontrar la proyección de un punto dado, en un espacio de Hilbert

H , en la intersección de dos subespacios cerrados. En 1983, Levi [3] estableció un interesante resultado para los métodos de proyecciones sucesivas sobre conjuntos no convexos. Nos referimos al denominado **método de las proyecciones generalizadas**, donde Levi consideró los iterados $\{x_k\}$ de manera tal que la suma de las distancias de estos iterados a los conjuntos involucrados decrezca con el número de iteraciones. Debido a la complejidad de los conjuntos implicados y el punto inicial del método de proyección, es posible que el algoritmo de proyecciones generalizadas converja a un punto que no pertenece a la intersección de los conjuntos involucrados, denominado **punto trampa**.

El objetivo principal de este trabajo consiste en proponer una estrategia de convergencia, antes no considerada, tales como la utilización de hiperplanos de separación (i.e., que separe un punto de uno de los conjuntos implicado en el algoritmo de proyecciones, de manera que, en vez de proyectar sobre dicho conjunto, proyectamos sobre el hiperplano separador, a fin de evitar que el algoritmo converja a un punto de entrampamiento).

2. PRELIMINARES

El objetivo de esta sección es presentar algunas definiciones y teoremas que serán importantes en el desarrollo de nuestra estrategia de convergencia.

Un conjunto C en un espacio vectorial se dice que es **convexo**, si $(1 - \alpha)x + \alpha y \in C$ siempre que $x \in C, y \in C$ y $0 < \alpha < 1$. Los conjuntos no convexos no obedecen esta definición.

Los **hiperplanos** son conjuntos definidos en \mathbb{R}^n mediante la expresión

$$H = \{x \in \mathbb{R}^n : \langle p, x \rangle = \alpha\}$$

donde p es un vector no nulo en \mathbb{R}^n llamado el vector normal del hiperplano y α un escalar.

Sea C un subconjunto no vacío del espacio de Hilbert H y sea $x \in H$. Un elemento $y_0 \in C$ es llamado una **mejor aproximación** de x si

$$\|x - y_0\| = d(x, C),$$

donde $d(x, C) = \inf\{\|x - y\| : y \in C\}$. El número $d(x, C)$ es llamado la **distancia** de x a C .

Sean C_1, C_2, \dots, C_m m conjuntos en un espacio de Hilbert H . Definimos el **error de la suma de las distancias** (ESD) de un punto x respecto de los conjuntos C_1, C_2, \dots, C_m como

$$J(x) \equiv \sum_{i=1}^m d(x, C_i).$$

Sea C un conjunto en un espacio de Hilbert H y x un punto en H . Si existe un punto x^* en C tal que $\|x - x^*\| = d(x, C)$, entonces llamamos a x^* la **proyección generalizada** de x sobre C . Se suele escribir $x^* = Px$ y P se denomina el **proyector generalizado** sobre C .

El siguiente teorema, señalado por Levi, describe la propiedad de reducción del ESD del algoritmo recursivo .

Teorema 1 (*Teorema fundamental de proyecciones generalizadas, Levi [3]*): La fórmula recursiva $f_{n+1} = T_{1,n}T_{2,n}f_n$, con f_0 arbitrario tiene la propiedad

$$J(f_{n+1}) \leq J(T_2 f_n) \leq J(f_n) \quad (1)$$

para todo λ_1 y λ_2 que satisfagan

$$0 \leq \lambda_i \leq \frac{A_i^2 + A_i}{A_i^2 + A_i - \frac{1}{2}(A_i + B_i)} \quad , \quad i = 1, 2,$$

donde

$$A_1 \equiv \frac{\|P_1 T_2 f_n - T_2 f_n\|}{\|P_2 T_2 f_n - T_2 f_n\|}, \quad A_2 \equiv \frac{\|P_2 f_n - f_n\|}{\|P_1 f_n - f_n\|}$$

y

$$B_1 \equiv \frac{\Re\langle P_2 T_2 f_n - T_2 f_n, P_1 T_2 f_n - T_2 f_n \rangle}{\|P_2 T_2 f_n - T_2 f_n\|^2}, \quad B_2 \equiv \frac{\Re\langle P_1 f_n - f_n, P_2 f_n - f_n \rangle}{\|P_1 f_n - f_n\|^2}.$$

$\Re\langle \cdot, \cdot \rangle$ denota la parte real de $\langle \cdot, \cdot \rangle$. El resultado dado por la desigualdad (1) se denomina **propiedad de reducción del ESD**.

3. MÉTODO DE PROYECCIONES GENERALIZADAS ALTERNANTES USANDO HIPERPLANOS DE SEPARACIÓN

Consideremos S_1 y S_2 dos conjuntos cerrados y no vacíos en \mathbb{R}^n , tales que S_1 sea un conjunto no convexo y S_2 un conjunto convexo, y sean P_{S_1} y P_{S_2} sus respectivas proyecciones. Además, sea $x_0 \in \mathbb{R}^n$ un punto inicial del algoritmo. Nuestro objetivo es encontrar un punto en la intersección de S_1 y S_2 , es decir, un $x \in S = S_1 \cap S_2 \neq \emptyset$. Un esquema cíclico se basa en la siguiente fórmula recursiva

$$x_{n+1} = P_{S_1} P_{S_2} x_n$$

Para medir el desempeño del algoritmo de proyección, consideramos la suma de las distancias entre los puntos x_n y los conjuntos S_1 y S_2 , es decir,

$$J(x_n) = \|P_{S_1} x_n - x_n\| + \|P_{S_2} x_n - x_n\|.$$

Si $J(x_{n+1}) = J(x_n) = 0$, entonces $x_n \in S_1 \cap S_2$, pero si, $J(x_{n+1}) = J(x_n) = a \neq 0$, entonces las proyecciones generalizadas alternantes alcanzaron un punto de entrampamiento, es decir, $x_n \notin S_1 \cap S_2$. Si esto sucede, se propone utilizar un esquema que involucra la utilización de una sucesión de hiperplanos de separación. En cada iteración, se define un hiperplano que separa la proyección del punto inicial del iterado sobre el conjunto S_2 con su proyección sobre el conjunto S_1 . Un resultado conocido nos permite definir un hiperplano de separación H_0 entre los puntos $P_{S_2} x_0 \in S_2$ y $P_{S_1} P_{S_2} x_0 \in S_1$ tal que $H_0 \cap S_2 \neq \emptyset$. Para ello procedemos de la siguiente manera; primero proyectamos el punto x_0 sobre el conjunto convexo S_2 y el elemento resultante lo denotamos por $P_{S_2} x_0$ y éste lo proyectamos sobre el conjunto no convexo S_1 , obteniendo el elemento $P_{S_1} P_{S_2} x_0$. Posteriormente localizamos el punto medio w del segmento de línea que une los puntos $P_{S_2} x_0$ y $P_{S_1} P_{S_2} x_0$. Sea v un vector con origen en el punto w y su punto final es $P_{S_2} x_0$. Luego definimos otro vector u con origen en el punto w y que forma con el vector v un ángulo α , de tal manera que dicho vector u será el vector normal al hiperplano H_0 , cuya intersección con el conjunto S_2 sea diferente al vacío, es decir, $H_0 \cap S_2 \neq \emptyset$ (ver Fig. 1(a)). Este hiperplano es un hiperplano separador entre los puntos $P_{S_2} x_0 \in S_2$ y $P_{S_1} P_{S_2} x_0 \in S_1$. Sea $H_0 = \{z \in \mathbb{R}^n : \langle u, z \rangle = c\}$ el primer hiperplano de

separación en el proceso, donde u es un vector normal y $c = \langle u, w \rangle$. Las proyecciones se realizarán sobre el hiperplano H_0 y sobre el conjunto S_2 hasta obtener un punto $(x_0)_n \in S_2 \cap H_0$. La existencia de $(x_0)_n$ está garantizada, ya que seleccionamos un ángulo α de manera que $S_2 \cap H_0 \neq \emptyset$. Además, las sucesivas proyecciones convergen a un punto en la intersección entre S_2 y H_0 puesto que ambos conjuntos son convexos.

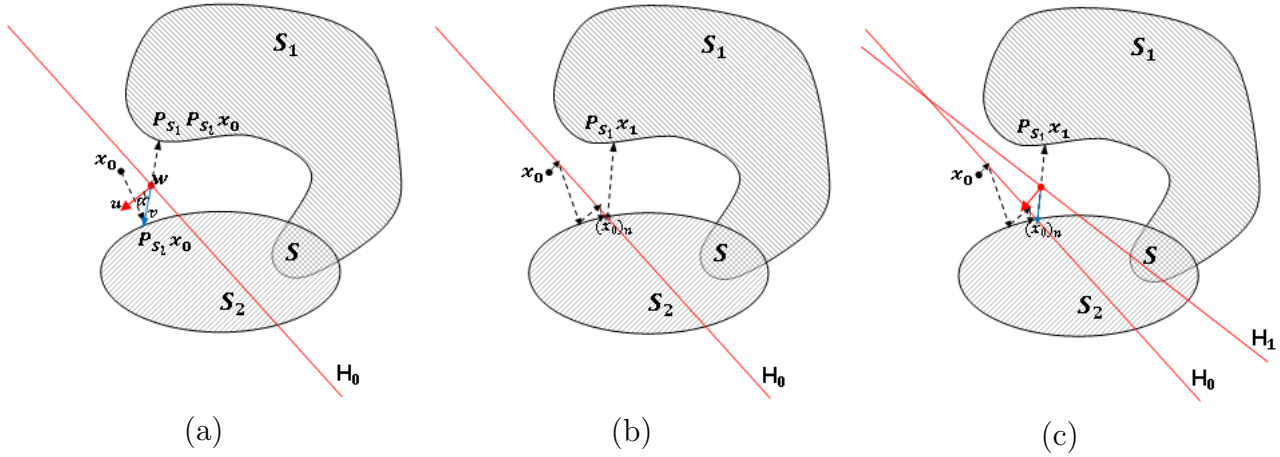


Figura 1: (a) El punto medio w en el segmento de línea cuyo extremos son los puntos $P_{S_2}x_0$ y $P_{S_1}P_{S_2}x_0$, permite definir, mediante un ángulo α , el hiperplano H_0 tal que $H_0 \cap S_2 \neq \emptyset$. (b) Proyecciones alternas sobre H_0 y S_2 y al encontrar un punto en la intersección, éste se proyecta sobre el conjunto no convexo. (c) El hiperplano H_1 separa a $(x_0)_n = x_1$ y $P_{S_1}x_1$.

Posteriormente proyectamos el punto $(x_0)_n = x_1$ sobre el conjunto S_1 del cual se obtiene el punto $P_{S_1}x_1$ (ver Fig. 1(b)). Si $x_1 \neq P_{S_1}x_1$ entonces el error de la suma de las distancias $J(x_1) = \|P_{S_1}x_1 - x_1\| + \|P_{S_2}x_1 - x_1\| = b > \epsilon$ (ϵ es la tolerancia del algoritmo). Si el valor $b \geq a$ (siendo a el error de la suma de las distancias en el punto trampa), entonces definimos otro hiperplano H_1 que separe a x_1 y $P_{S_1}x_1$ de tal manera que $H_1 \cap S_2 \neq \emptyset$ (ver Fig. 1(c)) y de nuevo se realizan las proyecciones alternadamente sobre H_1 y S_2 , para así generar una sucesión de elementos que converge a un punto $(x_1)_n \in H_1 \cap S_2$.

Si el valor $b < a$, entonces el algoritmo pasó la región donde se encuentra el punto trampa. Luego seguimos proyectando sobre los conjuntos S_1 y S_2 de forma sucesiva y alterna hasta encontrar un punto en $S_1 \cap S_2$.

4. EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

En esta sección, mostramos un experimento para hallar la proyección de un elemento x_0 dado, en la intersección de dos conjuntos cerrados, donde suponemos que alguno de ellos es no convexo. Los algoritmos que haremos uso en este experimento son: Algoritmo MAP (**Algoritmo 1**), Algoritmo de proyecciones generalizadas de Levi (**Algoritmo 2**) y Algoritmo de proyecciones generalizadas alternantes usando hiperplanos de separación (estrategia propuesta) (**Algoritmo 3**).

Consideremos los conjuntos C_1 y C_2 , definidos de la siguiente manera:

$$C_1 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : (x, y, z) \in \mathfrak{F}_1 \cup \mathfrak{F}_2 \cup \mathfrak{F}_3\}$$

donde

$$\mathfrak{F}_1 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x^2 + (y - 5)^2 + (z + 1)^2 = 9\};$$

$$\mathfrak{F}_2 = \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : (x - 5)^2 + \left(y - \frac{13}{2}\right)^2 + (z + 1)^2 = \frac{25}{4} \right\};$$

$$\mathfrak{F}_3 = \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : \left(x - \frac{17}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{7}{2}\right)^2 + (z + 1)^2 = \frac{25}{4} \right\}$$

y

$$C_2 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : (x - 6)^2 + (y + 1)^2 + (z + 1)^2 \leq 9\}.$$

El conjunto C_1 está formado por la unión de tres superficies esféricas (conjunto no convexo), mientras C_2 es el conjunto de los puntos que determinan una esfera maciza (conjunto convexo).

Para algún $v = (x, y, z)$ arbitrario, las proyecciones $P_{C_1}v$ y $P_{C_2}v$ se definen de la siguiente manera

$$P_{C_1}v = \begin{cases} P_{\mathfrak{F}_1}v & \text{si } d(v, P_{\mathfrak{F}_1}v) = \inf\{d(v, P_{\mathfrak{F}_1}v), d(v, P_{\mathfrak{F}_2}v), d(v, P_{\mathfrak{F}_3}v)\} \\ P_{\mathfrak{F}_2}v & \text{si } d(v, P_{\mathfrak{F}_2}v) = \inf\{d(v, P_{\mathfrak{F}_1}v), d(v, P_{\mathfrak{F}_2}v), d(v, P_{\mathfrak{F}_3}v)\} \\ P_{\mathfrak{F}_3}v & \text{si } d(v, P_{\mathfrak{F}_3}v) = \inf\{d(v, P_{\mathfrak{F}_1}v), d(v, P_{\mathfrak{F}_2}v), d(v, P_{\mathfrak{F}_3}v)\} \end{cases}$$

donde

$$P_{\mathfrak{F}_1}v = \left(\frac{3x}{\sqrt{r}}, \frac{3(y-5)}{\sqrt{r}} + 5, \frac{3(z+1)}{\sqrt{r}} - 1 \right), \text{ siendo } r = x^2 + (y-5)^2 + (z+1)^2;$$

$$P_{\mathfrak{F}_2}v = \left(\frac{\frac{5}{2}(x-5)}{\sqrt{t}} + 5, \frac{\frac{5}{2}(y-\frac{13}{2})}{\sqrt{t}} + \frac{13}{2}, \frac{\frac{5}{2}(z+1)}{\sqrt{t}} - 1 \right), \text{ siendo } t = (x-5)^2 + \left(y - \frac{13}{2}\right)^2 + (z+1)^2;$$

$$P_{\mathfrak{F}_3}v = \left(\frac{\frac{5}{2}(x-\frac{17}{2})}{\sqrt{u}} + \frac{17}{2}, \frac{\frac{5}{2}(y-\frac{7}{2})}{\sqrt{u}} + \frac{7}{2}, \frac{\frac{5}{2}(z+1)}{\sqrt{u}} - 1 \right), \text{ siendo } u = \left(x - \frac{17}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{7}{2}\right)^2 + (z+1)^2;$$

y

$$P_{C_2}v = \left(\frac{3(x-6)}{\sqrt{s}} + 6, \frac{3(y+1)}{\sqrt{s}} - 1, \frac{3(z+1)}{\sqrt{s}} - 1 \right), \text{ siendo } s = (x-6)^2 + (y+1)^2 + (z+1)^2.$$

En el Cuadro (1), se muestra los resultados correspondientes a este experimento, tomando $(-4, -3, -4)$ como punto de partida de la proyección.

En este cuadro se evidencia, que para el punto inicial $(-4, -3, -4)$, el algoritmo MAP converge a un punto trampa $(2.12132, 2.87868, -1)$. En el caso del algoritmo 2, éste converge a un punto en la intersección de los conjuntos C_1 y C_2 con 115 iteraciones. El algoritmo 3 utilizó hiperplanos de separación en aquellos iterados donde el ESD toman valores mayores o iguales a $b = 2, 3$, puesto que $J(x_T) = 2,48528$. En este experimento, el algoritmo utilizó 5 hiperplanos de separación, llegando a una solución factible en 80 iteraciones, evitando de esta forma el punto de entrapamiento.

Cuadro 1: Resultados de los algoritmos 1, 2 y 3.

Algoritmo 1		Algoritmo 2			Algoritmo 3				
IT	$J(v_n)$	IT	$J(v_{n+1})$	$J(T_2v_n)$	Sep. hyper.	$J(v_i)$	IT	$J((v_p)_n)$	Note
1	14.06413	1	2.76470	4.34215	H_1 $\alpha = \frac{3\pi}{4}$	14.06413	1	13.00065	it converges to $H_1 \cap C_2$
2	2.76470	2	2.57770	2.63536			2	0.82039	
3	2.50718	3	2.57098	2.56447			8	0.00002	
4	2.48722	4	2.50688	2.50846			12	0.00000	
5	2.48545	10	2.48528	2.48530	H_2 $\alpha = \frac{3\pi}{4}$	4.02229	13	0.65002	it converges to $H_2 \cap C_2$
6	2.48530	14	2.32844	2.48528			15	0.00025	
7	2.48528	32	2.25198	2.48528			17	0.00000	
12	2.48528	41	2.48528	2.48528	H_3 $\alpha = \frac{3\pi}{4}$	3.77055	18	0.76956	it converges to $H_3 \cap C_2$
30	2.48528	52	2.48528	2.48528			21	0.00004	
50	2.48528	63	1.72472	2.35259			24	0.00000	
75	2.48528	65	0.22494	0.97333	H_4 $\alpha = \frac{5\pi}{6}$	3.48736	25	0.34982	it converges to $H_4 \cap C_2$
100	2.48528	70	0.05870	0.11546			28	0.00003	
200	2.48528	78	0.00814	0.00851			31	0.00000	
300	2.48528	84	0.00202	0.00265	H_5 $\alpha = \frac{2\pi}{3}$	3.47305	32	1.16594	it converges to $H_5 \cap C_2$
520	2.48528	91	0.00020	0.00029			41	0.00055	
760	2.48528	96	0.00005	0.00011			54	0.00000	
800	2.48528	102	0.00001	0.00002	MAP	2.20265	55	2.20265	it converges to $C_1 \cap C_2$
950	2.48528	108	0.00000	0.00001			68	0.00018	
1000	2.48528	115	0.00000	0.00000			80	0.00000	

5. CONCLUSIÓN

- El MAP no es eficiente para el caso de que alguno de los conjuntos involucrados, sea no convexo, ya que en la práctica, en general, el algoritmo converge a un punto trampa.
- A pesar de que el algoritmo de proyecciones generalizadas, propuesto por Levi [3], logra la convergencia a una solución factible, el número de iteraciones dependerá de los valores arbitrarios que tomarán los parámetros de relajación y del punto de partida del algoritmo.
- El denominado método de las proyecciones generalizadas alternantes, utilizando hiperplanos de separación, es una estrategia que se puede aplicar cuando alguno de los conjuntos involucrados en el algoritmo de proyecciones sea no convexo. El algoritmo de proyecciones sobre los hiperplanos de separación puede evitar, en algunos casos, la convergencia hacia el punto trampa y la aplicación de esta estrategia mostró, en la práctica, una mayor eficiencia computacional, ya que no depende de los parámetros de relajación para salir de una trampa, como en el caso de algoritmo 2.

REFERENCIAS

- [1] ESCALANTE, R., & RAYDAN, M., *Alternating Projections Methods*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2011.
- [2] VON NEUMANN, J., Functional Operators, vol. II. *The geometry of orthogonal spaces*. Annals of Math. Studies, 22, 1950. Princeton University Press. This is a reprint of mimeographed lecture notes first distributed in 1933.
- [3] LEVI, A., *Image Restoration by the Method of Projections with Applications to the Phase and Magnitud Retrieval Problems*. Ph.D thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Dept. of ECSE, Troy, NY, Dec. 1983.

MÉTODO DE PROYECCIONES ALTERNAS GENERALIZADAS PARA MÁS DE DOS CONJUNTOS DONDE NO TODOS SON CONVEXOS

Robert Espitia

robert.espitia@ciens.ucv.ve

Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Ciudad Universitaria, Av. Los Estadios, Los Chaguaramos, Caracas-Venezuela

René Escalante

rescalante@usb.ve

Departamento de Cómputo Científico y Estadística, División de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas-Venezuela

Abstract. *A partir del estudio de los métodos de proyecciones generalizadas, en donde la propiedad de reducción del error de las sumas de distancias (ESD) sólo puede ser garantizada para dos conjuntos, con alguno de ellos no convexo, expondremos que la propiedad de reducción del error de las sumas de distancias puede ser extendida al caso más general, cuando más de dos conjuntos están involucrados. Esto es posible al reformular el problema en un espacio vectorial producto. Esta reformulación consiste en transformar el problema de encontrar un punto en la intersección de m ($m > 2$) conjuntos, no todos necesariamente convexos en un espacio de Hilbert H , al problema de encontrar un punto en la intersección de solamente 2 conjuntos en el espacio $\mathcal{H} = H^m$. A continuación, a través del uso de técnicas novedosas, desarrollaremos un algoritmo de proyecciones generalizadas en un espacio producto, que converja a una solución factible (un punto en la intersección de los conjuntos originales), evitando los puntos fijos, ajenos al conjunto solución, denominados trampas.*

Key words: Método de proyecciones generalizadas, Conjuntos no convexos, Error de la suma de las distancias, Espacio vectorial producto, Solución factible.

1. INTRODUCCIÓN

El método de proyecciones alternantes (MAP) fue originalmente propuesto en 1933 por John Von Neumann [1], quien trató el problema de encontrar la proyección de un punto dado x_0 , que pertenece a un espacio de Hilbert H , en la intersección de dos subespacios cerrados. El MAP tiene aplicaciones en muchos y diferentes campos de las matemáticas aplicadas y la ingeniería, como son

el tratamiento de imágenes, la medicina, las probabilidades y la estadística, el problema de Dirichlet, la solución de ecuaciones lineales, etc. En 1967 Gubin, Polyak y Raik [2], definen un algoritmo para resolver el problema de encontrar un punto x_0 en la intersección de varios conjuntos convexos cerrados, conocido como POCS. Si todos los conjuntos son convexos, el algoritmo MAP converge a un punto en la intersección de los conjuntos. Pero cuando se trata con conjuntos que no son todos convexos, en general, no es posible alcanzar tal convergencia. A través de este trabajo, se evidenciará lo poco efectivos que resultan los métodos clásicos de proyecciones alternantes para el caso en que no todos los conjuntos son convexos. Debido a la gran cantidad de problemas prácticos que envuelven el uso de conjuntos no convexos, resulta ser de gran importancia considerar un método tal como el método de las proyecciones generalizadas, propuesto por Levi [3], para darle solución a este tipo de problemas. En general, cuando trabajamos con conjuntos que no son convexos, se busca generar iterados cuya suma de distancias desde los conjuntos involucrados decrezca con el número de iteraciones. Dicha reducción de la suma de las distancias está garantizada para dos conjuntos, pero para más de dos conjuntos no podemos garantizarla. Para tratar de solventar esta última situación, definiremos y aplicaremos las proyecciones generalizadas en un espacio producto, hecho introducido originalmente para el MAP por Pierra [4]. A través de la realización de este trabajo buscamos que los espacios producto que involucran conjuntos no-convexos permitan, para un número finito arbitrario de restricciones no-convexas, definir algoritmos que conserven la propiedad de reducción de la suma de las distancias entre los iterados y los conjuntos involucrados.

2. PRELIMINARES

El objetivo de esta sección es presentar algunas definiciones y teoremas que serán importantes en el desarrollo de nuestra estrategia de convergencia.

Sean C_1, C_2, \dots, C_m m conjuntos convexos cerrados en un espacio de Hilbert H , y sea C_0 su conjunto intersección, es decir, $C_0 = \bigcap_{i=1}^m C_i$. Para todo $i = 1, 2, \dots, m$. P_i denota el operador de proyección sobre el conjunto C_i y T_i denota el correspondiente proyector relajado: $T_i = I + \lambda_i(P_i - I)$ para $\lambda_i \in (0, 2)$ donde I es el operador identidad en H .

Teorema 1 [2] (**Teorema Fundamental de POCS**) *Supongamos que C_0 es diferente al vacío, entonces para todo $x \in H$ y para todo $\lambda_i \in (0, 2)$, $i = 1, 2, \dots, m$, la sucesión $\{T^n x\}$ converge débilmente a un punto de C_0 .*

Sea C un subconjunto no vacío del espacio de Hilbert H y sea $x \in H$. Un elemento $y_0 \in C$ es llamado una **mejor aproximación** de x si

$$\|x - y_0\| = d(x, C),$$

donde $d(x, C) = \inf\{\|x - y\| : y \in C\}$. El número $d(x, C)$ es llamado la **distancia** de x a C .

Sean C_1, C_2, \dots, C_m m conjuntos en un espacio de Hilbert H . Definimos el **error de la suma de las distancias** (ESD) de un punto x respecto de los conjuntos C_1, C_2, \dots, C_m como

$$J(x) \equiv \sum_{i=1}^m d(x, C_i).$$

Sea C un conjunto en un espacio de Hilbert H y x un punto en H . Si existe un punto x^* en C tal que $\|x - x^*\| = d(x, C)$, entonces llamamos a x^* la **proyección generalizada** de x sobre C . Se suele escribir $x^* = Px$ y P se denomina el **proyector generalizado** sobre C .

2.1. El espacio producto

En [4] Pierra introduce una formulación del problema de encontrar un punto en la intersección de varios conjuntos convexos cerrados en un espacio vectorial producto.

Supongamos que $C_0 = \bigcap_{i=1}^m C_i \neq \emptyset$, donde C_1, C_2, \dots, C_m son m conjuntos cerrados y convexos ($m > 2$), en un espacio de Hilbert H . Entonces, el problema de encontrar un punto en C_0 tiene una formulación equivalente en el espacio producto, definido por $\mathcal{H} = H^m$.

En el espacio \mathcal{H} definimos los conjuntos $C = \{X : X = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in \mathcal{H}, x_i \in C_i \ \forall i = 1, 2, \dots, m\}$ y $D = \{X : X = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in \mathcal{H}, x_1 = x_2 = \dots = x_m\}$.

La proyección de $X = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in \mathcal{H}$ sobre D está dada por

$$P_D X = \left(\sum_{i=1}^m w_i x_i, \sum_{i=1}^m w_i x_i, \dots, \sum_{i=1}^m w_i x_i \right)$$

y la proyección de $X = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in \mathcal{H}$ sobre C está dada por

$$P_C X = (P_1 x_1, P_2 x_2, \dots, P_m x_m).$$

Por lo tanto, la sucesión $\{X_n\}$ está generada por el algoritmo $X_{n+1} = P_D P_C X_n$ donde P_D, P_C denotan, respectivamente, los proyectores sobre C y D que convergen débilmente a un punto $X^* \in \mathcal{H}$. Así

$$P_D P_C X_n = \left(\sum_{i=1}^m w_i P_i x_n, \sum_{i=1}^m w_i P_i x_n, \dots, \sum_{i=1}^m w_i P_i x_n \right).$$

Teorema 2 [5] (*Proyecciones generalizadas extendidas*) Sean

$$T_{D,n} \equiv I + \lambda_{D,n}(P_D - I) \quad \text{y} \quad T_{C,n} \equiv I + \lambda_{C,n}(P_C - I) \quad (1)$$

donde I es el operador identidad sobre \mathcal{H} . Entonces, los iterados generados por el algoritmo de proyección generalizada en forma general serán $X_{n+1} = T_{D,n} T_{C,n} X_n$ con X_0 arbitrario en \mathcal{H} y van a satisfacer

$$J(X_{n+1}) \leq J(T_{C,n} X_n) \leq J(X_n)$$

donde $J(\cdot)$ es el (ESD) definido por

$$J(X_n) \equiv \| \| P_C X_n - X_n \| \| + \| \| P_D X_n - X_n \| \|$$

siempre que $\lambda_{D,n}$ y $\lambda_{C,n}$ en la Eq. (1) satisfagan

$$0 \leq \lambda_{i,n} \leq \frac{A_{i,n}^2 + A_{i,n}}{A_{i,n}^2 + A_{i,n} - \frac{1}{2}(A_{i,n} + B_{i,n})}, \quad i = C, D$$

donde

$$A_{D,n} \equiv \frac{\|P_D T_{C,n} X_n - T_{C,n} X_n\|}{\|P_C T_{C,n} X_n - T_{C,n} X_n\|}, \quad A_{C,n} \equiv \frac{\|P_C X_n - X_n\|}{\|P_D X_n - X_n\|}$$

y

$$B_{D,n} \equiv \frac{\Re\langle P_C T_{C,n} X_n - T_{C,n} X_n, P_D T_{C,n} X_n - T_{C,n} X_n \rangle}{\|P_C T_{C,n} X_n - T_{C,n} X_n\|^2}, \quad B_{C,n} \equiv \frac{\Re\langle P_D X_n - X_n, P_C X_n - X_n \rangle}{\|P_D X_n - X_n\|^2}$$

donde $\Re\langle \cdot, \cdot \rangle$ se refiere a la parte real de $\langle \cdot, \cdot \rangle$.

3. ESTRATEGIA DE CONVERGENCIA

Hay situaciones prácticas en las que se requiere considerar más de dos conjuntos ($m > 2$) y abordarlas representa un reto importante (e.g., en el problema del diseño de filtros buscamos una solución en la intersección de muchos conjuntos no-convexos [5]). Para esas situaciones proponemos demostrar que la propiedad de reducción (ESD) se puede extender a casos más generales. Cuando más de dos conjuntos están involucrados, esto es posible gracias a la reformulación del problema en el espacio producto. De manera que, un enfoque alternativo para tratar con conjuntos no-convexos, y con $m > 2$, consistiría en aplicar el concepto de espacio producto al caso no-convexo (estrategia antes usada exclusivamente para el caso convexo, [4]).

4. EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

En esta sección, se realizará un experimento para hallar la proyección de un elemento x_0 dado, en la intersección de tres conjuntos con al menos uno de ellos no convexo.

Para nuestro experimento se utilizaron los siguientes cuatro algoritmos de proyección:

1. Algoritmo de proyecciones puras (MAP)
2. Algoritmo de proyecciones puras, según Pierra ([4])

$$X_{n+1} = P_D P_C X_n; \quad X_0 \in H \text{ arbitrario.}$$

3. Algoritmo de proyecciones relajadas, sobre los conjuntos C y D definidos por Pierra ([4]), donde λ_C y λ_D varían de iteración en iteración

$$X_{n+1} = T_D T_C X_n; \quad X_0 \in H \text{ arbitrario.}$$

4. Algoritmo de proyecciones generalizadas extendidas ([5]).

En este experimento mostramos como encontrar un elemento en la intersección de los conjuntos C_1 , C_2 y C_3 definidos respectivamente, como

$$C_1 = \{X \in \mathbb{R}^{n \times n} : X \in \mathcal{B} \wedge X \notin \mathcal{C}\} \text{ donde}$$

$$\mathcal{B} = \{X \in \mathbb{R}^{n \times n} : A \leq X \leq B \text{ para } A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}\} \text{ y}$$

$$\mathcal{C} = \{X \in \mathbb{R}^{n \times n} : E < X < F \text{ para } E, F \in \mathbb{R}^{n \times n}\} \text{ con } A \leq E < F \leq B.$$

$$C_2 = \{X \in \mathbb{R}^{n \times n} : X_{11} = X_{1n} = X_{n1} = X_{nn}\}.$$

$$C_3 = \{X \in \mathbb{R}^{n \times n} : X^T = X, \lambda_{\min}(X) \geq \epsilon > 0\} \cup \{X \in \mathbb{R}^{n \times n} : X^T = X, \delta_{\max}(X) \leq \tau < 0\}.$$

donde $\lambda_{\min}(X)$ representa al menor autovalor de X , ϵ es una constante positiva dada, $\delta_{\max}(X)$ representa al mayor autovalor de X y τ es una constante negativa dada.

El conjunto C_1 es una caja hueca de matrices, C_2 es el subespacio de las matrices cuyas entradas de las esquinas son iguales y C_3 es la unión de dos conos. Observemos que en este experimento, sólo C_2 es convexo.

Es fácil ver que las proyecciones P_{C_1} , P_{C_2} y P_{C_3} son las siguientes:

$$(P_{C_1}(X))_{ij} = \begin{cases} X_{ij} & \text{si} & A_{ij} \leq X_{ij} \leq E_{ij} \\ X_{ij} & \text{si} & F_{ij} \leq X_{ij} \leq B_{ij} \\ A_{ij} & \text{si} & X_{ij} < A_{ij} \\ B_{ij} & \text{si} & X_{ij} > B_{ij} \\ E_{ij} & \text{si} & E_{ij} < X_{ij} < F_{ij} & \text{y} & d(X_{ij}, E_{ij}) < d(X_{ij}, F_{ij}) \\ F_{ij} & \text{si} & E_{ij} < X_{ij} < F_{ij} & \text{y} & d(X_{ij}, F_{ij}) < d(X_{ij}, E_{ij}). \end{cases}$$

$$P_{C_2}X = \frac{1}{4}(X_{11} + X_{1n} + X_{n1} + X_{nn}), \quad P_{C_3}X = Z \text{diag}(d_i)Z^T,$$

donde

$$d_i = \begin{cases} \lambda_i(B), & \lambda_i(B) \geq \epsilon \\ \epsilon, & \lambda_i(B) < \epsilon \end{cases} \quad \text{o} \quad d_i = \begin{cases} \lambda_i(B), & \lambda_i(B) \leq \tau \\ \tau, & \lambda_i(B) > \tau \end{cases}$$

la matriz $B = \frac{(X+X^T)}{2}$ y la matriz Z es tal que $B = Z\Delta Z^T$ es una descomposición espectral; es decir, $Z^T Z = I$ y $\Delta = \text{diag}(\lambda_i(B))$.

Sea la caja hueca determinada por las matrices

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 3 & -6 \end{pmatrix}; \quad E = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 4 & -2 \end{pmatrix}; \quad F = \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 9 & 2 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 7 & 4 \\ 10 & 5 \end{pmatrix}$$

y sea $X_0 = \begin{pmatrix} -1 & -2 \\ 5 & 4 \end{pmatrix}$ una matriz arbitraria.

El Cuadro (1) muestra los resultados correspondientes a este experimento y podemos señalar que, tanto el algoritmo (1) como el algoritmo (2), cumplen con la propiedad de la reducción del error, sin embargo, ambos algoritmos llegan a un punto de **entrampamiento**. De manera que, la propuesta de Pierra, nuevamente falla en la convergencia a una solución factible. Por el contrario, los algoritmos (3) y (4) sí logran satisfacer la tolerancia, gracias al empleo de las proyecciones relajadas.

También podemos observar, que el algoritmo (4) utilizó aproximadamente un 23 % más iteraciones que las empleadas por el algoritmo (3), donde se comprueba, en este ejemplo, que el algoritmo (3) es más eficiente que el algoritmo (4).

Cuadro 1: Resultados del Experimento

(1) Algoritmo $X_{n+1} = P_1 P_2 P_3 X_n$		(2) Algoritmo $X_{n+1} = P_D P_C X_n$		(3) Algoritmo $X_{n+1} = T_D T_C X_n$		(4) Algoritmo $X_{n+1} = T_D T_C X_n$	
IT	$J(X_n)$	IT	$J(X_n)$	IT	$J(X_n)$	IT	$J(X_n)$
1	13.25963	1	4.59552	1	4.59552	1	4.59552
2	2.02664	2	1.23568	2	3.02717	2	3.42143
3	1.61673	5	0.55462	3	2.06275	3	3.11135
5	1.44191	10	0.38157	9	0.33437	19	0.13752
10	1.40823	20	0.34330	18	0.27695	39	0.04808
13	1.40743	50	0.33723	34	0.23826	64	0.01524
16	1.40733	75	0.33715	53	0.11829	99	0.00308
19	1.40731	85	0.33714	85	0.00363	132	0.00068
80	1.40731	190	0.33714	130	0.00037	168	0.00013
800	1.40731	800	0.33714	186	0.00000	240	0.00000

5. CONCLUSIÓN

- El MAP y la estrategia propuesta por Pierra [4], para lograr salir de los puntos de entram-pamiento no funcionó, de modo que, estos métodos no garantizan la solución del problema.
- Si al método propuesto por Pierra, le aplicamos el algoritmo de proyecciones relajadas, siempre logramos llegar a la solución factible, de modo que no sólo resolvimos el problema referido, sino que también encontramos una versión mejorada del algoritmo propuesto por Pierra, y que mostró, en la práctica, una mayor eficiencia computacional.

REFERENCIAS

- [1] VON NEUMANN, J., Functional Operators, vol. II. *The geometry of orthogonal spaces*. Annals of Math. Studies, 22, 1950. Princeton University Press. This is a reprint of mineographed lecture notes first distributed in 1933.
- [2] GUBIN, L., POLYAK, B., & RAIK, E., *The method of projections for finding the common point in convex sets*. USSR Comput. Math. Phys, 7(6), 1-24, 1967.
- [3] LEVI, A., *Image Restoration by the Method of Projections with Applications to the Phase and Magnitud Retrieval Problems*. Ph.D thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Dept. of ECSE, Troy, NY, Dec. 1983.
- [4] PIERRA, G., *Decomposition through formalization in a product space*. Math Programming, 28, 96-115, 1984.
- [5] STARK, H., & YANG, Y., *Vector Space Projections: A Numerical Approach to Signal and Image Processing, Neural Nets and optics*. John Wiley and Sons, New York, 1998.

SIMULADOR BASADO EN AGENTES DEL COMPORTAMIENTO DE CONDUCTORES EN ESTACIONAMIENTOS PARA VEHÍCULOS AUTOMOTORES

José Figueroa

Giancarlo Colmenares

Ángel Gil

jfiguero@unet.edu.ve

gcolmen@unet.edu.ve

agil@unet.edu.ve

Laboratorio de Prototipos, Universidad Nacional Experimental Del Táchira

Av. Universidad, Sector Paramillo, San Cristóbal-Venezuela

Resumen. La simulación como técnica permite visualizar el comportamiento de los sistemas sin los inconvenientes que conlleva su implantación en la realidad, por lo que es fundamental durante el proceso de optimización y diseño de los mismos. Los estacionamientos son sistemas donde intervienen múltiples variables, que de ser consideradas durante su diseño, pueden brindar mejores espacios, con menos congestión vehicular y mejor aprovechamiento del entorno. La presente investigación dio como resultado la construcción de un simulador de estacionamientos, el cual permite visualizar el comportamiento del tráfico dentro del mismo, tomando en cuenta distintas distribuciones y diferentes tipos de conductores. Los conductores fueron representados implementando agentes reactivos, los cuales tienen como propósito en el sistema, localizar y ocupar un puesto de estacionamiento, permanecer un tiempo, y luego buscar salir del mismo; el comportamiento de estos agentes se basó en la filosofía de “búsqueda en línea”, siendo esta la mejor opción, debido a que no se conoce a priori la ubicación de todos los puestos de estacionamiento, ni el nivel de interés que tienen los conductores en aquellos. El simulador desarrollado cuenta con un módulo de diseño de estacionamiento, un módulo que permite observar el comportamiento de los conductores, cada uno con creencias y preferencias distintas, y un módulo que permite obtener determinadas estadísticas con el objeto de ayudar al proceso de diseño de estacionamientos. El simulador se validó utilizando data de estacionamientos reales. El modelado de los agentes se realizó bajo la metodología MASINA y la aplicación se desarrolló usando el lenguaje de programación JAVA.

Palabras claves: Simulación, agentes, estacionamientos, reactivo, MASINA

1. INTRODUCCIÓN

El ser humano siempre ha buscado la manera de mejorar su calidad de vida mediante ajustes al ambiente en donde se desenvuelve, para que dichos ajustes sean posibles es necesario tener un conocimiento profundo del sistema, cuestión que sólo se logra con el estudio y observación del mismo. La simulación es una de las mejores alternativas para el análisis de un sistema: “Nos permite recopilar información pertinente acerca del comportamiento del sistema al paso del tiempo, no es una técnica de optimización, más bien se utiliza para estimar las mediciones de desempeño en un sistema modelado”[2]. Así, su aplicación es hoy en día muy utilizada en casi todas las áreas que involucran procesos en los que existen cambios constantes, en este caso se utiliza para el estudio de lugares destinados al aparcamiento de vehículos automotores.

Con esto en mente, se describe el desarrollo de una herramienta que permite realizar simulaciones de un entorno de estacionamiento y de esta manera proporcionar una visión más exacta al diseñador del espacio sobre cómo se comportaría el mismo en la vida real; el simulador implementa agentes inteligentes para permitir observar el comportamiento de los conductores con el fin de que los resultados estén lo más cercano posible a lo que en realidad ocurre.

2. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

Se desarrolló un simulador que permite que un agente conductor reconozca y clasifique los puestos de estacionamientos según sus criterios propios dentro de un plano diseñado previamente con la herramienta, el simulador se encuentra formado por tres componentes: módulo del simulador, módulo de cálculo estadístico y el agente conductor propiamente dicho.

2.1 Arquitectura simulador

Se construyó el simulador de acuerdo a la arquitectura de software que se muestra en la Figura 1, en donde se observa la interacción de sus componentes: el plano, el sistema monitor y los agentes conductores.

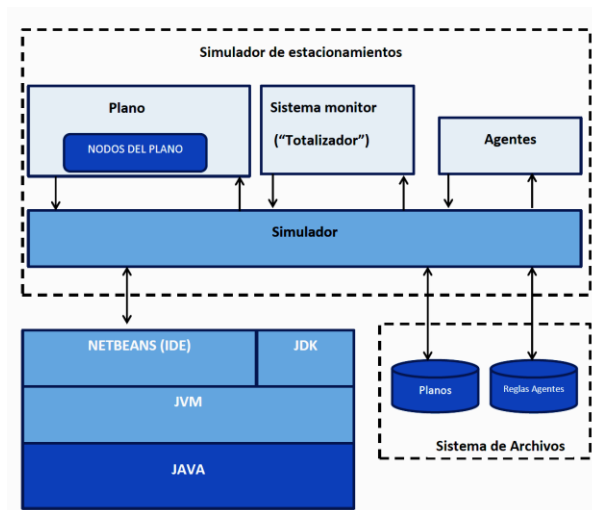


Figura 1 – Arquitectura del simulador

2.2 Control de tiempo de la simulación:

Para determinar en qué medida el reloj del simulador se incrementaría, se tomanon en cuenta estas premisas:

- El tiempo debe aumentar en forma continua, segundo a segundo, para que sea posible visualizar el movimiento que un automóvil realiza dentro del plano creado.
- Cada ciclo de computador es equivalente a un segundo del tiempo real.
- El recorrido de un automóvil dentro de un estacionamiento debe ser en segundos para mayor precisión.

2.3 Aspectos funcionales de la simulación.

- Cada vez que transcurra el intervalo de tiempo en minutos se genera la cantidad de vehículos que entrarán al sistema, dependiendo de la distribución probabilística elegida siguiendo la filosofía de eventos discretos.
- Cada vehículo al ser generado dispone de un tiempo en el cual debe ser activado y así comenzar con sus funciones en la simulación; con eso se valida que dos vehículos no tengan la misma posición espacial dentro del plano.

2.4 Entorno del simulador.

El entorno representa la zona en la que los agentes conductores se desenvolverán, éste constará de una serie de nodos según la filosofía de otros simuladores, como es el caso de Galatea (desarrollado por la Universidad de los Andes, Venezuela), donde las simulaciones son estructuradas en nodos según arquitecturas de otros simuladores desarrollados a nivel nacional [1] y cada nodo consta de sus respectivas funciones y características. Los nodos que fueron implementados son: Carretera, entrada, salida, destino, puesto, puesto de vigilancia, lugar de parada, obstáculo y ruta.

2.5 Objeto Simulador

-El objeto simulador se encarga de la gestión de la simulación y el ambiente, así como también de verificar que se cumplan los requisitos en el entorno para poder concluir con éxito la simulación.

Consta de 2 partes: el plano creado por el usuario, que es donde el agente conductor interactúa y el controlador de la simulación propiamente dicho que permite la generación de agentes, control de tiempo entre otros.

2.6 Objeto Totalizador

Objeto que se activa una vez iniciada una simulación, su labor es procesar los datos generados por los agentes conductores durante su estadía en el sistema para mostrarle al usuario

un resumen del comportamiento general del estacionamiento, referente a los datos estadísticos que toda simulación genera promedio de permanencia, cantidad de agentes generados, cantidad de agentes atendidos.

2.7 Agente Conductor

Es un agente reactivo con memoria de lugares que ha visitado, tiene cuatro estados: Buscando puesto: es el estado que va desde que el agente conductor entra al sistema hasta que consigue un puesto que le es satisfactorio y lo ocupa.

Saliendo: el cual comprende desde que deja de ocupar un puesto hasta que consigue un nodo de salida y sale del sistema.

Estacionando: indica que el agente conductor se encuentra haciendo la maniobra de estacionarse.

Estacionado: en donde el agente descuenta el tiempo necesario para desocupar el puesto y salir del lugar.

En la figura 2 se ilustra el diagrama de estados del agente. Este agente sólo percibe los puestos de estacionamiento cercanos a su posición y, de acuerdo a las características particulares de cada puesto, calcula el valor de su interés en él.

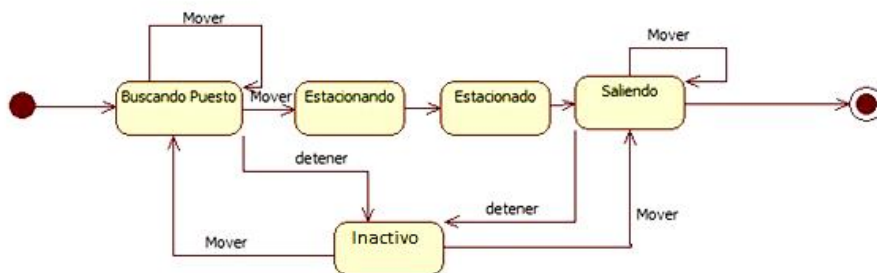


Figura 2 - Arquitectura del simulador

El comportamiento del agente se muestra en la figura 3 mediante un diagrama de actividades, dicho comportamiento se basa en la filosofía búsqueda en línea [3] la cual es ampliamente usada cuando no se conoce desde un principio la totalidad del entorno sino por el contrario solo es observable una pequeña porción del mismo.

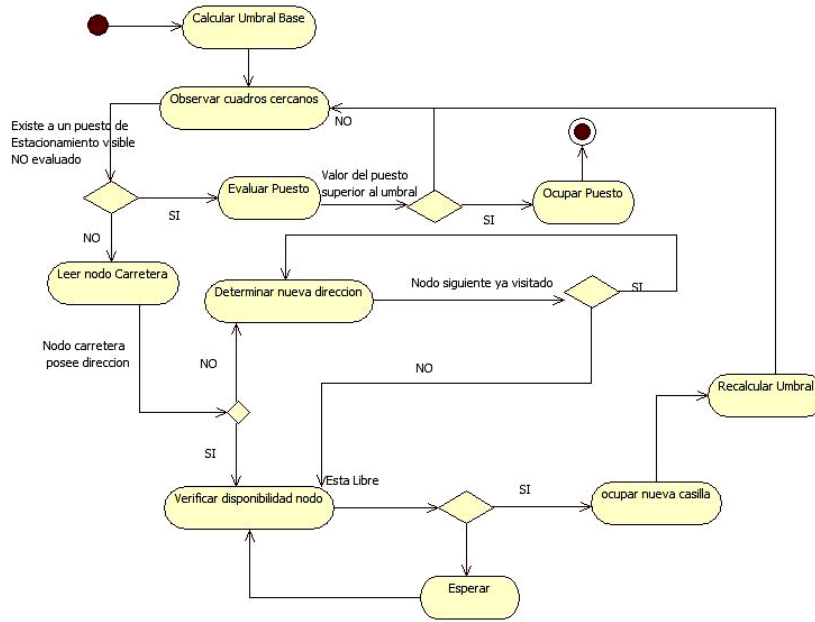


Figura 3- Diagrama de actividades agente conductor.

El cálculo del valor de un puesto dentro del estacionamiento y el umbral de selección de los mismos se hace con base en la fórmula del valor de un agente que se puede expresar como en la Ec. 1.

$$V(x_1, \dots, x_n) = \sum_i^n V_i(x_i) \tag{1}$$

3. PRUEBAS DEL SIMULADOR

Para comprobar el funcionamiento del simulador en un estacionamiento real, se realizó una simulación utilizando los valores del estacionamiento, en donde se determinó el contraste entre el valor de ocupación real versus el valor de ocupación simulado, el valor de ocupación se calcula con la Ec. 2.

$$valor\ ocupacion = \frac{Cantidad\ de\ veces\ ocupado * 100}{Cantidad\ de\ observaciones} \tag{2}$$

Una vez calculados estos valores para cada uno de los puestos tanto de manera real como usando el simulador se procede a realizar una comparación de los mismos (Figura 4).

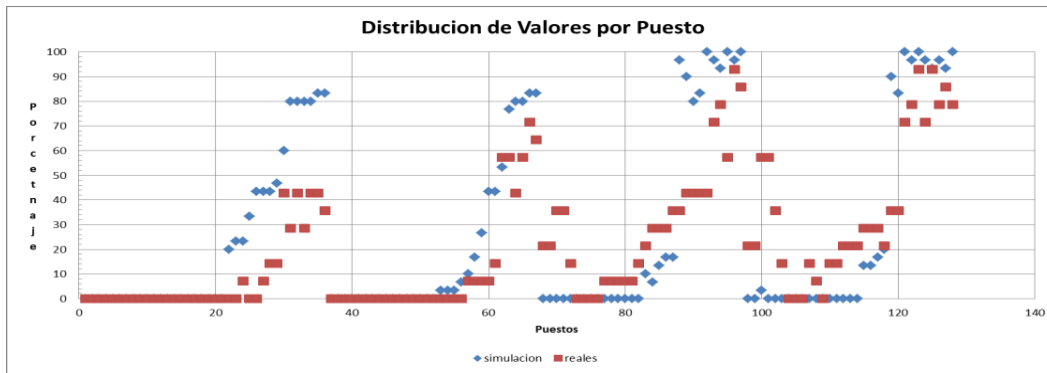


Figura 4- Valores de porcentajes de ocupación por cada puesto para la simulación y por observación directa en rango de tiempo 8:00 am a 8:15 am

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un simulador que permite que el diseño de un plano configurable y editable, así como también se destaca el uso de conceptos de modelado de datos para poder estructurar la información de conductores y puestos, pudiéndose así crear los tipos de agentes, zona de puestos y puestos; finalmente por esas razones los agentes basados en búsquedas *online* se adaptaron muy bien a este tipo de situaciones. La toma de decisiones del agente conductor se basó en los resultados del procesamiento de encuestas realizadas.

La validación de resultados se realizó comparando 3 factores: cantidad de entradas, cantidad de salidas y porcentaje de ocupación de los puestos de estacionamiento los dos primeros por ser factores clave en la validación de una simulación y el tercero por ser utilizado para medir el interés de los conductores en los puestos de estacionamiento, dichos valores son obtenidos por la simulación y contrastados por observaciones de campo; el resultado de las pruebas: generación de entradas, generación de salidas y ocupación de puestos, permite inferir que el simulador arroja salidas bastante similares a lo que un estacionamiento en la vida real generaría; lo que ayudaría a un diseñador a ver como los conductores se adaptarían a la configuración planteada ayudando así a la toma de decisiones.

Las pruebas realizadas con los datos obtenidos de los puestos del estacionamiento mostraron que el simulador se adapta cerca de un 85% a las variables de ocupación de los puestos de estacionamientos reales

REFERENCIAS

- [1]. Taha, H., *Investigación de Operaciones*. Pearson Education, 2004.
- [2]. Davila, J., Tucci, K., & Uzcategui, M., *Simulación multiagente con Galatea*. ULA, 2004.
- [3]. Russel S., & Norving P., *Inteligencia Artificial un Enfoque Moderno*. Pearson - Prentice Hall, segunda edición, 2004.

REDUCING COMPUTATIONAL EFFORT IN BOUNDARY ELEMENT ENGINEERING ANALYSIS

L. Valencia

M. Cerrolaza

F. Nieto

liseth.valencia@inabio.edu.ve

miguel.cerrolaza@inabio.edu.ve

Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas-Venezuela.

Abstract. *Successful analytical integration strategies, based on symbolic manipulation and Computer Algebra System (CAS), to obtain closed forms for the stiffness matrices in the Finite Element Method have been used in this work. Some of these approaches are used to analytically integrate the singular and nearly-singular integrals appearing in the Boundary Element Method (BEM). The main goal of this work is to reduce the computational effort employed in BEM analysis thus leading to a better efficiency of the method, especially when dealing with CAD tasks.*

Keywords: Analytical integration, Boundary Element Method, Symbolic manipulation.

1. INTRODUCTION

When using numerical integration, the user must define large orders of Gaussian quadratures to get reasonable results. This involves large CPU times. In a practical engineering non-linear problem, discretized with thousands of boundary elements, the need to reduce CPU time becomes relevant.

Many researchers have devoted time and effort to obtain analytical or semi-analytical expressions to compute BEM integrals. Recently, Ghadimi et. al. [1] presented the analytical integration for constant and linear elements to solve the Poisson's equation. Salvadori and Temponi [2] focused on the BEM 3D integral equations, providing closed forms for the Lebesgue integrals. Niu et. al. [3] used semi-analytical integration for nearly-singular integrals. Also, Huanlin et. al. [4] considered the anisotropic situation in BEM potential problems, and developed closed integrals to treat the boundary layer effect.

2. CLASICAL BEM

The fundamental solution for displacements in two dimensional domains is

$$u_{ij}^*(P, Q) = \frac{1}{8\pi E(1-\nu)} \left[(3-4\nu) \ln(r^{-1}) \delta_{ij} + r_i r_j \right] \quad (1)$$

while the fundamental solution for stresses is

$$t_{ij}^*(P, Q) = -\frac{1}{4\pi(1-\nu)r} \left[((1-2\nu)\delta_{ij} + 2r_i r_j) r_n - (1-2\nu)(r_j n_i - r_i n_j) \right] \quad (2)$$

where E is the Young modulus, the Poisson ratio, r is the distance between the source point and the field point and r_i , r_j are spatial derivatives of r . n_i are the components of the normal vector.

In many BEM applications, to calculate these integrals it is very common to use numerical integration techniques. But, unfortunately, these techniques are expensive and do not provide enough accuracy in the presence of singular or nearly-singular kernels.

The element considered is a three-node element with three quadratic interpolation functions $F(n)$ given by

$$F^{(1)} = -\frac{\xi}{2}(1-\xi); \quad F^{(2)} = 1-\xi^2; \quad F^{(3)} = \frac{\xi}{2}(1+\xi) \quad (3)$$

where ξ is the spatial coordinate in the Gaussian domain. The evaluation of the terms requires the Jacobian J , since the coordinate system is now the non-dimensional system of coordinates.

We can write The Somigliana's identity as

$$C_{ij} u_j = \sum_{e=1}^n U_{ij}^e u_j^e + \sum_{e=1}^n T_{ij}^e t_j^e \quad (4)$$

being

$$U_{ij}^e = \int_{-1}^1 [T^e [F^e] J] d\xi; \quad T_{ij}^e = \int_{-1}^1 [U^e [F^e] J] d\xi \quad (5)$$

Note that matrices U^e and T^e are of order 2×6 . This involves the computation of 24 integrals, which is a very low and inefficient process when numerical integration is employed.

3. SYMBOLIC MANIPULATION

In this work, straight-quadratic boundary elements were used to model both geometry and boundary conditions. Thus, the interpolation can be simplified as

$$x_2 = \frac{x_1 + x_3}{2}; \quad y_2 = \frac{y_1 + y_3}{2} \quad (6)$$

where (x_1, y_1) , (x_2, y_2) and (x_3, y_3) are the Cartesian coordinates of the first, mid-side and end node of the element respectively. Now, by mapping x and y into ξ , the coordinates are written as

$$x(\xi) = \frac{1}{2}(x_3 - x_1)\xi + \frac{1}{2}(x_3 + x_1); \quad y(\xi) = \frac{1}{2}(y_3 - y_1)\xi + \frac{1}{2}(y_3 + y_1) \quad (7)$$

Differentiation of Eq. (7) leads to

$$DX = \frac{\partial x(\xi)}{\partial \xi} = \frac{1}{2}(x_3 - x_1); \quad DY = \frac{\partial y(\xi)}{\partial \xi} = \frac{1}{2}(y_3 - y_1) \quad (8)$$

Assuming that the source point is P and that ξ is the integration point, the radius vector between them is written as $r(P, \xi)$

$$r = \sqrt{(x - x(\xi))^2 + (y - y(\xi))^2} = \sqrt{A\xi^2 + B\xi + C} \quad (9)$$

where (x, y) are the Cartesian coordinates of source point P. Substituting expressions (7) it follows that

$$A = \left(\frac{1}{2}x_1 - \frac{1}{2}x_3\right)^2 + \left(\frac{1}{2}y_1 - \frac{1}{2}y_3\right)^2; \quad B = (2x - x_1 - x_3)(x_1 - x_3) + (2y - y_1 - y_3)(y_1 - y_3); \quad (10)$$

$$C = \left(x - \frac{1}{2}x_1 - \frac{1}{2}x_3\right)^2 + \left(y - \frac{1}{2}y_1 - \frac{1}{2}y_3\right)^2$$

and D1 and D2 are given by

$$D1 = -x + \frac{1}{2}(x_1 + x_3); \quad D2 = -y + \frac{1}{2}(y_1 + y_3) \quad (11)$$

4. INTEGRAL EQUATIONS REPRESENTATION

The substitution of the above expressions into the fundamental solutions (see Eq. (1) and (2)) yields the following equations:

$$u_{11}^*(\xi) = \frac{1}{8\pi E(1-\nu)} \left[(4\nu - 3) \ln(\sqrt{A\xi^2 + B\xi + C}) + \left(\frac{DX\xi + D1}{\sqrt{A\xi^2 + B\xi + C}} \right)^2 \right];$$

$$u_{12}^*(\xi) = \frac{1}{8\pi E(1-\nu)} \left[\frac{(DX\xi + D1)(DY\xi + D2)}{A\xi^2 + B\xi + C} \right]; \quad u_{21}^*(\xi) = u_{12}^*(\xi); \quad (12)$$

$$u_{22}^*(\xi) = \frac{1}{8\pi E(1-\nu)} \left[(4\nu - 3) \ln(\sqrt{A\xi^2 + B\xi + C}) + \left(\frac{DY\xi + D2}{\sqrt{A\xi^2 + B\xi + C}} \right)^2 \right]$$

and for the stresses fields

$$t_{21}^*(\xi) = -\frac{1}{4\pi(1-\nu)(A\xi^2 + B\xi + C)\sqrt{D}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{A\xi^2 + B\xi + C} (Dy\xi + D2)(Dx\xi + D1) \\ \times ((Dy\xi + D2)Dx - (Dx\xi + D1)Dy) \\ + (1-2\nu)((Dx\xi + D1)Dx - (Dy\xi + D2)Dy) \end{array} \right\};$$

$$t_{22}^*(\xi) = -\frac{(DY^*\xi + D2)DX - (DX^*\xi + D1)DY}{4\pi(1-\nu)(A\xi^2 + B\xi + C)\sqrt{D}} \left[(1-2\nu) + 2 \left(\frac{DY^*\xi + D2}{\sqrt{A\xi^2 + B\xi + C}} \right)^2 \right]$$

(13)

$$t_{11}^*(\xi) = -\frac{(DY\xi + D2)DX - (DX\xi + D1)DY}{4\pi(1-\nu)(A\xi^2 + B\xi + C)\sqrt{D}} \left[(1-2\nu) + 2 \left(\frac{DX\xi + D1}{\sqrt{A\xi^2 + B\xi + C}} \right)^2 \right];$$

$$t_{12}^*(\xi) = -\frac{1}{4\pi(1-\nu)(A\xi^2 + B\xi + C)\sqrt{D}} \left\{ \begin{aligned} &\frac{2}{A\xi^2 + B\xi + C} (DX\xi + D1)(DY\xi + D2) \\ &\times ((DY\xi + D2)DX - (DX\xi + D1)DY) \\ &+ (1-2\nu)((DY\xi + D2)DY - (DX\xi + D1)DX) \end{aligned} \right\};$$

5. POSTPROCESSING OF THE SYMBOLIC FORMULAE

CAS software was asked to generate Fortran routines. A large postprocessing step of the Fortran computer sentences were carried out. Also, further analysis was necessary to modify logarithmic expressions, where negative arguments can appear. After the postprocessing of Fortran sentences and routines, the size of routines was significantly reduced thus leading to a substantial CPU time reduction.

A classical standard norm was used to estimate the error

$$\|e\| = \sqrt{\sum_{i,j} (A_{ij}^n - A_{ij}^a)^2} / \sum_{i,j} |A_{ij}^n|$$

where A_{ij}^n and A_{ij}^a are the 12 terms of the coefficients matrix, calculated numerically and analytically. Numerical integration was done using standard Gaussian quadrature for the regular part and logarithmic quadrature for the non-regular part. Figure 1(a) displays a source point that approaches a boundary element. The starting location of the source point is at a distance $3*L$ from the element, while the closest location is at $L/1000$, being L the element length.

The errors in the coefficients of the stresses matrix are shown in Table 1. Note that errors around 13% arise when using a low Gaussian order ($Ngp=8$) and the source point is not very close to the element ($r=L/20$). By increasing the quadrature order up to fifty Gauss points ($Ngp=50$), the error becomes rather small, even when the source point is close to the element.

The situation worsens sharply when the source point is very close to the element. In these cases, the numerical quadrature is practically unable to reach a reasonable value, since the very high gradients of the nearly-singular integral strongly affect the numerical computations.

Table 1. Errors (%) in numerical evaluation of stresses matrices

r	Ngp=8	Ngp=20	Ngp=50
3L	0.00000	0.00000	0.00000
2L	0.00000	0.00000	0.00000
L	0.00000	0.00000	0.00000
L/2	0.00040	0.00000	0.00000
L/10	4.11670	0.04050	0.00000
L/20	13.8493	1.78340	0.00420
L/100	27.9283	22.4817	10.1807
L/500	38.2596	28.6780	27.7535

L/1000	45.0051	36.4540	28.6825
--------	---------	---------	---------

The cantilever beam of fig. 1(b) is used to test the speed of the analytical integration as compared to numerical integration. The beam was analyzed with several discretizations, ranging from 400 to 2000 quadratic elements. Also, 50 internal points were defined inside the domain where the displacement and stress tensors were computed both numerically and analytically.

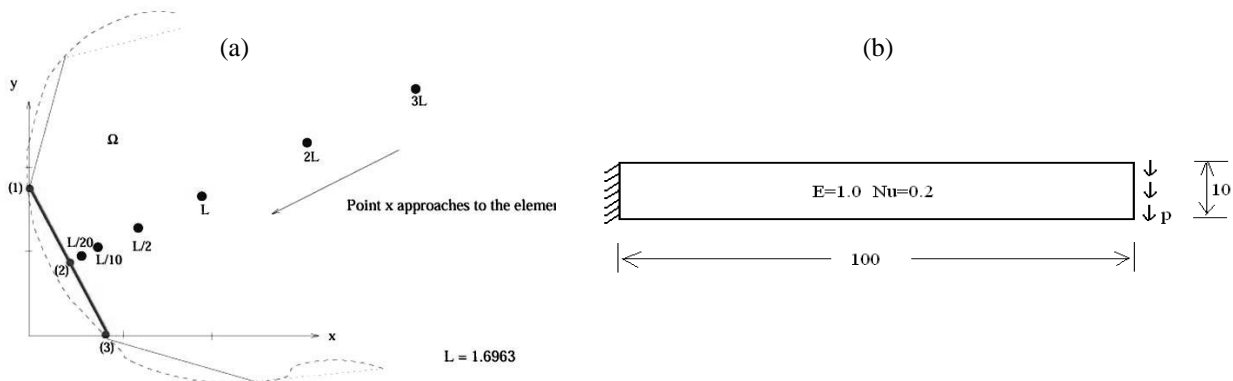


Figure 1- (a) Source point approaches boundary element (b) Cantilever beam: 50 internal points

Several meshes were analyzed by using numerical integration with different orders of numerical integration (N_{gp}=8, 20 and 50). The number of Gauss points was the same for all the elements.

The comparison of CPU times between numerical and analytical integrations is reported in Table 2. The values in the table represent the ratio between the CPU time (sec) required for numerical integration to the CPU time (sec) required for analytic integration $T_n = N_{gp}/T_a$ (T_n =time for numerical integration, N_{gp} =number of Gauss points, T_a =time for analytic integration).

Table 2. Ratios between numerical and analytical CPU times for elements integration (analytical CPU times are also displayed)

Elements	$T_{n=8}/T_a$	$T_{n=20}/T_a$	$T_{n=50}/T_a$	T_a (sec)
400	1.77	4.28	10.44	0.281
600	1.80	4.32	10.55	0.624
800	1.72	4.14	10.16	1.154
1000	1.74	4.19	10.30	1.778
1500	1.68	4.06	9.92	4.149
2000	1.70	4.09	10.02	7.301

All the tests were done in an Intel Core2-Quad CPU running at 2.40 GHz. The software was written using Fortran 90 and compiled with Intel Fortran Compiler. When the number of Gauss points of the numerical integration increases the benefits of analytical integration become more and more evident.

The Table 3 collects the CPU times required to compute the three steps of the analysis: integration of the coefficient matrices, solution of the equation's system and internal-point calculation. The solution of the system of equations was obtained using an iterative method.

Table 3. CPU times comparison for the analysis process: integration, system solution and internal point calculation (sec)

		System generation		System solution	Internal disp. and stress (50 points)		Total time		Ratio
Elem	DOF	Numer.	Analyt.	Iterat.	Numer.	Analyt.	TTn	TTa	TTn/TTa
400	1600	1.181	0.281	0.641	0.373	0.049	2.195	0.971	2.26
600	2400	2.672	0.624	2.449	0.905	0.092	6.026	3.165	1.90
800	3200	4.750	1.154	6.238	1.433	0.190	12.42	7.582	1.64
1000	4000	7.424	1.778	13.62	2.867	0.311	23.92	15.71	1.52

As it can be seen, the analytical integration is much more efficient than numerical integration, both in the generation of the global coefficient matrix and when computing the displacements and stresses tensors at internal points.

6. CONCLUDING REMARKS

Accuracy was satisfactorily evaluated, giving very good results even when the source point P is very close to the element.

The obtained results were satisfactory: analytical-integration times were around 70% less expensive than the numerical-integration times when using an 8-Gauss-points quadrature order. Using a 20-Gauss-points quadrature order the results were even more significant, being the numerical integration four times more expensive than the analytical one.

The extension of this methodology for three dimensional applications is being done. It should be remarked that 3D integration is much more time consuming than 2D is.

REFERENCES

- [1] Ghadimi P., Dashtimanesh A., Hosseinzadeh H. (2010), "Solution of Poisson's equation by analytical boundary element integration", *App. Math. Comp.*, **217**:152-163.
- [2] Salvadori A., Temponi A. (2010), "Analytical integrations for the approximation of 3D hyperbolic scalar boundary integral equations", *Eng. Anal. Bound. Elem.*, **34**:977-994.
- [3] Niu Z., Wendland W.L., Wang X., Zhou H. (2005), "A semi-analytical algorithm for the evaluation of the nearly singular integrals in three-dimensional boundary element methods", *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, **194**:1057-1074.
- [4] Huanlin Z., Zhongrong N., Changzheng C., Zhongwei G. (2008), "Analytical integral algorithm applied to boundary layer effect and thin body effect in BEM for anisotropic potential problems", *Comp & Struct*, **86(15,16)**:1656-1671.

NUMERICAL MODELING OF A COMPLIANT BASED POSITIONING STAGE

Giedrius Augustinavicius

giedrius.augustinavicius@dok.vgtu.lt

Department of Mechanical Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, J.

Basanaviciaus str. 28, Vilnius, Lithuania

Audrius Cereska

audrius.cereska@vgtu.lt

Department of Mechanical Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, J.

Basanaviciaus str. 28, Vilnius, Lithuania

Abstract. *This paper proposes a novel compliant based planar precise positioning stage on the rotational platform for calibration of the rotary encoder's raster scales. The monolithic structure is featured with flexure-based joints and two piezostack actuators. The monolithic structure for required motion were designed and optimized then their performances have been evaluated by numerical approach using Matlab/Simulink software package.*

Keywords: flexure hinge, compliant mechanism, precise positioning

1. INTRODUCTION

Positioning with nanometer level resolution and accuracy is critically important for many modern technologies, especially in the fields of micro and nanotechnology. Various precise positioning stages were developed using conventional technologies based on servomotors, ball screws and rigid linkages. However, these conventional technologies encounter problems such as friction, wear, backlash and lubrication, which struggle to achieve high positioning accuracy. Precise positioning systems using piezoelectric actuator (PEA) have a very wide range of applications including ultra-precision machine tools, scanning probe microscope, micro/nano manufacturing, X-ray lithography and optical fiber alignment system. Some of practical precision positioning systems utilize flexure-based structures, such as compliant mechanisms and notch-flexure-based mechanisms. Precise positioning stages utilizing the flexure hinge mechanism can have many advantages: negligible backlash and stick-slip friction; smooth and continuous displacement; adequate for magnifying the output displacement of actuation; and inherently infinite resolution. A monolithic structure is required to eliminate assembly errors. Symmetric

structure can reduce effect of thermal strain error. The principle aim is to achieve low stiffness in the direction of the required motion and high stiffness in all other directions without introducing undue stress and friction. There have been a few modeling studies for the analysis and design of the monolithic flexure hinge mechanisms: Hwang [1], Augustinavicius [2], Huang [3], Tang [4], Zhang [5], Lobontiu [6].

This paper proposes a novel compliant based planar precise positioning stage on the rotational platform for calibration of the rotary encoder's raster scales. The monolithic structure is featured with flexure-based joints and two piezostack actuators. The monolithic structure for required motion were designed and optimized then their performances have been evaluated by numerical approach using Matlab/Simulink software package.

2. STRUCTURE OF THE STAGE

A compliant based precise positioning stage Fig. 1 consists of two (PEA) actuators and a monolithic flexure hinge mechanism. Two (PEA) actuators, named PICMA P-887 and produced by Physik Instrumente (PI) GmbH & Co, were adopted to drive *XY* stage and possess maximal stroke of $38\mu\text{m}$. Each *X* and *Y* stage consists of an amplifying mechanism of motion and a guide mechanism of motion. The *Y* stage has the same structure except that it is inside the *X* stage. *X* and *Y* motion is decoupled. Generally, a decoupled stage implies that one actuator produces only one directional output motion without affecting the motions in other axes. The major objective for the design of a stage with decoupled output motion is to eliminate the cross-axis coupling errors between the *X* and *Y* directional translations and parasitic rotation errors around the axes. The motion amplification mechanism that is proposed in this system has a merit. Its symmetric lever mechanism structure makes the stage robust to heat.

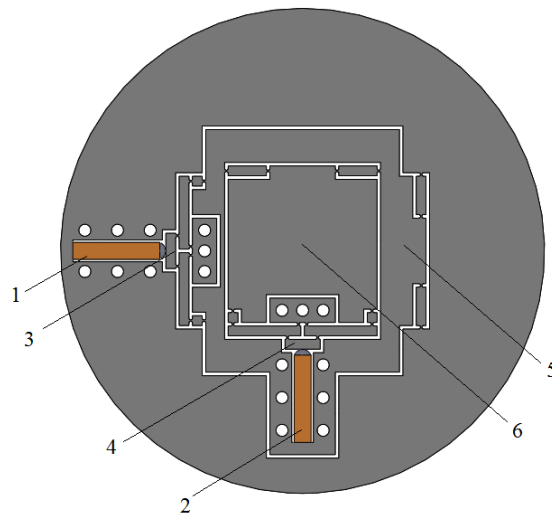


Figure 1 - Dual axis precise positioning stage: 1, 2 – piezostack actuators; 3, 4 – amplifying mechanisms of motion; 5, 6 – guide mechanisms of motion.

3. MODELING OF THE STAGE

The positioning of specimens or equipment to very high accuracies often involves feedback and sometimes requires the use of fine servo controls. Their speed of response will be limited by

the natural frequencies of the flexure. The sensitivity of a mechanism to vibration also tends to be dependent on its natural frequencies. Flexure mechanisms are inherently spring-mass systems and so it is particularly important to characterize their general dynamic behavior, Smith [7], Augustaitis [8].

3.1 Analytical modeling

Let's suppose that the piezostack actuator actuates the stage by input displacement $\eta_1 = \eta_1(t)$ that is known function of time. By replacing each flexure hinge with a revolute and translation joint with a linear and torsion spring while considering the remainder elements as rigid bodies, the dynamic model of the dual axis precise positioning stage is established as shown in Fig. 2a.

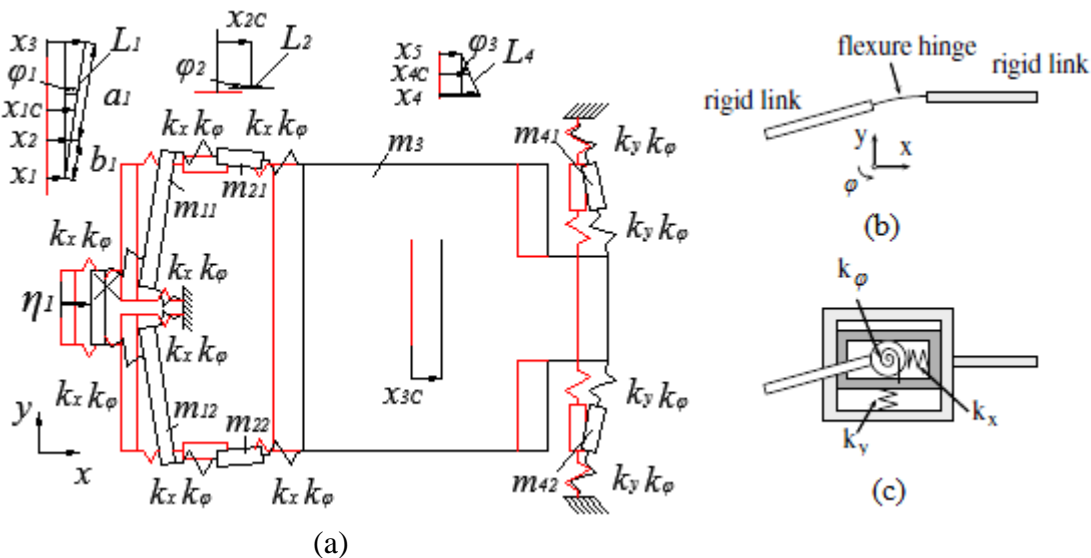


Figure 2 – The dynamic model of a dual axis precise positioning stage: (a) structure scheme of the mechanism; (b) degrees of freedom of one flexure end with respect to the other end (x, y , translation; ϕ , rotation); (c) spring-based model highlighting the three DOFs.

Circular single-axis flexure hinge, enables two-dimensional (plane) relative motion of one rigid link with respect to another about three DOFs. As indicated in Fig 2b, two translations about the x and y axes and one rotation about the sensitive axis of the hinge are generally possible. Each of these motions possesses the characteristics of a spring, and each corresponding stiffness plays a role in the overall deformation of the flexure. A model of the single-axis flexure hinge that captures the spring response corresponding to the three DOFs is represented in Fig. 2c. The spring rates of the hinge k_x, k_y, k_ϕ and the viscous damping coefficients c_x, c_y, c_ϕ have been calculated by Lobontiu [6] equations for a single-axis flexure hinge and presented in Table 1.

Table 1. Stiffness and viscous damping coefficients

$k_x, N/m$	$k_y, N/m$	$k_\phi, Nm/rad$	$c_x, Ns/m$	$c_y, Ns/m$	$c_\phi, Ns/rad$
7,88e+7	6,26e-7	1,15	0,58	0,89	0,011

During the movement, the bodies translates by coordinates x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 and the centers of masses translates by coordinates $x_{1C}, x_{2C}, x_{3C}, x_{4C}$ and rotates by small angles φ_1 and φ_3 . The bodies length are, L_1, L_4 and the lever length - a_1, b_1 . The multi body system is divided into seven solid bodies and their masses are $m_{11} = m_{12} = m_1; m_{21} = m_{22} = m_2; m_{41} = m_{42} = m_4; m_3$ and its moments of inertia are I_{1C} and I_{4C} . The values of the parameters of the dynamic model are presented in the Table 2 and the Table 3:

Table 2. Geometrical parameters

L_1, m	L_4, m	a_1, m	b_1, m
0,027	0,016	0,0225	0,0045

Table 3. Masses and moments of inertia

m_1, kg	m_2, kg	m_3, kg	m_4, kg	I_{1C}, kgm^2	I_{4C}, kgm^2
16,7e-6	22,5e-7	45,1e-5	88,5e-7	1,26e-7	1,83e-8

The dynamics of flexure-based compliant mechanisms will be approached by means of Lagrange's equations formulated based on the scalar quantities of kinetic energy, potential energy, and dissipation energy. In its general form and for a dynamic system, the Lagrange's equations are:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = F_i \quad (1)$$

where T is the kinetic energy, Π is the potential energy, Φ is the dissipation energy lost by a system through internal viscous damping and F is the generalized force, q_i is generalized coordinates. In the case of the free response (modal analysis), the generalized force is zero.

The potential energy of such a system will sum up contributions from all single-axis flexure hinges in the form, namely:

$$\Pi = k_x (x_2 - \eta_1)^2 + k_x x_1^2 + k_x (x_{2C} - x_3)^2 + k_y (x_4 - x_{3C})^2 + k_y x_5^2 + 3k_\varphi \varphi_1^2 + 2k_\varphi \varphi_3^2 \quad (2)$$

It should be noted that the axial, deflection, and rotary deformations of a flexure hinge are expressed in local coordinates.

The dissipation energy lost by a system through internal viscous damping is:

$$\Phi = c_x (\dot{x}_2 - \dot{\eta}_1)^2 + c_x \dot{x}_1^2 + c_x (\dot{x}_{2C} - \dot{x}_3)^2 + c_y (\dot{x}_4 - \dot{x}_{3C})^2 + c_y \dot{x}_5^2 + 3c_\varphi \dot{\varphi}_1^2 + 2c_\varphi \dot{\varphi}_3^2 \quad (3)$$

The total kinetic energy of a planar compliant mechanism is:

$$T = m_1 \dot{x}_{1C}^2 + I_{1C} \dot{\varphi}_1^2 + m_2 \dot{x}_{2C}^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}_{3C}^2 + m_4 \dot{x}_{4C}^2 + I_{4C} \dot{\varphi}_3^2 \quad (4)$$

3.2 Realization of proposed methodology

Using Matlab/Simulink software package was developed the program which carries out the following actions: develops the analytic expressions of the functions T, II, Φ ; differentiates them according to coordinates x_i and φ_i , according their derivatives $\dot{x}_i, \dot{\varphi}_i$ and time t ; transforms them into the operator form and solves in respect of the coordinates x_i and φ_i , i. e. generates the matrices with all the data and then forms the structural diagram and Simulink-model of the system. The fully connected system is shown in Fig. 3.

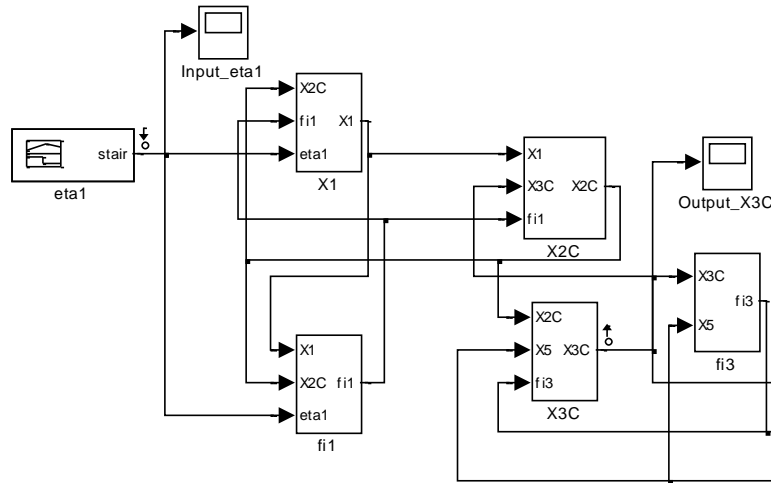


Figure 3 – Preparation of the dynamical Simulink-model for simulation.

The generated input signal of the Simulink-model was input displacement from 0 to $9\mu\text{m}$ over the time of 0,2s, with increment of $1\mu\text{m}$ over the time of 0,02s. The input signal is shown in the top of Fig. 4a. The response of the output platform is shown in the bottom of the Fig. 5b. Were obtained that the amplification ratio of the positioning stage is 5.97 and the workspace zone is $226.86\mu\text{m} \times 226.86\mu\text{m}$, when generated maximal stroke $38\mu\text{m}$ of the piezostack. Simulated changes of the output displacement x_{3C} when single step is generated, shown in Fig 4b.

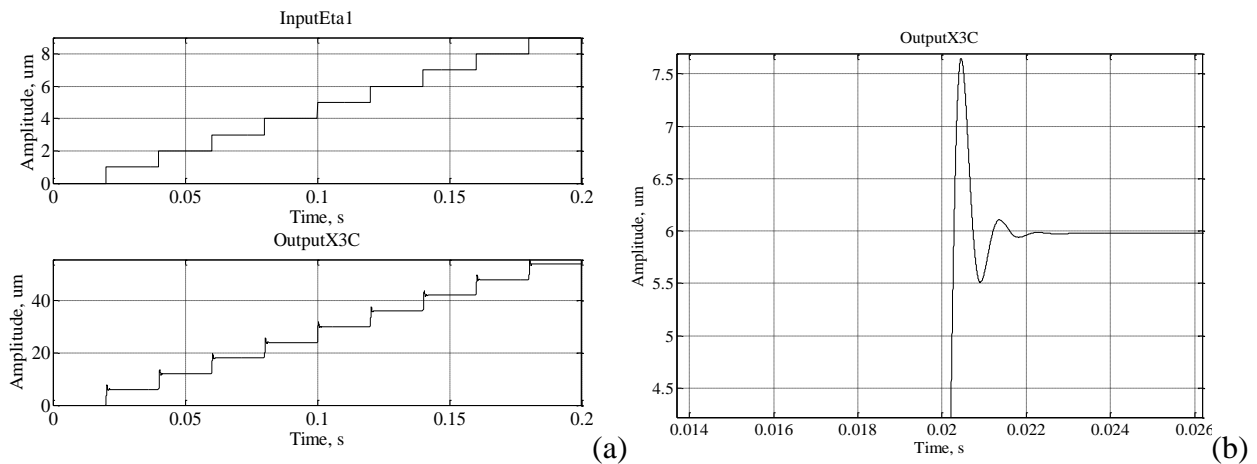


Figure 4 – Simulated parameters of the stage: (a) input signal - in the top and output signal - in the bottom; (b) changes of the output platform, when single step is applied.

4. CONCLUSIONS

In this work a novel XY compliant based precise positioning stage is presented. On the base of the analytic expressions of kinetic energy, potential energy, dissipation function and generalized forces included in Lagrange equations of second type, the numerical expressions of transfer functions included in the structural diagram of the positioning stage are generated in the computer-aided way.

In course of generation of the structural diagrams, data of independent value required for the generation of differential equations of the second degree for the system under discussion and development of the normal form of the said equations are obtained.

The proposed methodology of linear dynamic models in the environment Matlab/Simulink programs, required for computer-aided generations of structural diagrams (Simulink-models) can be applied to the modeling of other types of compliant based precise positioning stages, as well.

REFERENCES

- [1]. Hwang, E., J., Min, K., S., Song, S., H., Ahn, I., H., Choi, W., C., Optimal Design of a Flexure Hinge Precision Stage with a Lever. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol 21, 616-623, 2007.
- [2]. Augustinavičius, G., Cereska, A., Modeling of a 4DOF precise positioning stage by finite element method. *Mechanika*, 17(1): 8-11, 2011.
- [3]. Huang, Y., Cheng C., Robust tracking control of a piezodriven monolithic flexure-hinge stage. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 52 (6): 926-934, 2009.
- [4]. Tang, X., Chen, I., Synthesis and stiffness modeling of XYZ flexure parallel mechanisms with large-motion and decoupled kinematic structure. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 4(2): 160–172, 2009.
- [5]. Zhang, D., Gao, Z., Malosio, M., Coppola, G., Analysis of the novel flexure parallel micromanipulators based on multi-level displacement amplifier with/without symmetrical design. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, Vol. 8: 311–325, 2012.
- [6]. Lobontiu, N., Compliant mechanisms: design of flexure hinges. CRC press, 2003.
- [7]. Smith, S., T., Chetwynd, D., G., Foundations of Ultraprecision Mechanism Design. Taylor & Francis Books Ltd, 2005.
- [8]. Augustaitis, V., K., Gican, V., Sesok, N., Iljin, I., Computer-aided generation of equations and structural diagrams for simulation of linear stationary mechanical dynamic systems. *Mechanika*, 17(3): 255-263, 2011

A MIXED MIMETIC FORMULATION FOR ELLIPTIC PROBLEMS

C.C. Chacón-Suescun

chchacon@hotmail.com

Universidad Nacional Abierta, Sede Principal, Caracas, Venezuela.

B. Otero

botero@ac.upc.edu

Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona-TECH, España.

J.M. Guevara-Jordan

jmguevarajordan@gmail.com (corresponding author)

Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela.

Abstract. *This work presents a novel mixed mimetic formulation for solving second order elliptic problems. It is based on a second order mimetic discretization of the first order system associated to elliptic equations. The mimetic discretizations are fully second order on all grid nodes, which is a new feature in the context of mixed formulations. Linear systems by this approach are saddle points problems. Two techniques for their solutions are analyzed: the segregated and coupled methods. Numerical experiments show that the mixed mimetic formulation has some advantages in the context of difficult problems. These results and the new formulation are main contributions of this paper.*

Keywords: Mixed, Mimetic, Elliptic, Saddle point, Segregated, Coupled.

1. INTRODUCTION

Several versions of mimetic methods have been reported in the technical literature in the last fifteen years, a good review of them can be found in [1]. Main feature of mimetic methods is their emphasis on the discretization of the basic differential operators in vector calculus rather than the direct discretization of partial differential equations. Mimetic discretizations of basic differential operators allow the design of mimetic schemes for solving partial differential equations. In the case of elliptic equations the linear system generated by mimetic schemes may be written as a global saddle point system or as a reduced positive definite system. Early versions of mimetic schemes bring their discretizations to a reduced positive definite linear system. Later on researchers in the area realized the connection between mimetic schemes and mixed finite elements, which leads to the introduction of global saddle point system for the mimetic schemes [2, 3]. This paper presents a mixed formulation for elliptic equations that produces a global

saddle point system for the version of mimetic schemes developed in [4, 5]. Such formulation has not been presented previously because it is well known that saddle point linear systems are more expensive to solve than the traditional reduced positive linear system.

The remainder of this article is organized as follow: Section 2 shows the elliptic equations used in the mixed formulation. Section 3 describes the new mixed mimetic formulation. Section 4 presents the numerical results, and finally Section 5 shows the conclusions and points out new directions for future work.

2. EQUATIONS

It is known that general elliptic equations can be written in the form

$$\begin{cases} \frac{u}{k} - \nabla p = 0 \\ \nabla \cdot u - ap = -f \end{cases} \quad (1)$$

where p and u are the unknown, k , a and f are given functions, ∇ is the gradient, and $\nabla \cdot$ is the divergence [6]. Boundary conditions for (1) are required to obtain a well posed problem. In general, the mimetic methods are developed for general Robin's condition

$$(\bar{n} \cdot k \nabla p) + cp = h \quad (2)$$

in which h and c are given functions on the boundary of the region of integration of equation (1). In some applied problems u is more important than p and this justify its introduction in the above system [7]. Equations (1) and (2) will be used in the description of the mixed mimetic formulation.

3. MIXED MIMETIC FORMULATION

A numerical method on a staggered grid is called mimetic if it provides mimetic discretizations D , G , and B for the divergence, gradient, and boundary operators respectively, and these discretizations satisfy the following discrete version of the Green-Gauss-Stokes theorem

$$(Dv, w)_Q + (v, Gw)_{Q_1} = (Bv, w)_I \quad (3)$$

In the above expression the brackets represent generalized inner products and their sub indexes are weights associated to them, v and w are vectors associated to nodes in the staggered grid. The Green-Gauss-Stokes theorem (3) provides an useful relation between the boundary operator B and the operators D and G by the following expression $B = QD + G'Q_1$, where Q_1 and Q are the weights in the generalized inner products. In this article a second order version of the mimetic method described in [4, 5] is used. We refer the reader to those references for specific details of the second order discretizations and parameters. The mimetic method described in [4, 5] is restricted to one dimension, which can be readily extended to higher dimension by well known tensor products.

The mixed mimetic formulation is achieved by replacing the continuous differential operators in (1) and (2) by their mimetic approximations. In the case of equation (1) such substitution results in

$$\begin{cases} \frac{U}{K} - GP = 0 \\ DU - AP = -F \end{cases} \quad (4)$$

where the capital variables U, P are the mimetic approximations to u and p , while K, F and A are the projection of known functions k, f , and a on the staggered grid. Similarly the mimetic approximation to the boundary condition (2) takes the following form

$$(BKG)P + CP = H \quad (5)$$

where the boundary operator has been used to compute the directional derivative and C, H are the projection of function c, h on the staggered grid respectively. Equations (4) and (5) can be combined by the superposition principle and written as a saddle point linear system

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

where A_{11}, A_{22} are square matrices, A_{12}, A_{21} are rectangular matrices and F_1, F_2 are conveniently selected sources terms. In their simplest form a natural selection for those terms is $F_1 = 0$ and $F_2 = F + G$. There are at least two different ways to implement the superpositions of (4) and (5) but they are subject of current research along with the selection of sources terms [8], so specific formulas for them will be avoided at this time.

In general, system (6) is non symmetric and it will be solved by GMRES [9], without preconditioner in this article. Such approach is usually called a coupled method because GMRES solves for U and P simultaneously. Early formulations of mimetic methods avoided the coupled approach because it has to solve a system with more than twice the number of unknown of the reduced system associated with P . An alternative approach, called segregated, for solving (6) is to solve for U for and P sequentially by computing the Schur complement for matrix A_{22} , which produces a reduced linear system for P . This system is solved by GMRES and its solution P is used to compute U by an explicit calculation with the first block of equations in system (6). The segregated approach has been used traditionally for solving only P with the mimetic schemes described in [4, 5]. Both approaches will be evaluated for computing U and P in the context of numerical a test problem in the next section.

4. NUMERICAL RESULTS

In order to test the new mixed mimetic formulation consider the following one dimensional elliptic boundary value problem

$$-y'' + y = 1/(x - 1/2) + (x - 1/2)(1 - \ln|x - 1/2|) \text{ on } (0,1), y(0) = (\ln(2) + 1); y(1) = -y(0). \quad (7)$$

Several comments will be presented for the selection of this elliptic equation as the only test problem to be analyzed in this article, whose solution is $y(x) = (x - 1/2)(\ln|x - 1/2| - 1)$. The simplest boundary condition has been considered in order to reduce programming mistakes in the computer implementations of coupled and segregated approaches. The source term in (7) has a very strong singularity at $x = 1/2$ dominated by term $1/(x - 1/2)$. The singularity remains for $y(x) = \ln(x - 1/2)$ and it disappears for $y(x)$ as a simple calculation shows. The singularity has been placed at the middle of the interval of solution for (7) in order to have control on the staggered grid nodes. In our computer implementation an odd number of blocks places at node at the singularity position, namely at $1/2$, while an even number of blocks set a separation between consecutive blocks at the singularity. The selected test problem has strong use of singularities because in the context of boundary value problems with smooth terms and solutions the mixed mimetic formulation is in disadvantage with the reduced positive linear system for P .

The test No.1 to approximate the U and P for (7) solves (6) on staggered grid with 20 and 80 blocks. It considers $F_1 = 0$ and $F_2 = F+G$. Table No. 1 shows the results. They show a strong insensitivity of the errors, in the norm of maximum, as function of grid size. In fact, those results are favorable to the segregated approach because the register a lower number of iterations for GMRES and its approximations to P . A close look at the errors for P shows that error around the singularity is smaller for the coupled approach. Sometimes the approximation to the solution near the singularities is more important than its values far away in the domain.

TABLE No. 1: RESULTS TEST No. 1

No. grid blocks	Approach	Error P	Error U	Iterations
20	Coupled	0.018	33	22
	Segregated	0.007	33	11
80	Coupled	0.018	29	82
	Segregated	0.002	29	42

However, it is not advisable, in general, to use the coupled approach to compute P .

The test No. 2 is the same setup of test No. 1 but it modifies the sources terms in the coupled approach by considering $F_1 = -\ln|x - 1/2|$ and $F_2 = 0$. This modification subtracts the singularity from F_2 and sends it to F_1 . Such modification cannot be easily achieved in the segregation approach, which keeps the same source term for this test. Its results are summarized for its analysis in table No. 2.

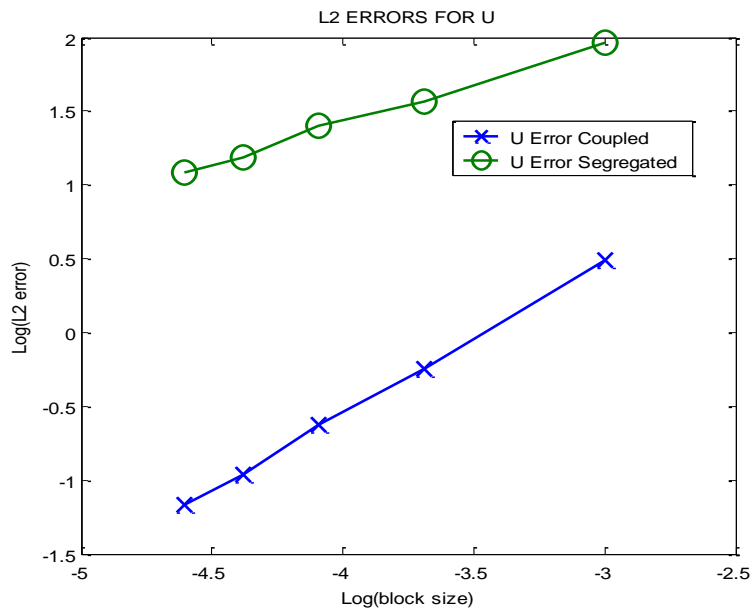
TABLE No. 2: RESULTS TEST No. 2

No. grid blocks	Approach	Error P	Error U	Iterations
20	Coupled	0.7700	1.8220	22
	Segregated	0.0070	33	11
80	Coupled	0.1841	0.5032	84
	Segregated	0.0020	29	42

In the above results the coupled approach shows the effects of grid refinement on both approximations, P and U . In the case of P the errors are still favorable to the segregated approach but it is clear that the coupled approach improved its convergence rate in comparison to test No.

1. Errors for U are incredible good for the coupled technique and it is quite clear that segregation approach cannot match such behavior unless some kind of singularity subtraction could be implemented. It is evident that the huge errors in table No. 2 were measured in the maximum norm, which explains the poor convergence rate of the segregation technique around the singularity. Sometimes errors measured in the L_2 , mean square errors, could improve the results for the segregation approach, so L_2 errors were computed on grids of sizes 20, 40, 80,100 and 120. They are presented in a log-log plot in figure 1 for U . The errors for U shows that the smallest errors are those associate with the coupled approach. Moreover, the convergence rate obtained for the coupled technique is better than the one observed for the segregated approach. These observations give evidence of the strong difference between the two approaches under study. Specifically these observations about L_2 justify the introduction of the mixed mimetic formulation for elliptic equations, because the new formulation seems to allows us to compute better approximations for U with a higher convergence rate

The test No. 3 is the same as test No.2, but the number of grid blocks for this test is 21 and 81. This means that a grid node is placed exactly on the singularity position $x = 1/2$. In this test both approaches failed because the singularity at a grid node produces division by zero.



(b)

Figure 1. L_2 errors for U .

5. RESULTS AND DISCUSSION

This short and naive paper has presented for first time a mixed mimetic formulation for elliptic equations in the context of mimetic scheme developed in [4] and [5]. The new formulation produces a saddle point linear system that can be solved by a coupled approach or a segregated approach. Both approaches use GMRES for solving the linear systems because the matrices generated by them are non symmetric. A simple one dimensional test problem was presented, studied and analyzed. Numerical results from the test problem give strong evidence

that the performance of the mixed formulation is strongly dependent on the choice of sources terms F_1 and F_2 . Obvious choices for F_1 and F_2 , like in test No.1, produce poor approximations for P and U . The selection of F_1 and F_2 by taking into account the nature of the singularities in the source terms produces good approximations for P and U . In such case the U approximation obtained by the coupled approach is the best and it seems independent of the P approximations. This result seems to justify the use of the mixed mimetic formulation with coupled approach for fluid flow problems where the numerical approximation of the variable u is the most important. The number of iterations of GMRES indicates that the segregated approach is the cheapest option for solving the saddle point system, but the quality of its solutions is not always the best as was showed in test No. 2.

The results presented in this article are very preliminary and limited in scope. Computer implementation of mixed mimetic formulation to multidimensional heterogeneous problems is on the way [8]. Moreover, optimal choice of Schur complements and block matrix design in the saddle point system are topic that deserve a more detailed study in the context of multidimensional elliptic problems. One dimensional homogeneous problems as the one presented in this article do not give a correct perspective of the power of the mixed mimetic formulation.

REFERENCES

- [1].Lipnikov K., Manzini G., Shashkov M. (2014), *Mimetic finite difference method*, Journal of Computational Physics, vol. 257 (B).
- [2].Hyman J., Morel J., Shashkov M., Steinberg S. (2002), *Mimetic finite difference methods for diffusion equations*, Computational Geoscience, vol.6.
- [3].Brent M., Lipnikov K., Shashkov M., Wheeler M.F., Yotov I. (2005), *Superconvergence of the velocity in mimetic finite difference methods quadrilaterals*, SIAM Journal on Numerical Analysis , vol. 43(4).
- [4].Guevara-Jordan J.M., Rojas S., Freites-Villegas M., Castillo J.E. (2007), *Convergence of a mimetic finite difference method for static diffusion equation*, Advances in Difference Equations vol. 2007.
- [5].Castillo J.E., Yasuda M. (2002). *Linear system arising for second order mimetic divergence and gradient discretizations*, vol.4 (1).
- [6].DuChateau P., Zachmann D., *Schaum outline of partial differential equations*, Third Edition, McGraw Hill, (2011).
- [7].Acheson D.J., *Elementary fluid dynamics*, First Edition, Oxford University Press, (1990).
- [8].Chacón-Suescun C.C., *Un método mimético mixto para ecuaciones elípticas*, Master's thesis in Computer Science, Universidad Central de Venezuela, in preparation.
- [9].Saad Y., *Iterative methods for sparse linear systems*, SIAM, (2003).

ON THE DESIGN OF A NONLINEAR STATE OBSERVER FOR THE LOCATION OF A BLOCKAGE IN A PIPELINE.

Ignacio Rubio Scola

Gildas Besançon*

Didier Georges

{*ignacio.rubioscola, gildas.besancon, didier.georges*}@gipsa-lab.fr

Département Automatique, GIPSA-lab. Institut polytechnique de Grenoble. Saint Martin d'Hères, France.

*Institut Universitaire de France.

Marcos L. Guillén

Jean-F. Dulhoste

Rafael Santos

{*marcosg, djean, rsantos*}@ula.ve

Grupo Termofluidodinámica. Dpto. De Ciencias Térmicas. Escuela de Ing. Mecánica. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

Abstract. *This paper presents a design of a nonlinear state observer in order to locate a blockage in a pipeline, by only using measurements at each end. First, a mathematical model of the pipeline is presented, using the water hammer equations and applying the finite difference method for the solution with n sections. Then, based on the experience got from the problem of leak location with nonlinear observers, a second mathematical model is obtained by discretization in only two sections, and a nonlinear state observer is built. In this new model, the blockage is at the beginning of the second section of the pipeline, whose position is to be estimated by the observer. By analysis of the model, it is found that in order to make this location estimation possible, the observer requires specific inputs, called persistent inputs. These persistent inputs are found empirically, and numerical simulations are presented with the proposed state observer and mathematical model, showing a satisfactory blockage location. Simulations where measurements are subject to Gaussian white noise are also included.*

Key words: Modeling, Pipeline, Blockage, Nonlinear Observer

1 INTRODUCTION

Nowadays, pipelines are a cheap way to transport liquids. But faults, as leaks or blockages, can cause big and expensive problems to solve, generating a loss in money and repairing time. A lot of work has been done on leaks detection and location but not so much on blockages detection and location ([5] and [3]). Particularly, in this work, the problem is solved using model based techniques. Section 2 presents the considered model and section 3 the proposed observer. Section 4 then illustrates the results in simulation, and section 5 concludes the paper.

2 PIPELINE MODEL WITH LUMPED BLOCKAGE

The dynamics of the fluid in a pipeline can be described by the Water Hammer partial differential equations considering convective changes in velocity and constant liquid density [4]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + Ag \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (1)$$

where H means the pressure head (m) and Q the flow rate in the pipeline (m^3/s), varying in space z (m) and time t (s). Then, the constant parameters c , g , A , D , f and L represent the wave speed in the fluid (m/s), the gravitational acceleration (m/s^2), the cross-sectional area of the pipe (m^2), the diameter of the pipe (m), the friction coefficient, and the pipe length (m) respectively. The initial conditions for the fluid dynamics must be fixed at $Q(z, 0)$, $H(z, 0)$ for $z \in [0, L]$ and also the boundary conditions on Q, H , for $z \in \{0, L\}$. As shown

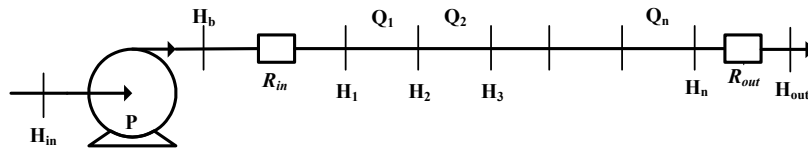


Figure 1: Schema of system Pump-Restriction-Pipeline-Restriction, the pipeline is discretized in n sections.

in figure 2, the pipeline input is connected to a pump (P) with a restriction (R_{in}) and the pipeline output is only connected to a restriction (R_{out}). The dynamics of the pump and both restrictions are hundred times faster than the pipeline dynamics, so static equations are enough to describe the behavior of these elements. The following equations describe those static relations between the pressures of the pump and both restrictions:

$$H_{in} - H_b = A_P Q_1^2 + B_P Q_1 + C_P; \quad H_b - H_1 = R_{in} Q_1^2; \quad H_n - H_{out} = R_{out} Q_n^2 \quad (2)$$

where H_{in} is the pump input pressure, H_b is the pressure between the pump and the first restriction, H_1 and H_n , Q_1 and Q_n are the input and output pressures and flows of the pipeline respectively, H_{out} is the output pressure of the second restriction and finally the constants A_P , B_P , C_P are the pump constants and R_{in} and R_{out} are the restrictions constants.

In order to solve numerically the partial differential equations Eq.(1) a discretization in space must be done. Imposing as boundary conditions $H(0, t)$ and $H(L, t)$, the discretized

equations for each section (i) are:

$$\dot{H}_i = -\frac{c^2}{gA} \frac{Q_{i+1} - Q_i}{z_{i+1} - z_i}; \quad \dot{Q}_i = -Ag \frac{H_i - H_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} - \frac{f_i Q_i |Q_i|}{2DA} \quad (3)$$

where the H_i 's and Q_i 's refer to the approximate values of H, Q at z_i 's.

The model accuracy will depend on the number of points taken in such a discretization, but for the purpose of using it for observer design, the minimum number of sections can be chosen, in order to reduce the observer computational burden. If a punctual blockage occurs

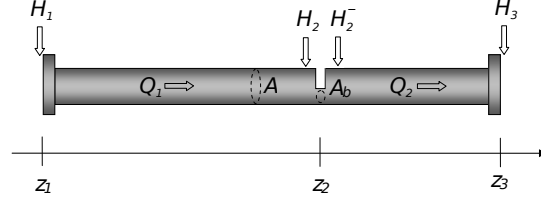


Figure 2: Pipeline discretized in 2 sections with a blockage at position z_2 (beginning of second section).

at some position z_2 , the pipe cross-sectional area A would be reduced into some A_b . Three sections are enough to include the blockage position z_b , as shown in Fig.2 ($z_1 = 0$, $z_2 = z_b$, and $z_3 = L$). Finite-difference model (3) in that case reduces to:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= -Ag \frac{H_2 - H_1}{z_2 - z_1} - \frac{f_2 Q_1 |Q_1|}{2DA} \\ \dot{H}_2 &= -\frac{c^2}{gA} \frac{Q_2 - Q_1}{z_3 - z_2} \\ \dot{Q}_2 &= -Ag \frac{H_3 - H_2^-}{z_3 - z_2} - \frac{f_3 Q_2 |Q_2|}{2DA} \end{aligned} \quad (4)$$

As the blockage is considered punctual, the relation between the pressure before the blockage (H_2) and after (H_2^-) could be described as an orifice plate using Bernoulli's equation:

$$H_2^- = H_2 - \frac{Q_2^2}{2gA^2} \left[\left(\frac{A}{A_b} \right)^2 - 1 \right] - h_L \quad (5)$$

In this equation h_L represents the pressure losses due to the blockage, and its geometry being unknown, the worst case of $h_L = 0$ can be considered. In practice the blockage will be smaller than the one represented by this equation.

Finally the connection between the pipeline model and the pump and both restriction is done by the following two equations:

$$\begin{aligned} H_1 &= -(R_{in} + C_P)Q_1^2 - B_P Q_1 - A_P + H_{in} = F_P(H_{in}, Q_1) \\ H_3 &= R_{out}Q_2^2 + H_{out} = F_R(H_{out}, Q_2) \end{aligned} \quad (6)$$

In the next section, equations of the state space model and proposed observer will be discussed.

3 STATE SPACE MODEL AND OBSERVER EQUATIONS

Considering the following state vector:

$$x^T = [Q_1, H_2, Q_3, z_2, Obs]^T, \text{ with } Obs = \frac{\left(\frac{A}{A_b}\right)^2 - 1}{2gA^2}, \quad (7)$$

and equations (Eq.4)-(Eq.5)-(Eq.6) of previous section, the state space model reads:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -Ag \frac{x_2 - F_P(u_1, x_1)}{x_4} - \frac{f_2 x_1 |x_1|}{2DA} \\ \dot{x}_2 &= -\frac{c^2}{gA} \frac{x_3 - x_1}{x_4} \\ \dot{x}_3 &= -Ag \frac{F_R(u_2, x_3) - x_2 + x_3^2 x_5}{L - x_4} - \frac{f_3 x_3 |x_3|}{2DA} \\ \dot{x}_4 &= 0, \quad \dot{x}_5 = 0 \text{ and } y = [x_1, x_3]^T \end{aligned} \quad (8)$$

where y specifies the measured variables, and u_1, u_2 correspond to the boundary conditions, acting as inputs.

Before trying to localize the blockage, it should be first detected. The detection of the blockage can be solved if the pipeline is in steady state [3]. So, considering u_1 and u_2 in constant value for a time long enough, the dynamics of the pipeline model are zero ($\dot{x} = 0$), and the friction losses are equal all along the pipeline ($f_2 = f_3 = f$). The information of the blockage is found solving the following equations:

$$\begin{aligned} x_5 &= \frac{F_R(u_2, y_2) - F_P(u_1, y_1)}{y_2^2} + \frac{fL}{2DA^2g} \frac{|y_2|}{y_2} \\ \dot{x}_{5F} &= \alpha(x_5 - x_{5F}); \quad \frac{A_b}{A} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2gA^2 x_{5F}}} \end{aligned} \quad (9)$$

The first part of the second equation is just a first order low-pass filter to make the detection algorithm robust with respect to the output variables noise, where α^{-1} is the time constant and x_{5F} is x_5 filtered. As soon as a blockage is detected, an observer for the location can be run. The change of coordinates: $\zeta_1 = \frac{x_1}{Ag}$, $\zeta_2 = \frac{1}{x_4}$, $\zeta_3 = -\frac{x_2}{x_4}$ with the new inputs $u_{\zeta_1} = y_1$, $u_{\zeta_2} = y_2$ producing the following representation:

$$\dot{\zeta}_1 = F_P(u_1, u_{\zeta_1})\zeta_2 + \zeta_3 - \frac{f_2 u_{\zeta_1} |u_{\zeta_1}|}{2DA^2g}; \quad \dot{\zeta}_2 = 0; \quad \dot{\zeta}_3 = \frac{c^2}{Ag}(u_{\zeta_2} - u_{\zeta_1})\zeta_2^2 \quad (10)$$

which is a system of type:

$$\dot{\zeta} = A_\zeta(u)\zeta + \Phi_\zeta(\zeta, u); \quad y_\zeta = C_\zeta \zeta \quad (11)$$

with the matrices:

$$A_\zeta(u) = \begin{bmatrix} 0 & F_P(u_1, u_{\zeta_1}) & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Phi_\zeta(u, \zeta) = \begin{bmatrix} -\frac{f_2}{2DA^2g} u_{\zeta_1} |u_{\zeta_1}| \\ 0 \\ \frac{c^2}{Ag}(u_{\zeta_2} - u_{\zeta_1})\zeta_2^2 \end{bmatrix}, \quad C_\zeta = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (12)$$

and under a persistent input u_1 and γ large enough, an exponential observer for such system is:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\zeta}} &= A_\zeta(u)\hat{\zeta} + \Phi(u, \hat{\zeta}) - K(C_\zeta\hat{\zeta} - \zeta_1) \\ K &= PC_\zeta^T R^{-1}; \quad P(0) > 0 \\ \dot{P} &= \gamma P + A_\zeta P + PA_\zeta^T - PC_\zeta^T R^{-1} C_\zeta P + Q\end{aligned}\tag{13}$$

where Q , R and γ are positive tuning parameters (see [2] for more details). Here Φ needs to be Lipschitz, but assuming that the blockage position z_2 is to be found within some interval $[\varepsilon, L - \varepsilon]$ for some small $\varepsilon > 0$, Φ can be extended to be Lipschitz over \mathbb{R}^3 for the observer design. The position of the blockage is $x_4 = \frac{1}{\zeta_2}$.

With the persistent input applied, the system is no more in steady state, and consequently a new way to measure the blockage can be built. To that end, the change of coordinates $\xi_1 = \frac{x_3(L-x_4)}{Ag}$, $\xi_2 = x_5$ and the inputs $u_{\xi_1} = y_1$, $u_{\xi_2} = y_2$, $u_{\xi_3} = -\frac{\zeta_3}{\zeta_2}$, $u_{\xi_4} = \frac{1}{\zeta_2}$ now results in the system:

$$\dot{\xi}_1 = -F_R(u_2, u_{\xi_2}) + u_{\xi_3} - u_{\xi_2}^2 \xi_2 - \frac{f_3(L-u_{\xi_4})}{2DA^2g} u_{\xi_2} |u_{\xi_2}|; \quad \dot{\xi}_2 = 0\tag{14}$$

which is a system of type:

$$\dot{\xi} = A_\xi(u)\xi + B_\xi(u); \quad y_\xi = C_\xi \xi\tag{15}$$

with matrices given by:

$$A_\xi(u) = \begin{bmatrix} 0 & -u_{\xi_2}^2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_\xi(u) = \begin{bmatrix} u_{\xi_3} - F_R(u_2, u_{\xi_2}) - \frac{f_3(L-u_{\xi_4})}{2DA^2g} u_{\xi_2} |u_{\xi_2}| \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_\xi = [1 \quad 0]\tag{16}$$

An exponential observer can thus be built again as in Eq. (13), with parameters γ_O , R_O and Q_O . The ratio $\frac{A_b}{A}$ is finally found in the same way as in (Eq.9), replacing x_{5F} by ξ_2 .

4 SIMULATIONS

In this section, the prototype described in [1] is considered as a practical example for the validation of the proposed approach. Its parameters are: $g = 9.81(m/s^2)$, $c = 373(m/s)$, $A = 0.003(m^2)$, $f = 0.0189(s^{-2})$ and $L = 85(m)$. The simulation consists first in a steady state operation mode, with $u_1 = 6.5m$ and $u_2 = 1$. Suddenly, at time $t = 10s$, a blockage, with $A_b = 0.9A$, appears at $z_2 = 25m$. When the blockage is detected, the persistent input is injected, $u_1 = 6.5 + 0.5\sin(2\pi t) + 1.5\sin(2.06\pi t)$, and the position is estimated. To show the second part of the observer, the blockage, at time $t = 500$, is moved to $z_2 = 80m$ and is augmented to $A_b = 0.5A$. Notice that a noise of some percents of the output value is added to the outputs of the system so as to simulate measurement noise. The parameters of the algorithms are: $\alpha = 1$, $R = 1$, $Q = I_D$, $\gamma = 4$, $R_O = 1$, $Q_O = I_D$ and $\gamma_O = 1$. Figure.4 shows the simulation results, the observer recovers well the position and the blockage size. The simulation also shows that the noise robustness increases as the obstruction increases.

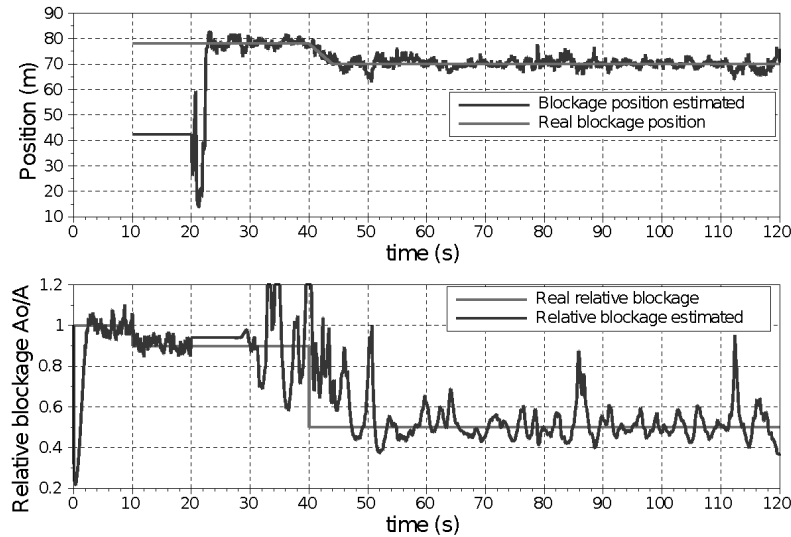


Figure 3: Simulation of one blockage in two different positions and different sizes.

5 CONCLUSIONS AND FURTHER WORK

In this paper, a technique to detect and locate a blockage in a pipeline has being proposed. Based on a mathematical model an observer was build and the performance and accuracy were illustrated by numerical simulations.

In the future, the problem of robustness to noise will be more deeply addressed, and the observer will be improved, in order to be applied to real data.

Acknowledgements

This work was supported in part by a French-Venezuelan collaboration program ECOS-Nord V11M02/ PI-2010000303 Fonacit, Fundayacucho Venezuela.

REFERENCES

- [1] BEGOVICH, O., PIZANO, A., & BESANÇON, G., Online implementation of a leak isolation algorithm in a plastic pipeline prototype. *Latin American Applied Research*, vol. 42, no. 2, pp. 131-140, 2012.
- [2] BESANÇON, G., *Nonlinear Observers and applications*. Springer, 2007.
- [3] BESANÇON, G., RUBIO SCOLA, I. GUILLÉN, M., DULHOSTE, J.F., SANTOS, R., & GEORGES, D., Observer-based detection and location of partial blockages in pipelines. *2nd International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems.*, 2013.
- [4] CHAUDRY, H., *Applied Hydraulic Transients*. Van, 1979.
- [5] WANG, X. J., LAMBERT, M. F., & SIMPSON, A. R., Detection and location of a partial blockage in a pipeline using damping of fluid transients, *Journal of water resources planning and management*, vol.131, no. 3, pp. 244-249, 2005.

IMPLEMENTACIÓN DE MECANISMOS DE COOPERACIÓN EN UNA ARQUITECTURA ADAPTATIVA PARA SISTEMAS MULTI-ROBOTS

Angel Gil

agil@unet.edu.ve

Laboratorio de Prototipos, Universidad Nacional Experimental Del Táchira
Av. Universidad, Sector Paramillo, San Cristóbal-Venezuela

José Aguilar

aguilar@ula.ve

CEMISID, Universidad de los Andes
La Hechicera, Mérida-Venezuela

Eladio Dapena

Rafael Rivas

eladio@ula.ve

rafael@ula.ve

Lasdai, Universidad de los Andes

Av. Don Tulio Febres Cordero, Antigua Facultad de Ingeniería, Mérida-Venezuela

Resumen. *Los sistemas multi-robots son utilizados para llevar a cabo tareas donde el uso de un solo robot no es suficiente para el logro del objetivo. La investigación en esta área presenta hoy en día diversos ejes, uno de ellos es el desarrollo de arquitecturas de control para este tipo de sistemas, así como también los mecanismos a utilizar para que los robots cooperen durante la ejecución de las tareas que conlleven al logro del objetivo global del sistema. Diversas técnicas y metodologías han sido utilizadas para abordar estos problemas. En particular, en la presente investigación se propone el desarrollo de un nivel coordinador inmerso dentro de una arquitectura adaptativa de cooperación para sistemas multi-robots, compuesta por seis niveles: sensorial, interpretativo, planificador, coordinador, ejecutor y un nivel transversal de aprendizaje y gestión del conocimiento. La arquitectura busca gestionar los procesos involucrados con la actuación del equipo de robots, de una manera flexible y auto-ajustable. El nivel coordinador recibe el plan generado por el planificador, y apoyándose en el nivel de gestión de conocimiento, selecciona el mecanismo de cooperación que mejor se adapte al mismo, que permita fusionar las acciones individuales de los miembros del sistema para alcanzar el objetivo global. La arquitectura posee la capacidad de adaptarse durante la ejecución de una misión y cambiar el mecanismo de cooperación seleccionado, con el fin de adecuarse a los*

nuevos objetivos y planes que pudiesen surgir de forma emergente a causa de la interacción del sistema con el entorno. En este nivel se gestionan los protocolos de interacción entre los robots, estableciendo los mecanismos necesarios para la colaboración y/o acoplamiento de los individuos del grupo.

Palabras claves: Arquitectura, Cooperación, Multi-robots, Negociación, Adaptativa

1. INTRODUCCIÓN

La cooperación se da entre los individuos, cuando estos trabajan en conjunto con otros para el logro de un mismo fin. En robótica, la cooperación es fundamental cuando un grupo de robots actúan durante la ejecución de una tarea, para poder distribuir de forma correcta las distintas actividades de una tarea, compartir recursos, evitar interferencias, y aprovechar las habilidades individuales para potenciar la capacidad colectiva del sistema, son algunos de los aspectos que aún presentan retos por resolver. El presente trabajo describe el nivel coordinador de una arquitectura adaptativa de cooperación, para un sistema multi-robot compuesto por microbots de propósito general con limitadas capacidades.

La arquitectura de seis niveles presentada en [1], cuenta con el nivel coordinador objeto de estudio en este trabajo, encargado de gestionar los mecanismos de cooperación del sistema. En este nivel se establece cómo se realizarán las interacciones entre los miembros del sistema, se determinan los protocolos de conversación más adecuados, entre otras aspectos, de acuerdo al objetivo global y del plan generado en otras instancias de la arquitectura. Los mecanismos de cooperación seleccionados pueden cambiar durante la ejecución de una tarea, de acuerdo a los nuevos objetivos generados por la interacción de los robots con el ambiente, esto le permite a la arquitectura adaptarse y mejorar el desempeño del sistema en la ejecución de las tareas.

2. CONSIDERACIONES GENERALES DE LA ARQUITECTURA

En [1] se presenta una arquitectura adaptativa de cooperación para múltiples robots, la cual está formada por seis niveles (ver Figura 1), que se encargan de gestionar los procesos necesarios para que el sistema ejecute las tareas asignadas. Los niveles se activan o se inhiben de acuerdo al comportamiento del enjambre, dependiendo si existe una ejecución centralizada del plan o una ejecución totalmente distribuida donde no existe un ente supervisor. Así, los niveles se activan o se inhiben dependiendo de la naturaleza centralizada o distribuida del proceso que estén ejecutando en un momento determinado. A continuación se describe cada uno de sus niveles:

- a) Nivel Sensorial: encargado de gestionar la capacidad sensorial de cada microbot, se establecen en este nivel comportamientos reactivos.
- b) Nivel Interpretativo: en este nivel se procesa la información sensorial recibida de cada uno de los individuos, en función de su aporte colectivo, en este nivel se construye un modelo del mundo.
- c) Nivel Planificador: se generan los planes necesarios para el logro del objetivo global.
- d) Nivel Coordinador: en este nivel se coordinan las acciones de cada robot, a través de la implementación de mecanismo y técnicas de cooperación.
- e) Nivel Ejecutor: gestiona los esquemas motores de cada robot, que se traducen en acciones básicas del mismo.

- f) Nivel de gestión del conocimiento y aprendizaje: se gestionan acá los mecanismos de representación y utilización del conocimiento individual y colectivo, así como los mecanismos de aprendizaje que permiten actualizar dicho conocimiento.

El comportamiento deliberativo de la arquitectura se esparce a través de los niveles interpretativo, planificador, coordinador y de gestión de conocimiento. Por otro lado, el nivel de planificación puede comportarse de manera distribuida o centralizada, dependiendo de los planes que produce (locales o uno único) en un momento dado.

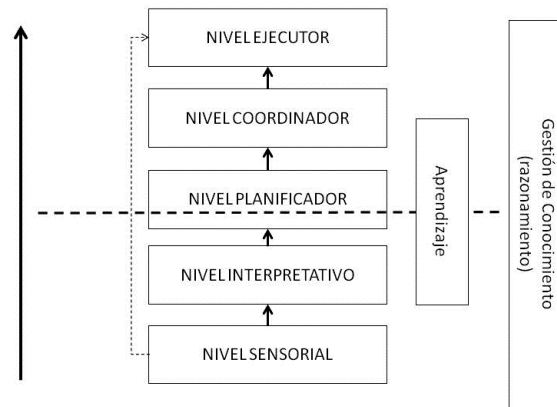


Figura 1- Arquitectura adaptativa de cooperación. Fuente: [1]

La arquitectura presenta las siguientes características:

- Modular: cada nivel es un módulo independiente con funcionalidades específicas.
- Adaptable: la arquitectura es capaz de gestionar distintos esquemas en cada nivel (de cooperación, de aprendizaje, de planificación, etc.), los cuales son seleccionados dependiendo de la tarea a ejecutar, así como de su naturaleza centralizada o distribuida.

La arquitectura es implementada en una plataforma formada por microbots de propósito general, los cuales cuentan con una arquitectura de control individual que gestiona su funcionamiento e interacción con la arquitectura colectiva.

3. NIVEL COORDINADOR

El nivel coordinador se encarga de generar el comportamiento cooperativo del sistema, dependiendo de la naturaleza de la tarea. Este nivel se apoya en los niveles planificador, de gestión del conocimiento y de aprendizaje, para la selección de la o las técnicas de cooperación a utilizar. En particular, depende del nivel planificador debido a que en ese nivel se construye el plan global del sistema, y del nivel de gestión de conocimiento y aprendizaje, porque dependiendo de la tarea a ejecutar se tiene acceso al conocimiento previo que el sistema ha construido a partir de ejecuciones previas. La arquitectura del nivel coordinador está compuesta por varios niveles, los cuales actúan dependiendo la acción que se esté llevando a cabo. A continuación se describe la arquitectura del nivel, y los mecanismos de cooperación a implementar.

3.1 Arquitectura del nivel coordinador

Durante la ejecución de tareas en conjunto por parte de un grupo de robots, la coordinación es fundamental para el logro del objetivo global del equipo. Cuando se trabaja de forma cooperativa, los robots no solo deben estar pendientes de la tarea que están ejecutando en un instante de tiempo, sino deben poseer la capacidad de conocer lo que sucede con las otras tareas que se estén llevando a cabo en su entorno, así como lo que hacen los otros robots del sistema, y cooperar, de ser necesario, con ellos [2]. Los mecanismos de coordinación y de comunicación que se dan entre el grupo son clave para el éxito de la tarea, en particular, los mecanismos de coordinación son implementados en este nivel de la arquitectura.

El nivel coordinador está estructurado en 5 niveles, como se muestra en la Figura 2, los mismos se activan o inhiben dependiendo del comportamiento del sistema en un momento dado.

A continuación se detallan cada uno de ellos:

- a) Gestor técnicas colaborativas: Luego de seleccionar el mecanismo de cooperación a utilizar a través de la interacción con los niveles planificador y de gestión del conocimiento, este nivel se encarga de poner en práctica el mecanismo seleccionado e instanciar su ejecución a la tarea específica que debe ser ejecutada por el sistema. El mecanismo puede cambiar de forma emergente, debido al surgimiento de nuevos objetivos, a causa de cambios que pueden ocurrir en el entorno, que afecten el plan inicial.
- b) Gestor Plan: basándose en el plan generado, y de acuerdo a la técnica seleccionada, este nivel se encarga de asignar los planes locales a cada robot del sistema, solo en el caso de que la tarea sea de naturaleza distribuida, en caso de tareas centralizadas, se distribuyen las sub-tareas que cada robot debe llevar a cabo en un momento dado; además asigna los recursos requeridos para la ejecución de cada plan, en cualquiera de los dos casos.
- c) Gestor Acciones: se encarga de entregar al nivel ejecutor, las acciones concretas que cada robot debe realizar: desplazamientos, variaciones de velocidad, paradas, etc.
- d) Supervisor: este nivel supervisa en cada instante la ejecución del plan global, y es el responsable de evaluar el rendimiento del sistema y la consecución del objetivo, así como también de invocar las acciones necesarias en caso de una re-planificación, lo que involucra la interacción con los niveles planificador y gestión del conocimiento.
- e) Gestor de canales de comunicación: se establecen los mecanismos de habla entre los individuos del sistema, se gestiona el envío de mensajes entre ellos, y se configuran los canales de comunicación de acuerdo a las características de los robots que conforman el sistema.

El nivel coordinador se activa cuando recibe el plan global del sistema por parte del nivel planificador, el cual es procesado por el sub-nivel de gestión del plan, el cual a su vez, interactúa con el gestor de técnicas colaborativas para seleccionar el mecanismo de cooperación a utilizar, el sub-nivel supervisor evalúa las acciones que se están llevando a cabo e interactúa con el gestor de acciones, para ejecutar las operaciones propias de cada robot, en cada momento de la ejecución existe retroalimentación con el supervisor.

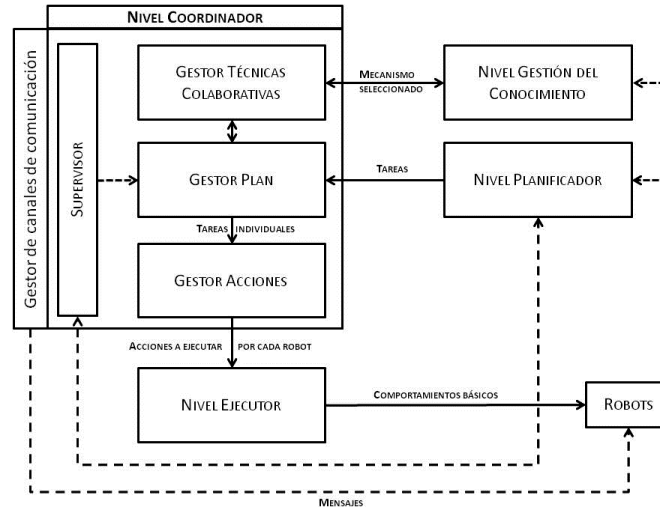


Figura 2- Nivel Coordinador

3.2 Mecanismos de cooperación

Los mecanismos y técnicas de cooperación son implementados de forma independiente. Son almacenados en un repositorio al cual tiene acceso el gestor de técnicas colaborativas del nivel coordinador. Dependiendo de la naturaleza del objetivo a alcanzar, se selecciona el mecanismo o técnica a utilizar durante la ejecución del plan, los mismos pueden cambiar a causa del surgimiento de nuevos objetivos o el cambio del plan inicial, que se pudiese dar de forma emergente durante la actuación del enjambre.

El nivel implementa algoritmos basados en colonias de hormigas [3], colmenas de abejas [4], cardúmenes de peces [5], entre otras técnicas inteligentes bio-inspiradas. Se implementan además otros mecanismos de coordinación como red de contratos, subastas, entre otros [6].

4. TAREAS BASE GESTIONADAS POR LA ARQUITECTURA

Algunas de las posibles tareas genéricas o base, que permite realizar el nivel de coordinación de nuestra arquitectura son:

- Búsqueda y exploración:** la búsqueda de un objetivo y la exploración de entornos desconocidos es una actividad clásica de los sistemas multi-robots, estrechamente relacionada con tareas como el transporte de objetos, mapeo, entre otras, siendo normalmente una tarea previa.
- Formaciones:** es importante en los sistemas multi-robots que los robots puedan construir y mantener una formación específica, esto es base para la resolución de otros problemas. En particular, el control de formaciones es aplicado a tareas de vigilancia, patrullaje, cacería de objetivos en movimiento, entre otras [7].
- Cacería cooperativa:** esta tarea enfrenta problemas colaborativos básicos como: planeación de trayectorias y evasión de obstáculos, pero además, deben cooperar en la persecución y captura eficiente del evasor [8].
- Transporte de objetos:** es un área de interés, con múltiples aplicaciones en: procesos de automatización industrial, rescate de personas, transporte de objetos peligrosos o pesados.

Esta tarea está estrechamente relacionada con la construcción de formaciones por parte de los individuos del sistema [9].

En [1] se describe un caso de estudio que muestra el funcionamiento de la arquitectura en el caso específico del transporte de un objeto de forma cooperativa.

5. CONCLUSIONES

Se presentó el diseño de un nivel coordinador de un sistema multi-robots, inmerso en una arquitectura adaptativa de cooperación de seis niveles. A través de este nivel la arquitectura puede ejecutar tareas de naturaleza distribuida o centralizada, inhibiéndose o activándose los mecanismos necesarios según el comportamiento del sistema en determinados momentos de la ejecución, dado que los objetivos del sistema pueden cambiar de forma emergente, motivado a modificaciones del entorno, provocando cambios del plan global, la arquitectura tiene la capacidad de adaptarse y cambiar la técnica de cooperación seleccionada.

Se definieron el tipo de tareas de carácter cooperativo que son gestionadas por la arquitectura, y que el sistema es capaz de ejecutar, así como también las técnicas y mecanismos de cooperación a utilizar, cada uno implementado de forma independiente, lo que permite la escalabilidad de la arquitectura y la incorporación de nuevas técnicas.

REFERENCIAS

- [1]. Gil, A., Aguilar, J., Rivas, R., & Dapena, E., Arquitectura Adaptativa de Cooperación para Múltiples Robots: Primera aproximación al diseño conceptual. *Primera Conferencia Nacional de Computación, Informática y Sistemas (CoNCISA)*, memorias en versión digital, pp.154-161, 2013.
- [2]. Cain, Y., & Yang, S., A Survey on Multi-robot Systems. *World Automation Congress*, 2012.
- [3]. Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A., Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 26, No.1, 1996.
- [4]. Karaboga, D. & Akay, B., A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation 214*, pp. 108-132, 2009.
- [5]. Cioarga, R., Panus, B., Oancea, C., Micea, M., Cretu, V., & Petriu, E., Fish Shoal Inspired Movement in Robotic Collectives. *ROSE, IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, 2008.
- [6]. FIPA - Foundation for Intelligent Physical Agents, <http://www.fipa.org/>.
- [7]. Shuqin, L., Qiwei, Z., & Xiaohua, Y., Mobile Multi-robots Formation Control and its Implementation. *14th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*, 2010.
- [8]. Ni, J., & Yang, S., Bioinspired Neural Network for Real-Time Cooperative Hunting by Multirobots in Unknown Environments. *IEEE Transactions in Neural Networks*, Vol. 22, No. 12, pp.2062-2076, 2011.
- [9]. Parra, E., Ramírez, J., & Toscano, G., A New Object Path Planner for the Box Pushing Problem. *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, pp. 119-124, 2009.

MODELO Y CONTROL ROBUSTO DEL REACTOR NUCLEAR RA4 -UNR

Rubio Scola, Ignacio E. J.

ignacio.rubioscola@gipsa-lab.fr

Département Automatique, GIPSA-lab. Institut polytechnique de Grenoble.

Saint Martin d'Hères, France.

Orso, Jose

orsojose@hotmail.com

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,

Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA.

Universidad Nacional de Rosario, UNR, Argentina

Rubio Scola, Héctor E.

erubio@fceia.unr.edu.ar

Departamento de Control, EIE.

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.

Consejo de Investigaciones, CIUNR.

Universidad Nacional de Rosario, UNR, Argentina

Resumen. *El reactor nuclear RA-4, Siemens unterrichts reaktor - SUR 100, es un reactor de docencia e investigación, cuya potencia nominal autorizada es 1 W. Originalmente fue diseñado para ser controlado por un operador que accione de forma manual dos barras de control para alcanzar y mantener la potencia deseada. El estado crítico del mismo se logra a través del posicionamiento de estas barras. El estado crítico de un reactor nuclear es un estado de equilibrio inestable, pudiendo pasar el reactor del estado crítico al estado subcrítico o del estado crítico al estado hipercrítico. Si bien la evolución del sistema para estos casos es suficientemente lenta, el sistema requiere de la intervención de un operador para corregir las posibles desviaciones. Por este motivo se ha diseñado una técnica de control automático, basándose en el modelo de un grupo de neutrones retardados, que corrige las desviaciones del estado crítico en forma automática. Con el fin mejorar el control automático, es necesario contar con modelos eficientes y confiables del sistema. En el presente trabajo se realiza un estudio de los modelos de la cinética puntual para un grupo y para seis grupos de neutrones retardados, para diferentes valores de reactividad. Se realiza una comparación de ambos modelos con el comportamiento cinético real del reactor. Esta comparación incluye los diferentes controladores diseñados en base a ambos modelos. Un estudio de la variación de temperatura es también*

presentado, se presenta una comparación para varios valores de reactividad con los diferentes juegos de constantes según Tuttle y Keepin.

Palabras claves: Modelo matemático, Reactor nuclear, Control robusto, Control H_∞ , Constantes Tuttle y Keepin.

1. INTRODUCCIÓN

Las ecuaciones de la cinética puntual para un solo grupo de neutrones retardados [3] son:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \lambda C \\ \frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n - \lambda C \end{cases} \quad (1)$$

donde n : densidad de neutrones

C : concentración de precursores de neutrones retardados

λ : constante de decaimiento de los precursores de neutrones retardados

β : fracción de neutrones retardados

Λ : tiempo entre reproducciones de neutrones instantáneos.

Las ecuaciones de la cinética puntual para seis grupos de neutrones retardados [3] son:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 + \lambda_3 C_3 + \lambda_4 C_4 + \lambda_5 C_5 + \lambda_6 C_6 \\ \frac{dC_1}{dt} = \frac{\beta_1}{\Lambda} n - \lambda_1 C_1 \\ \frac{dC_2}{dt} = \frac{\beta_2}{\Lambda} n - \lambda_2 C_2 \\ \frac{dC_3}{dt} = \frac{\beta_3}{\Lambda} n - \lambda_3 C_3 \\ \frac{dC_4}{dt} = \frac{\beta_4}{\Lambda} n - \lambda_4 C_4 \\ \frac{dC_5}{dt} = \frac{\beta_5}{\Lambda} n - \lambda_5 C_5 \\ \frac{dC_6}{dt} = \frac{\beta_6}{\Lambda} n - \lambda_6 C_6 \end{cases} \quad (2)$$

donde C_i ($i=1 \dots 6$): concentración de precursores de neutrones retardados

β_i ($i=1 \dots 6$): fracción de neutrones retardados correspondiente a grupo i

λ_i ($i=1 \dots 6$): constante de decaimiento de los precursores de neutrones retardados.

Los valores (β_i , λ_i), $i=1 \dots 6$ se obtienen utilizando los juegos de constantes de Tuttle y Keepin (Ver Tabla 1).

A continuación se mencionan las consideraciones respecto a la variación de la reactividad con la temperatura. La reactividad del núcleo es fuertemente dependiente de la temperatura

$$\rho = (-3,18 \pm 0,11) \cdot 10^{-2} \frac{\$}{^\circ\text{C}} T$$

donde ρ es la reactividad en dólares, T es la temperatura en $^\circ\text{C}$ y $-3,18 \times 10^{-2} \text{ \$/}^\circ\text{C}$ es el coeficiente de temperatura. [8]

Tabla 1: Juegos de constantes de precursores de neutrones retardados

i	Juego de Constantes			
	Tuttle		Keepin	
	β_i	λ_i	β_i	λ_i
1	0.038	0.0127	0.033	0.0124
2	0.213	0.0317	0.219	0.0305
3	0.188	0.1150	0.196	0.1110
4	0.407	0.3110	0.395	0.3010
5	0.128	1.4000	0.115	1.1400
6	0.026	3.8700	0.042	3.0100

Por las características del reactor, la potencia máxima de operación no puede ser superior a 1 Watt. La potencia disipada se distribuye en forma no homogénea en todo el núcleo del reactor. Debido a esto último y al tamaño del núcleo, la variación de temperatura de este no supera $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ tras una operación de 4 hs (medido experimentalmente), que es equivalente a la inserción o extracción de 2 mm de barra de control de una longitud total de 250 mm. Es decir que la temperatura del reactor puede considerarse prácticamente constante durante un periodo prolongado de operación, motivo por el cual no hay un cambio significativo en la reactividad. Debido a esto último, no se ha tenido en cuenta el cambio de la reactividad por la temperatura en las ecuaciones de la cinética puntual.

2. RESULTADOS

Las gráficas de la Fig. 1 y la Fig. 2 muestran la evolución relativa del reactor para una reactividad de 0.032 dólares y -0.032 dólares, correspondiente a la extracción e introducción, respectivamente, de 1 cm de la barra de control BC2. Las gráficas de la Fig. 3 muestran la evolución relativa del reactor para una reactividad de 0.065 dólares, correspondiente a la extracción e introducción, respectivamente, de 2 cm de la barra de control BC2. Las gráficas de la Fig. 4 muestran la evolución relativa del reactor para una reactividad de 0.129 dólares, correspondiente a la extracción e introducción, respectivamente, de 4 cm de la barra de control BC2. En todos los casos anteriores la evolución real se compara con simulaciones realizadas para 1 grupo y 6 grupos de neutrones retardados. Para las simulaciones numéricas se ha utilizado el juego de constante de Tuttle para la ecuación de 6 grupos.

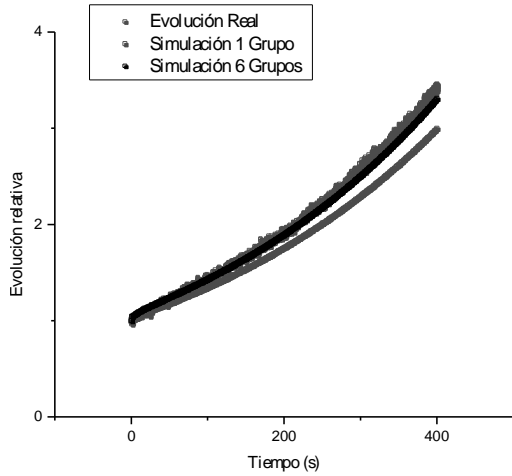


Figura 1: Comparación de la evolución real para una introducción de reactividad de 0.032 dólares con simulaciones realizadas para 1 grupo y 6 grupos de neutrones retardados.

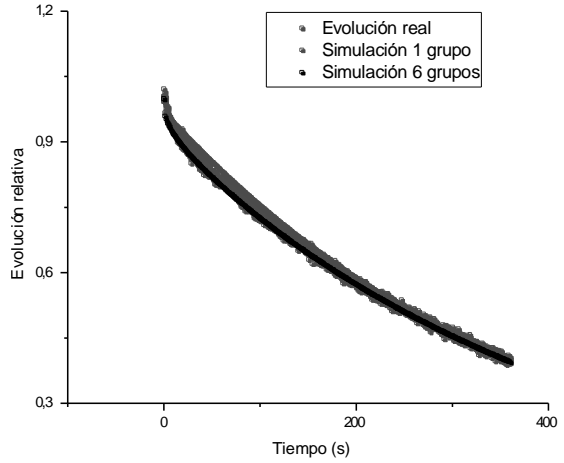


Figura 2: Comparación de la evolución real para una introducción de reactividad de -0.032 dólares con simulaciones realizadas para 1 grupo y 6 grupos de neutrones retardados.

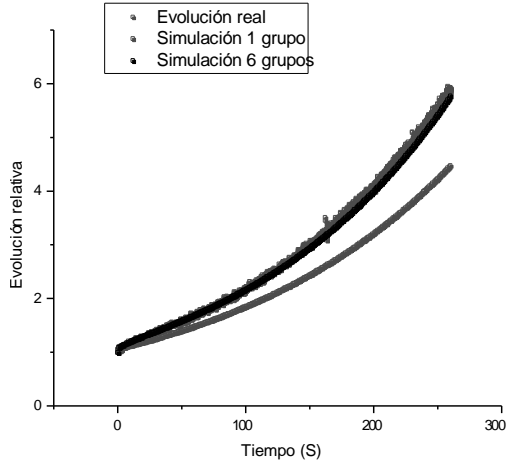


Figura 3: Comparación de la evolución real para una introducción de reactividad de 0.065 dólares con simulaciones realizadas para 1 grupo y 6 grupos de neutrones retardados.

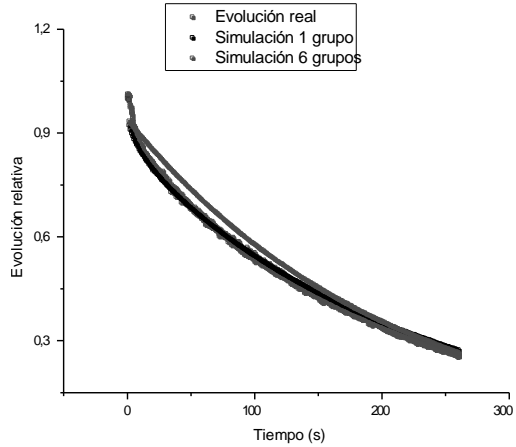


Figura 4: Comparación de la evolución real para una introducción de reactividad de 0.129 dólares con simulaciones realizadas para 1 grupo y 6 grupos de neutrones retardados.

3. CONTROL “H_∞ FULL-STATE”

Aplicando la misma metodología que en el trabajo [1], el sistema de ecuaciones Eq. (2) puede transformarse en un sistema lineal, incremental y normalizado de la siguiente forma:

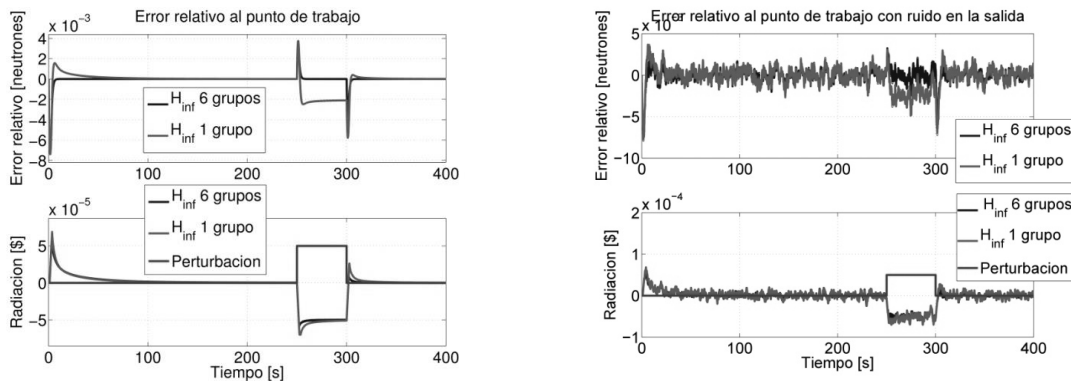
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ld(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3)$$

donde, $x = [\Delta\bar{n}, \Delta\bar{C}_1, \Delta\bar{C}_2, \Delta\bar{C}_3, \Delta\bar{C}_4, \Delta\bar{C}_5, \Delta\bar{C}_6]^T$ es el vector de estados, $u = \rho$ es la entrada, $d = \Delta\rho$ es una perturbación en la entrada e $y = \Delta\bar{n}$ es la salida.

Aplicando una realimentación de estado de tipo H_∞ (estabilizante y robusta a perturbaciones en la entrada) $u = -kx$ donde k es calculado de forma tal que minimice es siguiente funcional costo:

$$J(u, d) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [z^T(t)z(t) + \rho u^T(t)u(t) - \gamma^2 d^T(t)d(t)] dt ; \quad \gamma, \rho > 0$$

sujeito a las limitaciones dinámicas del sistema Eq. (3), para más detalles sobre el control H_∞ ver [9]. Las siguientes graficas Fig. 1 y Fig. 2 muestran el efecto de aplicar los controladores calculados en base a los sistemas Eq. (1) y Eq. (2) transformados en sistemas lineales para luego ser aplicados al sistema Eq. (2). Las simulaciones consisten en iniciar el reactor en un punto de trabajo que esta un 1% por debajo de la referencia. Luego se inyecta una perturbación en la entrada equivalente a haber insertado media barra de control de golpe. La Fig. 5 muestra la salida del reactor sin ruido y la Fig. 6 muestra la salida con ruido blanco gaussiano de 10% de amplitud máxima respecto al valor nominal de salida. Se puede apreciar que el nuevo control tiene una performance un 240% mejor y un excelente rechazo a perturbaciones respecto del controlador diseñado en base al sistema Eq. (1). Otro punto importante, es que el control calculado para el modelo de 6 grupos utiliza un 10% menos de entrada que el controlador anterior.



Figuras 5 y 6: Comparación de la evolución del error relativo respecto del punto de trabajo deseado y de la respuesta al rechazo de perturbaciones en la entrada.

4. CONCLUSIONES

De los gráficos presentados se puede observar que la evolución obtenida a partir de la ecuación de la cinética puntual para 6 grupos de neutrones retardados representa una muy buena aproximación de la evolución real del reactor, obteniéndose una mejor aproximación para un menor valor de reactividad introducida. Se estimó un error de $\$ = 3.23 \times 10^{-3}$ dólares en la introducción de reactividad en las ecuación de la cinética utilizadas en las simulaciones. Este error se obtuvo del error de apreciación en la posición de la barra de control. Este error es constante para cualquier longitud de extracción, con lo cual el error relativo disminuye para mayores longitudes de extracción o introducción de barra de control.

Es importante aclarar que se consideró en las simulaciones, la introducción un escalón de reactividad, lo que no se condice con la realidad, ya que la introducción de reactividad depende de la velocidad de la barra de control, siendo por lo tanto, una pendiente y no un escalón como en el caso ideal. Esta diferencia comienza a tener implicancia para mayor valor de reactividad. La velocidad de la barra BC2 es 5.9 mm/s. Se puede observar en todos los casos que el reactor tiene un comportamiento que se ajusta perfectamente a una evolución exponencial.

El modelo para 6 grupos obtenido permitió realizar un nuevo controlador H_{∞} , con lo que se logra un mejor control de la reactividad a un costo menor en la entrada en relación al control obtenido con el modelo de un grupo. Otra gran mejora introducida por este controlador es el rechazo a perturbaciones en la entrada. También se mostró que para este reactor la temperatura no influye dado que la variación de temperatura es menor a 0.4 grados centígrados para una operación de 54 horas. Como continuación de este trabajo se espera poder aplicar estos controladores directamente al reactor nuclear RA-4, Siemens unterrichts reaktor - SUR 100 y poder comparar los resultados obtenidos con las mediciones reales.

Agradecimientos

Proyecto de investigación y desarrollo (PID-UNR) “Instrumentación y control en procesos de generación de energía”. Argentina

REFERENCIAS

- [1].Rubio Scola, H., Rubio Scola, I., Marenzana A., Nachez, J., *Control Automático del Reactor Nuclear RA-4 UNR*. 2010
- [2].The Math Works Inc., Simulink, *Dynamic System Simulation for MATLAB*. 1997.
- [3].Gómez A., *Métodos de Medición en Física de Reactores Nucleares. Cinética y Ruido Neutrónico*, CNEA-ITE-06REC-203. Rev. 2. 2008.
- [4].Glasstone, S., *Ingeniería de reactores nucleares*. Reverté. 1968.
- [5].Ugo, F., Orso, J., *Desarrollo de Software de Simulación del Conjunto Crítico RA4 UNR*.2011.
- [6].Scolari, H., *Informe de Seguridad del Reactor RA-4*. 2002
- [7].Gomez, A., *Medición de Parámetros Cinéticos en el RA-4*.Informe Técnico CNEA.C.RCN.ITE.097. 1998.
- [8].Levi, D., *Determinación de la variación de la reactividad del reactor experimental RA-4 con la temperatura*.
- [9].Levine, W. S., *The control Handbook* , CRC Press, 1^{era} edition, 1996

ESTIMACIÓN DEL INTERVALO QT MULTICANAL EN PACIENTES CHAGÁSICOS UTILIZANDO TÉCNICAS ESTADÍSTICAS

Jhosmary Cuadros

Rubén Medina

Antonio Bravo

Francisco Durán

jcudros@unet.edu.ve

rmedina@ula.ve

abravo@unet.edu.ve

fduran@ula.ve

Grupo de Bioingeniería, Decanato de Investigación, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela.

Centro de Ingeniería Biomédica y Telemedicina, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Grupo de Bioingeniería, Decanato de Investigación, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela.

Centro de Microscopía Electrónica, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Tulio Nuñez

tulio@ula.ve

Hospital Universitario de la Universidad de Los Andes, Centro Cardiovascular, Mérida, Venezuela.

Abstract. *El presente trabajo reporta el desarrollo de una herramienta para la estimación del intervalo QT multicanal en pacientes chagásicos, utilizando técnicas estadísticas como la covarianza y la descomposición en valores singulares (SVD). El software consta de tres fases. En la primera fase, se realiza el preprocesamiento de los datos electrocardiográficos así como la segmentación de la señal electrocardiográfica para determinar el inicio del complejo QRS y el final de la onda T. La detección de tales puntos, se realiza utilizando máquinas de soporte vectorial de mínimos cuadrados (LSSVM). En la segunda fase, se estiman los siguientes parámetros: intervalos QT e intervalos QT corregidos QTc en los 8 canales independientes de los 12 canales estándar del ECG para 300 latidos. En la tercera fase, se aplican las técnicas de covarianza y SVD para obtener parámetros menos susceptibles al ruido, tales como: el intervalo QT basado en el vector radio de amplitud (QT_{RVA}), el intervalo QT multiderivación por covarianza (QT_{ML}) y el intervalo QT basado en SVD (QT_{SVD}). Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas en la medición del QT entre ambos grupos, por ejemplo, para el grupo de chagásicos se obtiene un valor promedio para QT de 398,90 ms y para el parámetro QT_{SVD} de 396,50 ms, 374,52 ms para QT_{RVA} y 400,05 ms para QT_{ML} , lo cual demuestra la relación entre el valor de QT determinado*

en la segunda fase y los valores de QT_{SVD} , QT_{RVA} , QT_{ML} , parámetros que de acuerdo con la literatura deben estar correlacionados.

Key words: Señal Electrocardiográfica, Intervalo QT, SVD, Covarianza, Máquinas de Soporte Vectorial.

1 INTRODUCCIÓN

El mal de Chagas es una enfermedad infecciosa causada por el parásito *Tripanosoma cruzi*. Se caracteriza por alteraciones en el sistema cardiovascular que normalmente están asociadas a la cardiopatía chagásica. Una de las alteraciones en el registro electrocardiográfico (ECG) en presencia de la enfermedad del Chagas es la variación anormal del intervalo QT (duración total de la fase de despolarización como la de repolarización ventricular [1]). Tal situación motiva el análisis de las señales de ECG en presencia de dicha patología con el objetivo de mejorar el diagnóstico, hacer seguimiento y tratamiento en pacientes que padecen de la enfermedad. Se propone una herramienta para estimar el intervalo QT, QTc y QT en base a técnicas estadísticas (como es la covarianza y la descomposición en valores singulares (SVD)). La segmentación de la señal se realiza empleando Máquinas de Soporte de mínimos cuadrados (LSSVM) [2]. Se hipotetiza que tales intervalos se modificarán si el paciente padece de la enfermedad del Chagas, tal como se observó en los resultados obtenidos en [1]. Una validación preliminar se realiza comparando un grupo de pacientes chagásicos con respecto a un grupo de control.

2 BASES TEÓRICAS

2.1 Descomposición en valores singulares (SVD) de la señal ECG

La descomposición en valores singulares (SVD) sobre una señal ECG realiza una transformación matemática basada en la correlación entre señales, obtenidas del ECG estándar [3]. Por lo general, se aplica la SVD a las ocho derivaciones independientes (I, II, V1-V6) del ECG y luego se reconstruye dicha información en un espacio ortogonal óptimo de ocho pseudoderivaciones ($S_1 \dots S_8$). En ese espacio, S_1 contendrá la máxima energía o autovalor (σ_1) en esa dirección, S_2 contendrá la máxima energía (σ_2) perpendicular a S_1 , S_3 contendrá el máximo σ_3 perpendicular a las dos primeras pseudoderivaciones y así sucesivamente. $S_1 S_2 S_3$ contienen alrededor del 98% de la energía total del ECG, denominada componente dipolar ($\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$), y $S_4 \dots S_8$ el 2% restante, denominada componente no dipolar ($\sigma_4 \dots \sigma_8$).

3 PROTOCOLO UTILIZADO

El protocolo incluyó un total de 20 pacientes chagásicos con igual número de sujetos control con edad promedio de 44 años. Fueron excluidos del estudio aquellos individuos con enfermedades cardiovasculares, insuficiencia renal, enfermedad broncopulmonar, diabetes ó hipertensión. Se les realizó un registro ECG de alta resolución de 12 derivaciones mediante un electrocardiógrafo digital (con una duración entre 6 y 10 min., con el paciente en reposo y con respiración controlada, 15 respiraciones por minuto, a una tasa de muestreo de 2000 Hz, con una resolución de 12 bits por muestra). Para el entrenamiento de la LSSVM se siguió el protocolo propuesto en [4].

4 EL SOFTWARE

4.1 Primera y segunda fase

El software realiza en una primera fase el preprocesamiento de los datos electrocardiográficos empleando algoritmos para la corrección de línea base, reducción de ruidos, detección de complejos QRS, así como la segmentación de la señal electrocardiográfica [5]. En la segunda fase, para cada uno de los pacientes chagásicos y sujetos de control, se determinó el intervalo QT para 300 complejos QRS válidos y el intervalo QT corregido mediante la técnica de Bazett.

4.2 Tercera fase. Valor del intervalo QT estimado por covarianza y por SVD

Todd et. al [6] menciona en su artículo que se pueden estimar tres parámetros adicionales relacionados con el intervalo QT, los cuales son menos susceptibles al ruido mediante el uso de técnicas estadísticas como es la covarianza y la descomposición en valores singulares (SVD). El primero de éstos parámetros denominado QT_{RVA} se estima a partir del registro ECG, mientras los dos restantes, QT_{ML} y QT_{SVD} , se determinan a partir de los datos obtenidos en la segunda fase, en la cual se realizó la estimación del intervalo QT para 300 latidos en cada una de las ocho derivaciones independientes del ECG, obteniéndose así la matriz ECG_{QT} de tamaño $M \times N$, donde M representa el número de valores QT (300) y N el número de derivaciones (ocho). Estos parámetros se explican a continuación:

- *Intervalo QT basado en el vector radio de amplitud (QT_{RVA}):* para obtener este parámetro se siguen los siguientes pasos:

1. Se determina las componentes X,Y,Z del vectocardiograma en base al registro ECG.
2. En base a las componentes X,Y,Z se calcula la diagonal media de las componentes (denominada d) mediante la ecuación 1:

$$d = \sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} \quad (1)$$

3. Luego se multiplica cada canal correspondiente a cada derivación independiente (I, II, V1-V6) del registro ECG por la diagonal media d obteniendo una matriz denominada ECG_d de tamaño $F \times C$ donde F representa las filas (número de muestras en cada derivación) y C representa el número de columnas (ocho derivaciones independientes).
4. A continuación se aplica la técnica de Descomposición en Valores Singulares, obteniendo los autovalores y autovectores (ecuación 2), donde Σ es una matriz diagonal en la cual cada elemento de la diagonal Σ_i es igual a $\sqrt{\lambda_i}$, la raíz cuadrada de los autovalores de $A = ECG_d^T ECG_d$ [3], las matrices U y V representan los autovectores.

$$ECG_d = U \Sigma V^T \quad (2)$$

5. Se reconstruye el ECG_d en el nuevo espacio de características en base a los autovectores, multiplicando ECG_d por los autovectores (ver ecuación 3).

$$ECG_SVD = V_R^T * ECG_d \quad (3)$$

donde ECG_SVD representa la matriz de datos transformados [3] y V_R^T está formada por los tres autovectores pertenecientes a V^T asociados a los tres primeros autovalores mayores.

6. Después, se construye una derivación denominada RVA (amplitud del vector radio) en base a las tres derivaciones reconstruidas del ECG_SVD , como se muestra en la ecuación 4:

$$RVA = \sqrt{(ECG_SVD_1^2 + ECG_SVD_2^2 + ECG_SVD_3^2)} \quad (4)$$

7. Luego en la señal RVA se aplica la metodología descrita en la primera y segunda fase para determinar el valor de intervalo QT, con la variante de que en este caso solo se va a realizar para una derivación, puesto que se determinará el valor del intervalo QT sólo en la señal RVA .
8. Se realiza el promediado de los QT y se obtiene el parámetro QT_{RVA} .

- *Intervalo QT Multiderivación por Covarianza (QT_{ML}):* el objetivo de este parámetro es estimar el intervalo QT en base al promedio del valor del QT presente en las cuatro derivaciones que presenten menor covarianza. Para ello se calcula la matriz de covarianza (usando la ecuación 5) de dimensiones 8x8 de la matriz ECG_QT que contiene los valores del intervalo QT calculados para 300 latidos en las derivaciones I,II,V1,V2,V3,V4,V5,V6

$$Cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (5)$$

donde X, Y representan las variables a determinar la covarianza, n es el número de muestras, \bar{x}, \bar{y} es la media de la variable x e y respectivamente, x_i, y_i indica la muestra i para cada variable. Luego se determina la media por cada columna de la matriz de covarianza obteniéndose así un vector de dimensión 1x8, es decir, una fila y 8 columnas, el cual representa la media de la covarianza para cada una de las derivaciones. Finalmente, se seleccionan aquellas cuatro derivaciones que presenten la menor covarianza y se estima QT_{ML} en base al promedio del valor del intervalo QT presente en las derivaciones seleccionadas.

- *Intervalo QT basado en SVD (QT_{SVD}):* éste parámetro se obtiene a partir de la matriz ECG_QT de valores QT en base a los siguientes pasos:

1. Se aplica la técnica de Descomposición en Valores Singulares, obteniendo los autovalores y autovectores (ecuación 6), donde Σ es una matriz diagonal en la cual cada elemento de la diagonal Σ_i es igual a $\sqrt{\lambda_i}$, la raíz cuadrada de los autovalores de $A = ECG_{QT}^T ECG_{QT}$, las matrices U y V representan los autovectores [3].

$$ECG_{QT} = U \Sigma V^T \quad (6)$$

Tabla 1: Parámetros de la Variabilidad del intervalo QT, QTc, QT_{SVD}, QT_{RVA}, QT_{ML} para pacientes chagásicos y sujetos de control.

Parámetro	Chagásicos (Media±SD)	Control (Media±SD)	p (p<0.05)
QT (mseg)	398,90 ± 35,0	383,56 ± 31,18	0
QTc (mseg)	420,60 ± 27,01	434,56 ± 29,11	0
QT _{SVD} (mseg)	396,50 ± 64,70	367,30 ± 45,96	0
QT _{RVA} (mseg)	374,52 ± 37,46	362,01 ± 44,29	0
QT _{ML} (mseg)	400,05 ± 36,64	385,29 ± 31,85	0

2. Se reconstruye el *ECG_QT* en el nuevo espacio de características en base a los autovectores, multiplicando *ECG_QT* por los autovectores (ver la ecuación 7).

$$ECG_{SVD} = V_R^T * ECG_{QT} \quad (7)$$

donde *ECG_SVD* representa la matriz de datos transformados [3] y V_R^T está formada por el autovector perteneciente a V^T asociado al mayor de los autovalores.

3. Después, en ésta señal *ECG_SVD* se aplica la metodología descrita en la primera y segunda fase para determinar el valor de intervalo QT con la variante de que en este caso solo se va a realizar para una derivación.

4.3 Resultados

Se realizó una validación preliminar de la herramienta. Para ello, en cada uno de los pacientes chagásicos y sujetos de control, se determinó el intervalo QT para 300 complejos QRS válidos, el intervalo QT corregido mediante la técnica de Bazett, el QT_{SVD}, QT_{RVA} y QT_{ML}. Se utilizó el análisis de varianza de un factor para determinar cambios estadísticamente significativos (p<0.05 y F>1) entre el grupo de pacientes chagásicos y el grupo de control.

La "Tabla 1" muestra la media, desviación estándar y valor de p entre chagásicos y sujetos de control para el parámetro QT, QTc, QT_{SVD}, QT_{RVA}, QT_{ML} para Chagásicos y sujetos de control. Como es apreciable, los parámetros QT, QTc, QT_{SVD}, QT_{RVA}, QT_{ML} producen diferencias estadísticamente significativas entre sujetos de control y pacientes chagásicos (p < 0,05), por ejemplo, para el grupo de chagásicos se obtiene un valor para QT de 398,90 mseg a nivel de media y para el parámetro QT_{SVD} de 396,50 mseg, 374,52 mseg para QT_{RVA} y 400,05 mseg para QT_{ML}, lo cual demuestra la relación entre el valor de QT determinado y los valores de QT_{SVD}, QT_{RVA}, QT_{ML}, parámetros que según [6] deben estar correlacionados. En las pruebas realizadas se constató que el software presenta errores inferiores al 5% en la estimación del intervalo QT. Los algoritmos de procesamiento implementados son validados utilizando como referencia una aplicación similar denominada CardioSoft y una base de datos anotada [5].

5 CONCLUSIONES

Los pacientes chagásicos presentan cambios en la repolarización cardíaca respecto al grupo de control, tal como se observó en los resultados obtenidos en [7],[8] y [1] para chagásicos. Ello

podría ser consecuencia del incremento en el período total de los procesos de despolarización y repolarización ventricular, lo cual podría sugerir anomalías en el funcionamiento de los canales cardíacos de sodio [8].

Agradecimientos

Los autores agradecen al CDCHT de la Universidad de los Andes y al Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL) por el soporte al proyecto 0007-2009.

REFERENCES

- [1] PUEYO, E., LACIAR, E., ANZUOLA, E., LAGUNA, P., & JANÉ, R., Pendientes del QRS para la evaluación del daño miocárdico en pacientes chagásicos crónicos, *XVI Congreso Argentino de Bioingeniería (SABI2007)*, pp. 543-546, 2007.
- [2] VAPNIK, V., *The Nature of Statistical Learning Theory*, Ed. Springer Verlag, 1995.
- [3] CLIFFORD, G., AZUAJE, F., & MCSHARRY, P., *Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis*, Ed. Artech House, 2006.
- [4] DUGARTE, N., CUADROS, J., MEDINA, R., ROJAS, R., JUGO, D., & NUÑEZ, T., Sistema de Adquisición Multicanal y Análisis de la señal Electrocardiográfica de alta resolución aplicado a pacientes chagásicos, *Proceeding of XI Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIMENICS 2012)*, pp. PS31-PS36, 2012.
- [5] CUADROS, J., MEDINA, R., BRAVO, R., & T. NUÑEZ., Analysis of QT interval in patients with Chagas Disease, *Proceeding of VIII International Seminar on Medical Information Processing and Analysis (SIPAIM 2012)*, pp. 234-241, 2012.
- [6] SCHLEGEL, T., & STAR, V., Real-time multichannel system for beat-to-beat QT interval variability, *Journal of Electrocardiology*, vol. 39, n. 4, pp. 358-367, 2006.
- [7] QUIROZ, F., MORILLO, C., CASAS, J., CUBILLOS, L., CHINCHILLA, M., & SILVA, F., Características clínicas, electrocardiográficas y ecocardiográficas de la cardiomiopatía chagásica en la población santandereana, *Revista Colombiana de Cardiología*, vol. 13, n. 3, pp. 149-153, 2006.
- [8] JUGO, D., SCHLEGEL, T., ARENARE, B., NUÑEZ, T., & MEDINA, R., Parámetros que mejor identifican la presencia de miocardiopatía chagásica a partir del electrocardiograma superficial, *Proceedings of IV Latin American Congress on Biomedical Engineering 2007, Bioengineering Solutions for Latin America Health CLAIB2007*, vol. 18, pp. 1163-1167, 2007.

ESTUDIO ELECTROMAGNÉTICO DEL GENERADOR 1 DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO “MANUEL PIAR”, CONECTANDO SU DEVANADO AMORTIGUADOR ENTRE POLOS DURANTE UN RÉGIMEN TRANSITORIO

Anderson J Glod

andersonglod@gmail.com

Pedro J Carvajal

pedrocarvajal54@gmail.com

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Bolívar-Venezuela.

Enmel J Matínez

Central Hidroeléctrica Simón Bolívar. CORPOELEC. Bolívar-Venezuela.

emimartinez@corpoelec.gob.ve

Emilio E Martínez

emimartinez@corpoelec.gob.ve

Juan Toledo

jtoledo@corpoelec.gob.ve

Proyecto Hidroeléctrico Tocoma. CORPOELEC. Bolívar-Venezuela.

Resumen. *El objetivo de este estudio está enfocado en evaluar el comportamiento electromagnético obtenido del Generador 1 de la Central Hidroeléctrica Manuel Piar en Tocoma bajo un régimen transitorio con la particularidad de que su devanado amortiguador incrustado en cada cara polar del rotor esté conectado polo a polo formando una especie de anillo de cobre alrededor de la máquina, comparándolo además con la respuesta operacional obtenida sin esta conexión. Esta investigación se ejecutó por medio de un modelo geométrico computacional proporcional al Generador real creado a través del Software de simulación numérica utilizado, Flux2D[®], sometiéndolo a simulaciones con la finalidad de conseguir las curvas características de circuito abierto y cortocircuito sostenido (régimen permanente) y su conducta ante un cortocircuito repentino (régimen transitorio), conjuntamente con la obtención de las reactancias transitorias y subtransitorias del eje directo de la máquina. La validez de los resultados fueron comparados con los parámetros previamente suministrados por el fabricante.*

Palabras Clave: Devanado Amortiguador, Modelo Geométrico Computacional, Flux2D[®], Régimen Transitorio, Método Elementos Finitos.

1. INTRODUCCIÓN

El Proyecto Tocomá es el último de los desarrollos hidroeléctricos que constituyen el aprovechamiento del complejo Hidroeléctrico del Bajo Caroní, simultáneamente con las centrales Guri, Macagua y Caruachi en operación comercial. La Unidad de Proyectos Eléctricos de Supervisión y Control conjuntamente con La Unidad del Proyectos de Inspección de Instalaciones Eléctricas de Supervisión y Control de Tocomá-CORPOELEC, llegaron a un acuerdo de no conectar polo a polo (interpolarmente) el devanado amortiguador de los diez generadores que conforman la central. Por esto, CORPOELEC contempló el estudio del comportamiento electromagnético aplicado al Generador de la Unidad 1 del Proyecto hidroeléctrico para analizar su respuesta operacional en régimen permanente y en presencia de transitorios, por lo tanto, se estudiarán los riesgos de una nueva alternativa de conexión entre los polos del rotor del punto de vista eléctrico con el propósito aumentar el nivel de eficiencia del Generador.

Para el proceso de análisis en esta investigación se utilizó el Software Flux2D[®], que se basa en la aplicación del Método de Elementos Finitos (MEF). Esta herramienta permite realizar el estudio de fenómenos electromagnéticos dentro de los Generadores; para obtener el comportamiento esperado de estas maquinarias sometidas a ciertas condiciones ya establecidas, sin necesidad de llegar a fabricar físicamente un prototipo o modelo de ensayo.

2. DEVANADO AMORTIGUADOR

El Generador de cada Unidad se compone principalmente de una parte móvil (rotor) y de una parte fija (estator). El rotor instalado en los generadores del complejo presenta expansiones polares, lo que hace que se denomine máquina de polos salientes. [1] Cada cara polar presenta un devanado amortiguador el cual consiste en barras amortiguadoras dispuestas paralelamente, conectadas a un segmento amortiguador de cobre con el propósito de estar cortocircuitadas formando de esta manera una especie jaula de ardilla en cada polo. [2]

El devanado amortiguador mejora las características del rendimiento de las máquinas sincrónicas fundamentalmente durante las fases transitorias, su finalidad es amortiguar los campos rotatorios opuestos al sentido del campo giratorio del entrehierro, de lo contrario, se causarían grandes pérdidas. Es decir, disminuye las fluctuaciones de la velocidad de rotación al rotar las cargas con pares pulsatorios, y garantiza un buen par de arranque cuando la máquina está comenzando como una máquina asincrónica.

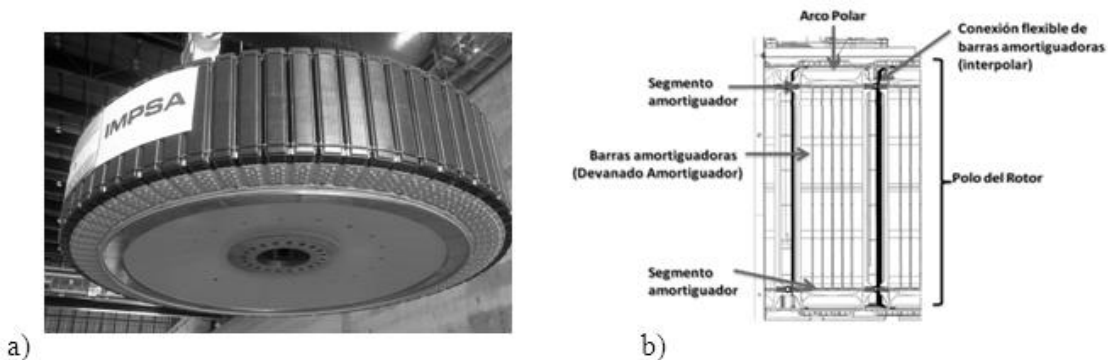


Figura 1. a) Rotor del Generador de la Unidad 1 del Proyecto Tocomá b) Estructura del devanado amortiguador en el polo de una máquina de polos salientes.

3. FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE FLUX2D©

Flux2D© es un software de simulación numérica utilizado en Diagnóstico Asistido por Computadora (CAD). Se utiliza el método de elementos finitos permitiendo el cálculo de los estados magnéticos, eléctricos o térmicos de dispositivos en regímenes permanentes, transitorios y armónicos. Esto requiere la resolución de diversas ecuaciones: Maxwell, calor, Ley de comportamiento de los materiales, entre otras. Esta condición permite calcular diversas cantidades de tipo global o local: campos, potenciales, flujos, energía, fuerza, etc. Por la complejidad de la resolución simultánea de esas ecuaciones el código está dividido en un conjunto de módulos encargados de resolver cada uno un tipo de problema dado (es decir las ecuaciones a utilizar y las hipótesis asociadas).

El proceso de resolución cuando se utiliza esta herramienta consiste en crear una geometría en donde se especifican las medidas del modelo geométrico necesario para realizar la forma procesada en la interfaz del dispositivo a estudiar, así como la declaración de superficies, entornos y el mallado del mismo. Se deberá asociar a la geometría un modelo circuital al cual se le aplicarán las pruebas en régimen permanente y transitorio.

4. DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA UTILIZADA (1/20 DE MÁQUINA)

Los generadores del Proyecto Tocola poseen cuatro (4) circuitos eléctricos en paralelo en el devanado de armadura. Con tan solo una quinta parte de un circuito sería suficiente para la aplicación del estudio deseado, es decir, la geometría necesaria para el desarrollo satisfactorio de la investigación fue un veinteavo (1/20) de Generador de la Unidad 1.

Se decidió usar un veinteavo de la máquina, ya que en esa fracción se cumple la simetría y periodicidad del devanado estatórico, el cual es ondulado, siendo esta configuración la sección mínima del Generador que se puede representar para obtener valores proporcionales a la máquina completa. Se tomó como referencia desde la ranura No 1 hasta la No 30. Las herramientas del Software facilitaron de manera práctica la digitalización del modelo de la investigación.

Con el estudio adaptado al Generador de la primera Unidad será suficiente para conocer la conducta que adoptarían las nueve (9) restantes en los escenarios planteados ya que serán fabricadas con las mismas especificaciones, características y capacidades.

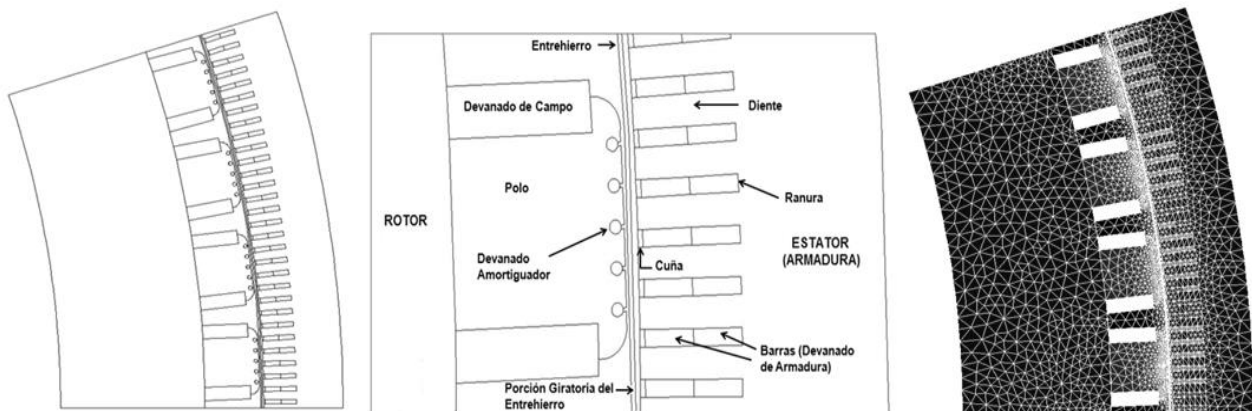


Figura 2. a) Modelo geométrico del Generador de la Unidad 1, de 4 polos y 30 ranuras (1/20 de máquina) b) Porción del modelo del Generador (1 polo, 8 ranuras) c) Mallado del Modelo

5. SIMULACIONES DEL MODELO GEOMÉTRICO ESTUDIADO (4 POLOS, 30 RANURAS)

Luego de haber completado los circuitos, las curvas de saturación de los materiales y añadir las propiedades físicas a las regiones del modelo geométrico computacional; se procedió a realizar las corridas o simulaciones sometiendo a la porción estudiada del generador a fenómenos, de manera de obtener la variación de sus parámetros y evaluar sus condiciones de operación y respuesta. Cabe resaltar, que en cada evento se usó una configuración circuital diferente debido a que la máquina será expuesta ciertas condiciones en cada caso. Se llevó a cabo la obtención de la curva característica en circuito abierto (OCC), la línea de entrehierro (Air Gap Line) y de cortocircuito sostenido (SCC) siguiendo los pasos establecidos por el estándar IEEE 115 -2002[3], en estas pruebas el generador estará en régimen permanente. De la misma forma, también se evaluará su respuesta sometándolo a un cortocircuito trifásico repentino (régimen transitorio) tanto con el devanado amortiguador conectado como desconectado polo a polo. Es de suma importancia destacar que se verificó la validez de los valores de los parámetros calculados en este estudio comparándolos con los resultados dados por el fabricante.

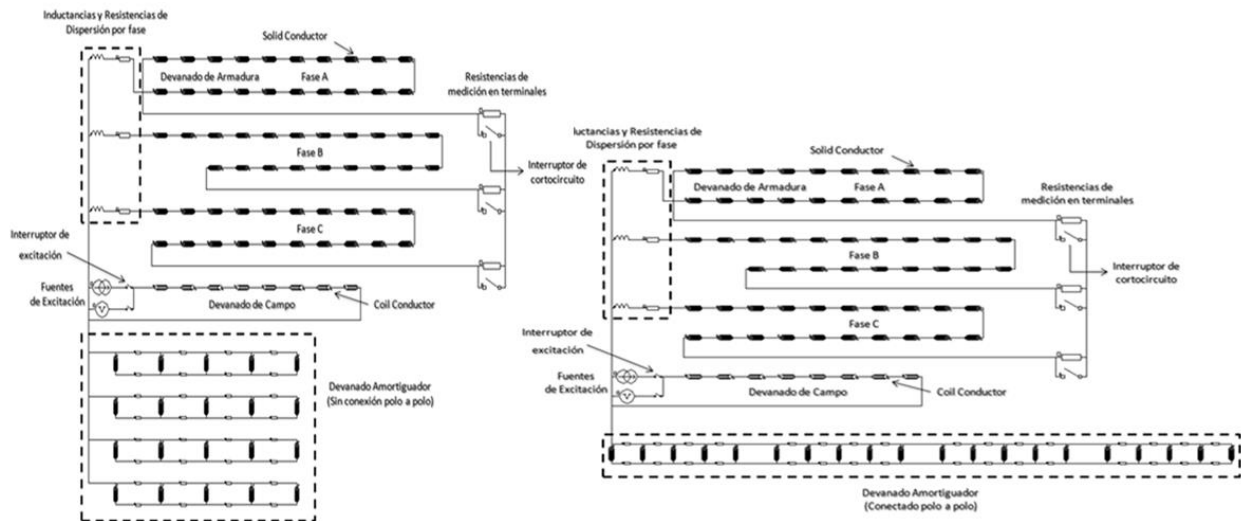


Figura 3. a) Configuración Circuital correspondiente al cortocircuito trifásico repentino con el devanado amortiguador desconectado polo a polo b) Configuración Circuital correspondiente al cortocircuito trifásico repentino con el devanado amortiguador conectado polo a polo.

6. RESULTADOS

La curva de circuito abierto en su comienzo posee un comportamiento lineal, pero este es alterado ya después de pasar los 890 amperios (corriente nominal), debido al aumento de la corriente de campo relacionado con las propiedades magnéticas de los materiales que componen el generador, lo cual indica un grado de saturación existente. La línea del entrehierro (Air Gap Line) se obtuvo a partir de la curva de saturación de circuito abierto, extendiendo una línea recta desde la porción baja de la curva desde el origen. Finalmente, la curva característica de cortocircuito (SCC) es lineal, ya que en estas condiciones el campo magnético neto de la máquina es tan pequeño en estas condiciones que la máquina no se satura.

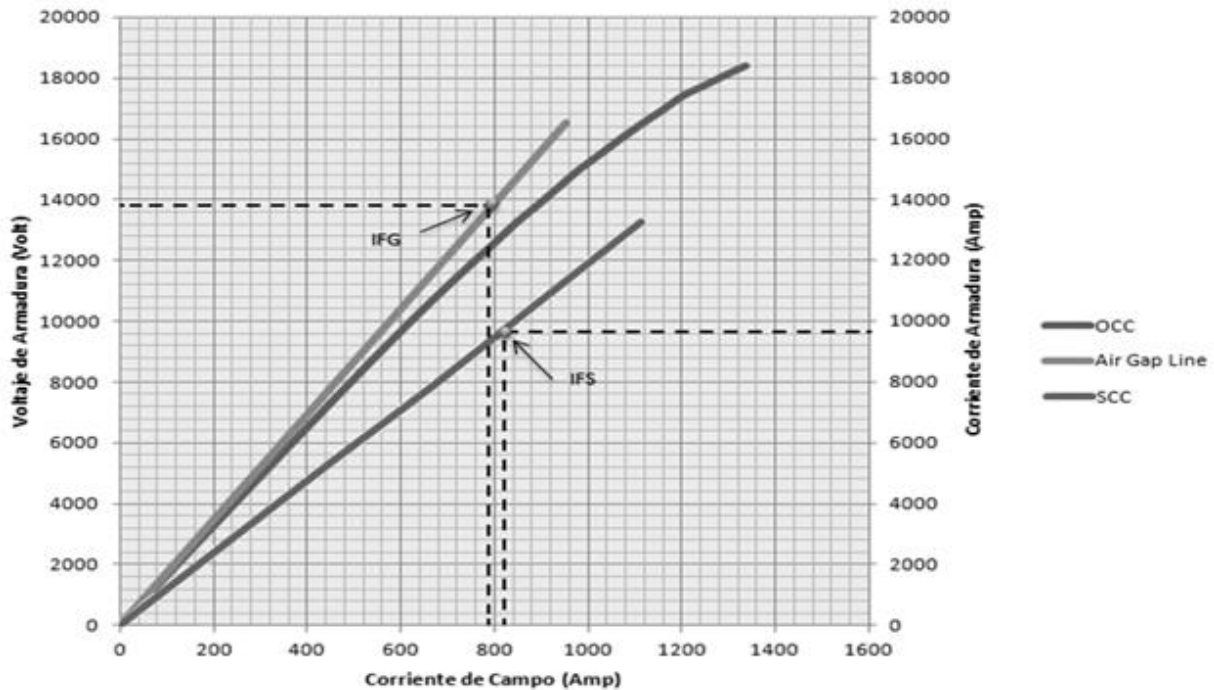


Figura 4. Curva característica de Circuito Abierto, Cortocircuito sostenido y línea de entrehierro obtenida a través de Flux2D[®]

La reactancia X_d se obtiene tomando el valor de corriente de campo I_{FS} que corresponde a la corriente nominal de armadura I_a en la curva de cortocircuito entre la corriente de campo que corresponde al voltaje nominal de armadura I_{FG} de la línea de entrehierro.

Tabla 1. Reactancia del eje directo (Régimen Permanente)

Parámetro	Flux2D [®]	Fabricante	Desviación (%)
X_d	1,042 p.u.	1,053 p.u.	-1,044

Las reactancias transitorias y subtransitorias del eje directo de un sistema trifásico son determinada a partir de las formas de ondas de corriente formadas por un cortocircuito repentino aplicado a la máquina operando a circuito abierto en velocidad nominal. [3] Se usaron las envolventes positivas y negativas generadas en la fase C para luego calcular las distancias entre ellas. En efecto, el proceso de cálculo de las reactancias se llevo a cabo para dos casos, la aplicación del transitorio con el devanado amortiguador conectado y desconectado polo a polo.

Tabla 2. Resultados de parámetros transitorios y subtransitorios del modelo geométrico por medio de Flux2D (Devanado amortiguador no conectado polo a polo)

Parámetro	Flux2D [®]	Fabricante	Desviación (%)
$X'd$	0,364 p.u.	0,366 p.u.	-0,54
$X''d$	0,289 p.u.	0,277 p.u.	4,33
$T'd$	2,091 segs	2,20 segs	-4,95
$T''d$	0,039 segs	0,041 segs	-4,87

Tabla 3. Resultados de parámetros transitorios y subtransitorios del modelo geométrico por medio de Flux2D (Devanado amortiguador conectado polo a polo)

Parámetro	Flux2D [®]	Fabricante	Desviación (%)
$X'd$	0,368 p.u.	0,366 p.u.	0,54
$X''d$	0,295 p.u.	0,277 p.u.	6,49
$T'd$	2,08 segs	2,20 segs	-5,45
$T''d$	0,038 segs	0,041 segs	-7,31

7. CONCLUSIONES

1. La información técnica referente a las dimensiones, características de diseño y materiales a usar en la construcción de los generadores del Proyecto Tocomá permitió crear un modelo geométrico computacional de cuatro polos y treinta ranuras (un veinteavo de máquina) en dos dimensiones a través de Flux2D[®], el cual arrojó resultados muy cercanos con respecto a los suministrados por el fabricante, lo que lo convierte en una herramienta base de alta confiabilidad y validez para futuros estudios o determinación de otros parámetros fuera del alcance de esta investigación.
2. A través del módulo de transitorio magnético y de entrehierro giratorio ofrecido por Flux2D[®] se pudo conocer el comportamiento electromagnético del Generador considerando el efecto de inducción de la armadura, demostrando el comportamiento de las máquinas sincrónicas.
3. Por medio de la curva característica de circuito abierto (OCC), cortocircuito sostenido (SCC) y línea de entrehierro se determinó la reactancia del eje directo (X_d) y por medio de las envolventes resultantes de las ondas de corriente obtenidas mediante el cortocircuito repentino se calcularon las reactancias transitorias (X'_d) y subtransitorias (X''_d) del eje directo de la máquina, cuyo margen de error porcentual fue aceptable $\pm 8\%$ aproximadamente, con respecto a las suministradas por el fabricante, ya que el rango máximo de tolerancia admisible por el estándar IEEE C 50.12 -2005 es de $\pm 30\%$ [4].
4. Se comprobó que, eléctricamente, la conexión del devanado amortiguador polo a polo en el rotor no constituye un riesgo para la máquina, debido a que su respuesta operacional no estuvo afectada por esta configuración.

8. REFERENCIAS

- [1]. Concordia, C. *Synchronous Machines Theory and Performance*. Chapman & Hall, LTD, 1958.
- [2]. Pyröhen, J. *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, 2008.
- [3]. IEEE. *Test Procedures for Synchronous Machine*. Nueva York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2002
- [4]. IEEE. *Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2005.

CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET Y TRANSFORMADA DE HILBERT

Franklin Yusti

Carlos Jiménez

fyusti@hotmail.com

carlosjimenezing@gmail.com cjimenez@uc.edu.ve

Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Bárbula, Municipio Naguanagua. Estado Carabobo.

Resumen. *Se presenta el desarrollo de un procedimiento para el cálculo de la potencia eléctrica reactiva (VAR), mediante la Transformada de Wavelet y la Transformada de Hilbert, las cuales se aplican directamente a las muestras de las señales de tensión y de corriente, provenientes de sistemas bajo condiciones sinusoidales o no sinusoidales. Se utilizó la Transformada de Hilbert para desfasar a una de las dos señales (la señal de tensión) en noventa grados con respecto a la otra (la de corriente). Luego se les aplicó la Transformada Wavelet a ambas señales y se obtuvo la potencia reactiva, a través de la sumatoria del producto de los vectores de los coeficientes de wavelet de las señales. El proceso desarrollado fue implementado en lenguaje SCILAB, y las pruebas se realizaron a señales de tensión y corriente muestreadas a 128 puntos de un período y 1024 puntos de un período para el caso sinusoidal más ruido gaussiano. Se trabajó con las wavelet Daubechies y se calcularon los vectores de los coeficientes de wavelet hasta un máximo de siete niveles de descomposición. Se realizó el cálculo de la potencia eléctrica reactiva para cuatro tipos de señales, una condición sinusoidal: tensión y corriente en fase, tensión y corriente desfasada 60°; y una condición no sinusoidal: onda cuadrada de tensión y corriente en fase, onda sinusoidal con ruido aleatorio añadido y se observó la variación del resultado al calcular la potencia para los distintos niveles de descomposición y para los distintos sistemas Daubechies (desde Daubechies1 hasta el Daubechies8). Se compararon los resultados con valores teóricos obtenidos mediante fórmulas matemáticas y se resumieron en una tabla los resultados obtenidos con mayor margen de error absoluto cometido para mostrar que aún así estas aproximaciones de los resultados son aceptables debido a que los errores absolutos cometidos son menores a ± 0.2 . Se logró determinar que la Transformada de Hilbert puede ser utilizada como parte del procedimiento para calcular la potencia reactiva (Q) ya que se necesita producir un desfase de 90° en la señal de tensión o en la señal de corriente.*

Palabras Claves: Potencia, Reactiva, Wavelet, Transformada, Hilbert.

1. INTRODUCCION

Conceptualizar la potencia eléctrica en condiciones no sinusoidales ha sido un trabajo que ha requerido esfuerzo por parte de los investigadores sobre todo al momento de definir la potencia reactiva Q . En esta investigación se presenta el desarrollo de un algoritmo para el cálculo de la potencia reactiva Q que hace uso de la Transformada de Hilbert y de la Transformada Wavelet aplicadas directamente sobre las muestras de las señales de tensión y de corriente, siendo estas provenientes de sistemas bajo condiciones sinusoidales o no sinusoidales. Se diseñó una librería de funciones implementadas en SCILAB que calculan las Transformada Wavelet y la de Hilbert a las muestras de las señales de tensión y de corriente para obtener la potencia reactiva Q . Se utilizó la Transformada de Hilbert para desfazar a una de las dos señales (la señal de tensión) en noventa grados con respecto a la otra (la de corriente) y la Transformada Wavelet se aplicó a ambas señales para obtener la potencia reactiva, a través de la sumatoria del producto de los vectores de los coeficientes de wavelet de las señales.

1.1. Potencia reactiva

“Considerando la definición propuesta en Djokic et al., [1] La Energía Reactiva es una cantidad perfectamente medida en vatios*hora si se utiliza un medidor el cual deje a la señal de corriente intacta y procese a la señal de voltaje mediante un circuito cuya salida es el mismo voltaje pero desfasado 90° , manteniendo la magnitud del voltaje original”. Si $v(t)$ e $i(t)$ representan las señales de tensión y corriente respectivamente; la Ec. (1) y la Ec. (2) muestran tanto la forma continua como la forma discreta para determinar el valor de la potencia reactiva Q .

$$Q = \frac{1}{T} \int^T i(t)v(t - \tau)dt \quad (1)$$

$$Q = \sum I_{hrms} V_{hrms} \cos\left(\theta_h - h\frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

El valor de τ es tomado como $\frac{1}{4}$ del ciclo de la frecuencia fundamental y representa la diferencia de fase entre $v(t)$ e $i(t)$ en el armónico h . A partir del voltaje $v(t)$ se obtiene el voltaje en cuadratura $v_{90}(t)$ el cual tiene desfasada cada componente de frecuencia de $v(t)$ en 90° sobre su rango. Por lo tanto si $v_{90}(t)$ e $i(t)$ son señales periódicas con período T , entonces, la potencia reactiva Q viene dada según la Ec. (3) [2]:

$$Q = \frac{1}{T} \int^T v_{90}(t)i(t)dt \quad (3)$$

Ahora bien, las señales analógicas $i(t)$ y $v_{90}(t)$ son señales periódicas con periodo T , $i[n]$ y $v_{90}[n]$ son formas discretizadas de $i(t)$ y $v_{90}(t)$ respectivamente con $n=0, 1, \dots, 2^{N-1}$ dentro del periodo T . Realizada la Transformada Wavelet a la señal de tensión $v_{90}[n]$ y de la señal de corriente $i[n]$ se obtienen los vectores wavelet (en cualquier nivel de descomposición) que representan cada una de las señales los cuales se denotarán por $V_{w90}[n]$ e $I_w[n]$ respectivamente para luego calcular Q aplicando la Ec. (4).

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v_{90}(t) i(t) dt \cong \frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} v_{90}[n] i[n] = \frac{1}{2^N} \sum_{n=0}^{2^N-1} V_{w90}[n] I_w[n] \quad (4)$$

Como se observa en la Ec. (3) y la Ec. (4) se necesita obtener un voltaje en cuadratura a partir de $v(t)$. Para lograrlo, Yoon [2] utilizó DIGITAL 90° PHASE-SHIFT NETWORKS. Estas redes digitales generalmente usan como procedimiento para obtener el voltaje en cuadratura *El Método De Igual Ripple o El Método de Maximo Flat*. Otra técnica para obtener un voltaje en cuadratura es propuesto por Croes [3] mediante la transformada wavelet compleja. En este artículo se utilizará la TRANSFORMADA DE HILBERT como procedimiento alternativo para solucionar el problema de obtener un voltaje en cuadratura a partir de una señal de voltaje dada.

1.2. Transformada de Hilbert

En particular, cuando las componentes angulares de una señal han sido desfasadas $\pm 90^\circ$, la función resultante se denomina Transformada de Hilbert de la señal. Para una señal $g(t)$ su transformada de Hilbert se denotará por $H[g(t)]$ y vendrá dada por a Ec. (5)

$$H[g(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (5)$$

De la definición de la transformada de Hilbert se deduce que $H[g(t)]$ no es más que una convolución, por lo tanto, se puede expresar la transformada de Hilbert mediante la Ec. (6).

$$H[g(t)] = g(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (6)$$

A partir de la propiedad de convolución en el dominio del tiempo de la transformada de Fourier, se obtiene:

$$F\{H[g(t)]\} = F\left\{g(t) * \frac{1}{\pi t}\right\} = F[g(t)]F\left[\frac{1}{\pi t}\right] \quad (7)$$

La transformada de Fourier $F[g(t)]$ se denotará por $G(f)$, mientras que para la función $1/\pi t$ su transformada de Fourier es:

$$F\left[\frac{1}{\pi t}\right] = -j \text{Sgn}(f) \quad (8)$$

De esta manera se obtiene como resultado de la Transformada de Fourier de la transformada de Hilbert de una señal cualquiera $g(t)$ a:

$$F\{H[g(t)]\} = F\left\{g(t) * \frac{1}{-j\pi}\right\} = F[g(t)]F\left[\frac{1}{-j\pi}\right] = -jSgn(f)G(f) \tag{9}$$

En la Ec. (9) se observa que en el último miembro de la igualdad, en el que aparece el resultado de aplicar Transformada de Fourier a la transformada de Hilbert $F\{H[g(t)]\} = -jSgn(f)G(f)$, la amplitud de $G(f)$ no se modifica para ningún valor de frecuencia y en la Fig. 1 se observa la respuesta en fase de la Transformada de Hilbert, la cual introduce un desfase de -90° para frecuencias positivas y 90° para frecuencias negativas.

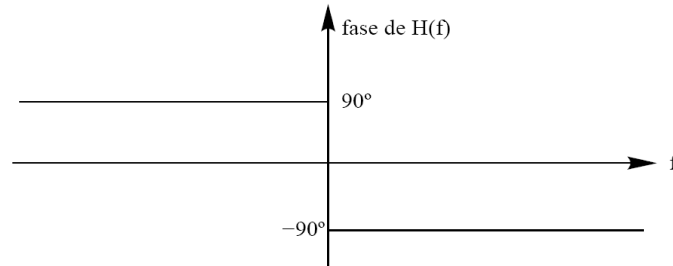


Figura 1: Respuesta en fase de la Transformada de Hilbert, se observa que este sistema introduce un desfase de -90° para frecuencias positivas y 90° para frecuencias negativas.

2. METODOLOGÍA

El procedimiento para la obtención de la potencia reactiva Q es mostrado en la Fig. 2, allí se observa que la señal de tensión es desfasada 90° a través de un proceso que le calcula la transformada de Hilbert, la señal de corriente no se desfasa, luego ambas señales son procesadas a través de la Transformada Wavelet para finalmente obtener la medición de la potencia reactiva Q mediante un proceso que realice la aplicación de la Ec. (4). El proceso se implementó en lenguaje SCILAB y fue aplicado a señales de tensión y corriente para condiciones sinusoidales y para condiciones no sinusoidales. [2,4,5,6,7]

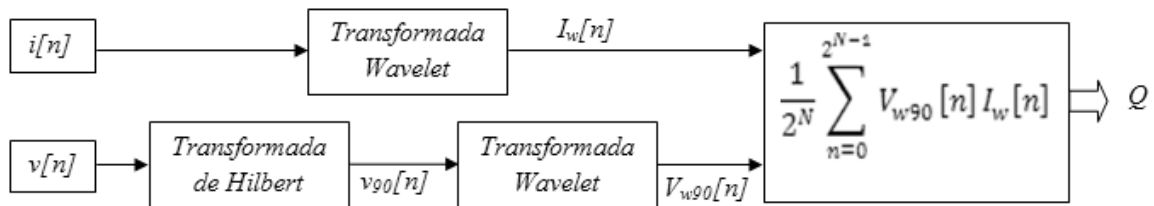
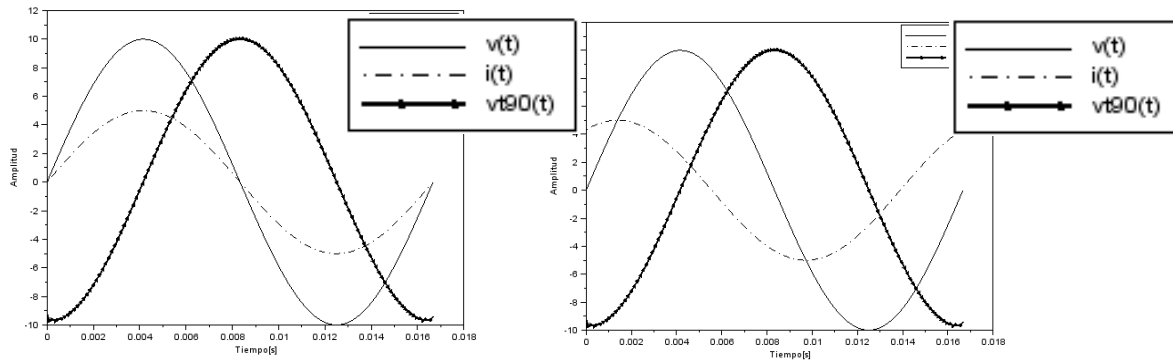


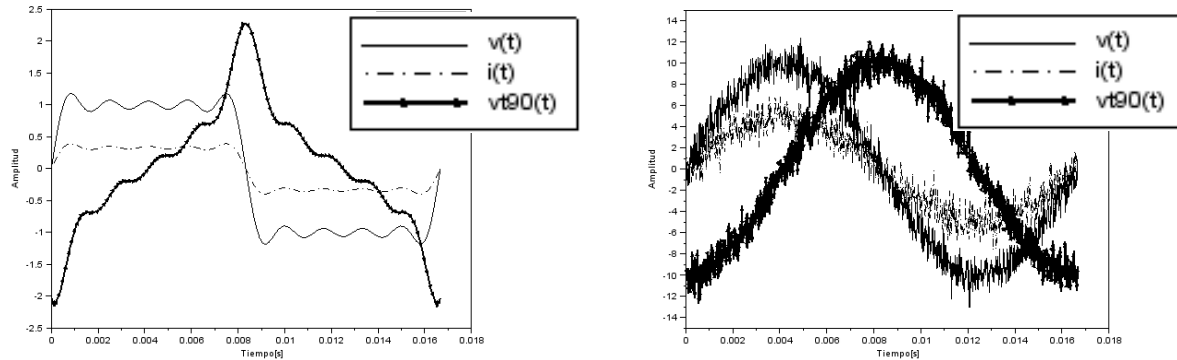
Figura 2: Diagrama del nuevo sistema de medición de potencia reactiva Q utilizando Transformada de Hilbert y Transformada Wavelet

3. RESULTADOS

Para la condición sinusoidal se utilizaron señales como las mostradas en la Fig. 3. Para la condición no sinusoidal se utilizaron señales como las mostradas en la Fig. 4, se muestran respectivamente tensión y corriente en forma de onda cuadrada y tensión y corriente sinusoidal más ruido gaussiano añadido para convertir la situación sinusoidal en no sinusoidal.



a b
 Figura 3: Onda sinusoidal de tensión y corriente en fase, 3a) $v(t)=10*\sin(2\pi 60t)$ e $i(t)=5*\sin(2\pi 60t)$. 3b) $v(t)=10*\sin(2\pi 60t)$ e $i(t)=5*\sin(2\pi 60t+\pi/3)$



4a 4b

Figura 4a) Ondas cuadradas de tensión y corriente en fase, y la tensión en cuadratura. 4b) Gráfica de la corriente, el voltaje y el voltaje en cuadratura para una onda sinusoidal con ruido añadido.

1) Se realizaron pruebas en señales de tensión y corriente muestreadas en 128 puntos de un período y 1024 puntos de un período para el caso sinusoidal más ruido gaussiano añadido. Se trabajó en los sistemas wavelet desde el Daubechies1 hasta el Daubechies8, se compararon los resultados con valores teóricos obtenidos mediante fórmulas matemáticas y se resumieron en una tabla los resultados obtenidos con mayor margen de error absoluto cometido, los resultados obtenidos presentan errores absolutos s menores a ± 0.2 .

2) Para cada caso de estudio (condición sinusoidal y condición no sinusoidal) se simularon señales compuestas de 128 muestras lo que permitió realizar siete niveles de descomposición en las mismas, en cada nivel de descomposición se realizaron los cálculos de la potencia eléctrica, obteniéndose los resultados con errores absolutos menores a 0.0001.

3).Se realizó el cálculo de la potencia eléctrica para cuatro tipos de señales (Condición sinusoidal: Tensión y corriente en fase, tensión y corriente desfasada 60°; Condición no sinusoidal: Onda

cuadrada de tensión y corriente en fase, onda sinusoidal con ruido aleatorio añadido) y se observó que la variación del resultado al calcular la potencia para los distintos niveles de descomposición y para los distintos sistemas Daubechies (desde Daubechies1 hasta el Daubechies8) mantenía errores absolutos menores a 0.0001.

4) Se determinó que la Transformada de Hilbert puede ser utilizada como parte del procedimiento para calcular la potencia reactiva (Q) ya que se necesita producir un desfase de 90° en la señal de tensión o en la señal de corriente, los resultados de este método fueron comparados en el caso de situación sinusoidal y se obtuvieron resultados con errores absolutos menores a 0.0001 de potencia reactiva.

4. CONCLUSIONES

Se comprobó la funcionalidad de la Transformada de Hilbert para realizar el desfase de una de las señales en noventa grados para cumplir con la definición en el cálculo de la potencia reactiva. Igualmente se hizo la descomposición de las señales de tensión y corriente, mediante la transformada de wavelet en siete de descomposición con la familia de Daubechies, y aplicando el teorema de Parseval se obtuvo el valor de la potencia reactiva. Los resultados mostrados indican la funcionalidad de la metodología presentada.

REFERENCIAS

- [1] Djokic, B., & Bosnjakovic, P., New Method for Reactive Power and Energy Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. vol. 41, pp. 280-285. 1992.
- [2] Yoon, W., & Devaney, M., Reactive Power Measurement Using The Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49. N° 2. 2000.
- [3] Croes, T., Gherasim, C., Van den Keybus, J., & Ghijselen, J., Power Measurement Using The Wavelet Transform Of Analytic Signals. *K.U. Leuven Research Council and the Fund for Scientific Research-Flanders* (Belgium, F.W.O). 2001.
- [4] Czarnecki, L., What is Wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Power and Why It Should be Abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. vol IM-36, No.3. 1987.
- [5] Escobar, A., Holguín, G., & Orozco, A., Medición de Potencia Activa en condiciones no sinusoidales utilizando la transformada wavelet. *Scientia et Técnica* año XI, No 27. UTP. ISSN 0122-1701. 2005.
- [6] Makram, R., & Girgis A., Effect of Harmonic Distortion in Reactive Power Measurement. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, #4, July/August 1992.
- [7] Quispe, E., & Aguado, J., Conceptualización para la Medición de la Potencia Reactiva Incluyendo el Efecto de los Armónicos de Tensión y Corriente. *Universidad Autónoma de Occidente, Cali-Colombia. Grupo de Máquinas Eléctricas y Calidad de la Energía*. 2002.

PREDICCIÓN MEJORADA DE NEUROPATOLOGÍAS BASADA EN ANÁLISIS DE LA DINÁMICA NO LINEAL DEL EEG USANDO RESONANCIA ESTOCÁSTICA

César Seijas

Antonino Caralli

Sergio Villazana

cseijas@uc.edu.ve

acaralli@uc.edu.ve

svillaza@uc.edu.ve

Centro de Investigación en Bioingeniería, Universidad de Carabobo

Fac. de Ingeniería, Av. Universidad, Bárbula, Valencia-Venezuela

Resumen. *La epilepsia constituye una de las neuropatologías más frecuente y de gran deterioro en la calidad de vida de los pacientes que la padecen. En este artículo se presenta un modelo para detectar esta neuropatología a partir del procesamiento de electroencefalogramas (EEG) usando análisis de dinámica no lineal. El modelo desarrollado está basado en un clasificador con máquinas de aprendizaje (máquinas de vectores de soporte) de desempeño mejorado usando resonancia estocástica. Como se verifica en el presente estudio, los EEG son conjuntos de series de tiempo que exhiben dinámica no lineal (caótica). De cada conjunto, se elige como señal a procesar, la serie de tiempo con máxima densidad espectral de potencia y se registra la frecuencia a la cual ocurre su valor pico. Esta señal, luego es segmentada en sub-series caóticas y contaminada con ruido blanco aditivo; la potencia óptima de ruido es la que produciría un pico en la respuesta señal/ruido (resonancia estocástica), en un experimento simulado de un comparador electrónico biestable excitado por una señal sinusoidal, con ruido añadido, a la frecuencia previamente registrada, y de valor pico ligeramente debajo del umbral de comparación. El clasificador discrimina sobre vectores conformados por el rasgo caótico, dimensión de correlación y rasgos espectrales extraídos de cada sub-serie. Se usan como datos de entrenamiento y de prueba del clasificador, EEG de pacientes con diagnóstico comprobado de epilepsia y pacientes de control y se compara el desempeño del clasificador sin ruido y con ruido “óptimo” sumado. La predicción con ruido añadido supera en más de 6% el caso sin ruido, evidenciando un impacto positivo en la calidad del modelo de predicción, del fenómeno conocido como resonancia estocástica.*

Palabras claves: EEG, caos, epilepsia, resonancia estocástica, máquinas de aprendizaje.

1. INTRODUCCIÓN

La epilepsia constituye una de las neuropatologías más frecuente y de gran deterioro en la calidad de vida de los pacientes que la padecen. En estudios estadísticos relacionados con esta enfermedad se reporta la aparición de crisis epilépticas en 20 a 25% de pacientes epilépticos, aún bajo tratamiento a base de fármacos [1]. En este artículo se presenta un modelo para detectar esta neuropatología a partir de la procesamiento de electroencefalogramas (EEG) [1, 2, 3] usando análisis de dinámica no lineal optimizado usando resonancia estocástica.

En este artículo se trata al EEG como una serie de tiempo de naturaleza caótica, altamente no lineal y no gaussiana [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], caracterizado por un conjunto de rasgos o propiedades obtenidas del análisis de la dinámica no lineal y rasgos derivados de su respuesta espectral. Algunas de las propiedades caóticas son la dimensión de correlación D_2 y el exponente máximo de Lyapunov λ_i [11, 12] y en el plano de la respuesta espectral, el espectro de momentos estadísticos de orden superior y sus rasgos: el biespectro, el trispectro y la bicoherencia [13, 14].

La herramienta computacional presentada en este artículo es un clasificador binario desarrollado usando máquinas de vectores de soporte o SVM (de sus siglas en inglés *Support Vector Machines*) [15, 16], que usa como datos de entrenamiento y validación, vectores con información extraída de análisis no lineal de EEG de pacientes neurológicamente sanos o pacientes con diagnóstico comprobado de epilepsia. Los vectores de entrada están constituidos con componentes de dinámica no lineal, (D_2) ya que se ha reportado una diferencia cuantitativa importante entre los parámetros caóticos en mediciones de EEG patológicos y sanos [17]. Los otros componentes de los vectores de entrada son extraídos de la respuesta espectral (máxima potencia de señal, frecuencia del pico de potencia y bicoherencia). El vector de salida o vector objetivo, es un vector columna con una etiqueta binaria, +1 para EEG de pacientes epilépticos y -1 para EEG de pacientes de control (sanos).

Una vez clasificados los EEG en análisis, y cuantificado el error en la identificación de los casos de epilepsia, los EEG fueron sometidos a un proceso gradual de contaminación con ruido blanco aditivo para detectar el fenómeno de resonancia estocástica [18], el cual se ha evidenciado en procesos bistables y/o monoestables de umbral, característicos de secuencias de duración temporal de intervalos entre impulsos, los cuales siguen una distribución probabilística poissoniana [19] y en respuestas temporales por ráfagas de potenciales de acción de neuronas [20]. Los procesos mencionados están involucrados en la generación de la actividad eléctrica del EEG y afectan a los parámetros caóticos (D_2 y λ_i) en una tendencia tal que favorece la diferencia entre rasgos en vectores de EEG epilépticos y normales y en consecuencia los nuevos valores medidos de esos parámetros optimizan el objetivo de clasificación del SVM propuesto [21].

La organización del artículo será la siguiente: la primera parte es la introducción y justificación de la importancia del tema, la siguiente parte, (2), revisa los fundamentos de la teoría del caos, SVM y el fenómeno de resonancia estocástica; la parte (3) explica la metodología usada y parte experimental y finalmente la parte (4) resume el análisis de resultados y conclusiones de la presente investigación.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Teoría del caos y dinámica no lineal

Un sistema de terminístico no lineal caótico exhibe un comportamiento impredecible ya que trayectorias inicialmente cercanas (bajo condiciones iniciales acotadas y finitas) divergen exponencialmente en el tiempo. Sin embargo, a pesar del movimiento errático de las trayectorias (las órbitas se expanden y contraen), éstas permanecen restringidas a una región finita del espacio de estado de dimensión $d \leq m$, definiendo una estructura geométrica conocida como atractor extraño. La dimensión d no es entera (fractal) y m es la menor dimensión entera que alberga el atractor (dimensión de inserción). La dimensión d se conoce como dimensión de correlación (D_2).

2.1.1 Dimensión de correlación D_2

D_2 definida por Grassberger y Procaccia [21], se calcula a partir de la denominada integral de correlación $C(\epsilon, m, N)$, la cual es la probabilidad que un par de puntos de la serie en estudio, seleccionados aleatoriamente, estén separados una distancia menor que ϵ en el espacio de dimensión de inserción m . Para una serie de tiempo de longitud N , puede estimarse como:

$$C(\epsilon, m, N) = \binom{N}{2}^{-1} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \theta(\epsilon - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|) \quad (1)$$

donde $\theta(\cdot)$ es la función escalón de Heaviside, $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ son vectores de dimensión m en el espacio de estado del atractor y $\|\cdot\|$ denota un vector norma Euclidiano.

El escalamiento de $C(\epsilon, m, N)$ con la distancia ϵ produce el estimado D_2 ; es decir, ya que: $C(\epsilon, m, N) \propto \epsilon^{D_2}$, entonces, asintóticamente, D_2 está dada para una serie infinita, y ϵ infinitesimal por (ec. 2):

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\ln C(\epsilon, m)}{\ln \epsilon} \quad (2)$$

desde un punto de vista práctico, D_2 se obtiene extrapolando la pendiente de un ajuste por regresión lineal de $\ln C(\epsilon, m)$ versus $\ln \epsilon$ para diferentes valores de m

2.2 Clasificador SVM de margen suave, C-SVM

Para el modelo desarrollado se usó el clasificador SVM de margen suave llamado C-SVM [22], donde C es la constante de regularización que garantiza minimización del error de generalización. Dado n ejemplos de entrenamiento (vectores) x_i y sus clases asociadas $y_i = \pm 1$, la función de decisión es: $f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i K(x_i, x) + b^*$, donde α_i^* son los coeficientes de Lagrange, $K(\cdot, \cdot)$ es la matriz kernel, b^* es la distancia de la función de decisión al origen, y x es cualquier vector del conjunto de datos. Los coeficientes α_i^* se obtienen resolviendo el problema: $\alpha_i^* = \arg \max \sum_i \alpha_i - 1/2 \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j)$, sujeto a las restricciones: $0 \leq \alpha_i \leq C$ y $\sum_i \alpha_i y_i = 0$; el índice i en α_i^* define cuales datos representan los vectores de soporte (VS) El problema produce tres categorías de vectores que depende de α_i^* , y satisfacen las condiciones Karush-Kuhn-Tucker [6,17]. Los VS de frontera son aquellos vectores tal que $0 < \alpha_i^* < C$, su

margen es 1 (bien clasificados). Los VS no acotados o de error tienen margen negativo (mal clasificados) y $\alpha_i^* = C$. Los vectores con $\alpha_i^* = 0$ no contribuyen en la función de decisión SVM, tienen margen mayor que 1 (bien clasificados).

2.3 Resonancia estocástica

Una figura de mérito, en la evaluación de la calidad de un sistema, lo representa la relación señal/ruido, expresada como S/N (siglas en inglés). Al operar a una potencia constante (por ejemplo, máxima potencia) esta figura obviamente decae con el aumento del nivel de potencia de ruido, degradándose. Sin embargo, en ciertos sistemas existe un nivel óptimo de ruido, donde la relación S/N exhibe un conveniente incremento puntual; semejante a una condición de resonancia en un circuito eléctrico pasivo o algún otro tipo de proceso natural. Esta favorable condición de resonancia se ha denominado “*Resonancia estocástica*” y se ha evidenciado en un gran número de procesos naturales y tecnológicos [18, 19, 20], desde estudio de los cambios climatológicos en el planeta, hasta sistemas fisiológicos (actividad neuronal) o sistemas técnicos como el comparador analógico electrónico regenerativo, conocido como “*Schmitt trigger*”, del cual se muestra una simulación (usando *Simulink* de *Matlab*) en la figura 1. Una característica común que poseen todos los sistemas antes mencionados es su naturaleza bistable o al menos monoestable (en estado de reposo) con activación controlada por un umbral.

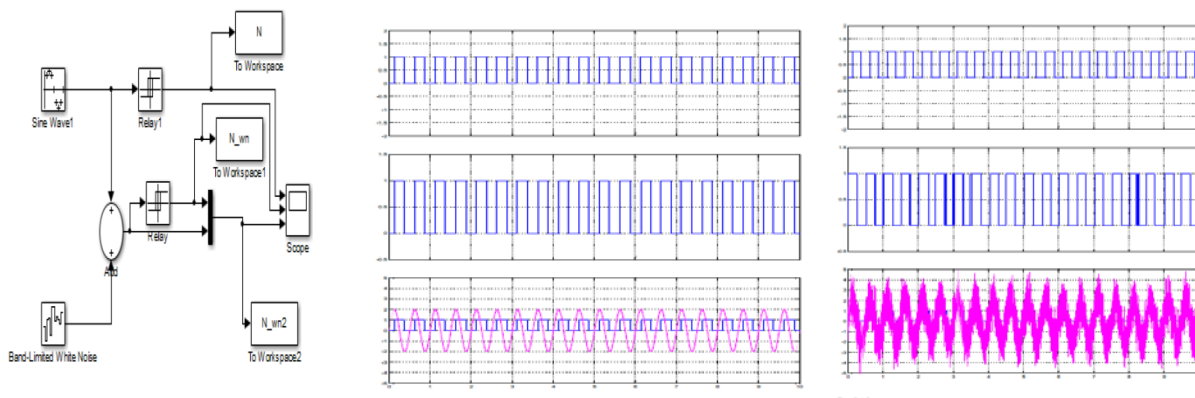


Figura 1. Simulación de un *Schmitt Trigger* activado con ruido blanco aditivo.

3. PARTE EXPERIMENTAL

1. Los EEG a procesar corresponden a los de una base de datos [23] de 20 EEG, 10 de pacientes sanos y 10 de pacientes epilépticos. Para cada uno de estos EEG se identificó el canal que exhibió mayor potencia [10] y la frecuencia de ese pico de potencia. De la serie de tiempo correspondiente a dicho canal, se extrajeron, aleatoriamente, 10 segmentos no solapados, de 2000 muestras de longitud; conformándose de esta manera una base de datos constituida por 200 segmentos de 2000 muestras de longitud cada una.
2. A cada segmento se le aplicó pruebas de no linealidad y no gaussianidad, verificando tal condición, y midiendo en cada experimento la máxima bicoherencia [5].
3. Se diseñó un programa *MPI* para la implementación del algoritmo de cálculo de D_2 [24].
4. Se implementó un clasificador a *C-SVM*, se entrenó y validó, con las matrices de 200 vectores de 4 componentes *c/u*: D_2 , bicoherencia, potencia, frecuencia. En la aplicación

desarrollada en este artículo el mejor comportamiento como función “*kernel*” lo exhibió la función del tipo de base radial. Los mejores parámetros de sintonía de la SVC diseñada fueron: $\sigma = 0.1$, $\varepsilon = 0.01$, $C = 1000$, lográndose un acierto en el proceso de validación mayor al 92 %.

5. Se aplicó ruido blanco aditivo sobre cada segmento para de terminar el nivel de ruido “óptimo” (resonancia estocástica) y se repitió el proceso experimental descrito mejorando el acierto del clasificador a 98%.

4. CONCLUSIONES

El mejor desempeño del clasificador diseñado con ruido blanco aditivo respecto al mismo sin este contaminante, demuestra que las propiedades caóticas experimentan una tendencia que aumenta la diferencia entre rasgos en vectores de EEG epilépticos y sanos y en consecuencia se optimiza el clasificador propuesto, verificando el efecto positivo de la resonancia estocástica sobre el modelo de diagnóstico automatizado desarrollado. Los resultados presentados en este artículo avalan la creación de nuevas herramientas computacionales de gran exactitud en el diagnóstico de neuropatologías basadas en extracción de rasgos de la dinámica no lineal del EEG optimizados en un medio bajo resonancia estocástica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC) por el financiamiento de la difusión de la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, 2012. Epilepsy. Nota Descriptiva N° 999. Disponible: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs999/en/index.html>.
- [2] Sörnmo L. & P. Laguna, “Bioelectrical Signals processing in Cardiac and Neurological Applications”. Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2005.
- [3] Teplan M., “Fundamentals of EEG Measurement”. Measurement Science Review, Volume 2, Section 2, Bratislava, Slovakia, 2002.
- [4] Morales J., J. Teijeiro, E. Guerra, G. López & R. Masías. “Detección de No-Gaussianidad en Señales Eléctricas de Estructuras Cerebrales Profundas”. Bioingeniería y Física Médica Cubana 3 (2) 2002, pp 18-24, La Habana, Cuba, 2002.
- [5] Swami A., J. Mendel & C. Nikias, “Higher-Order Spectral Analysis Toolbox: User’s Guide”. Version 6.0, The MathWorks Inc., Natick, USA, 2007.
- [6] Shelter B., Maiwald T., Brandt A., Schad A., Schulze-Bonhage A. & J. Timmer, “Testing statistical significance of multivariate time series analysis techniques for epileptic seizure prediction”. Chaos 16, 013108, 12 January 2006.
- [7] Venkatakrishnana P., S.Sangeetha & R.Sukaneshc, “Detection of Quadratic Phase Coupling from Human EEG Signals using Higher Order Statistics and Spectra”. Department of Information Technology, Thiagarajar College of Engineering, Madurai, Tamil Nadu, India,

- [http://www.cscjournals.org/csc/manuscript/Journals/SPIJ/volu me3/Issue4/SPIJ-29.pdf](http://www.cscjournals.org/csc/manuscript/Journals/SPIJ/volu%20me3/Issue4/SPIJ-29.pdf), December, 2009.
- [8] Florentino B., “Modeling an Epileptic Brain Pattern Classification”. MSc Thesis, University of Reading, United Kingdom, 2008.
- [9] Shelter B., Maiwald T., Brandt A., Schad A., Schulze-Bonhage A. & J. Timmer, “Testing statistical significance of multivariate time series analysis techniques for epileptic seizure prediction”. *Chaos* 16, 013108, 12 January 2006.
- [10] Delorme A. & S. Makeig, “EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis”. *Journal of Neuroscience Methods* 134 (2004) 9–21, USA, 2004.
- [11] Kugiumtzis D., Lillekjendlie B. & N. Christophersen, “Chaotic time series, Part I: Estimation of invariant properties in space state”. SINTEF-SI, Pb 124, Blindern, N-0314, Oslo, Norway, January, 1994.
- [12] Hegger R., H. Kantz & T. Schreiber, “Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package”. *CHAOS* 9 (1999) 413, *Chaotic Dynamics*, 30 Sep 1998.
- [13] Swami, A., Mendel, J. M., & Nikias, C. L. (2000). *Higher-order Spectral Analysis Toolbox: for Use with MATLAB: User's Guide. Version 2.0*. Mathworks, Incorporated.
- [14] Seijas Cesar, Caralli Antonino, and Villazana Sergio. "Neuropathology Classifier Based on Higher Order Spectra." *Journal of Computer and Communications* 1 (2013): 36.
- [15] Vapnik V., “Statistical Learning Theory”, Wiley, New York, 1998.
- [16] Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin, LIBSVM: a library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2:27:1--27:27, 2011. Software available at <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- [17] Babloyantz A. & A. Destexhe, “Low-dimensional chaos in an instance of epilepsy”. *Neurobiology, Proc. Natl. Acad. Sci.*, Vol. 83, pp. 3513-3517, USA, May 1986.
- [18] Gammaitoni L., Hänggi P., Jung P. & F. Marchesoni, “Stochastic Resonance”. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 70, No. 1, USA, 1998.
- [19] Bezrukov S., “Stochastic Resonance as an inherent property of rate-modulated random series of events”. Elsevier Science B.V., *Physics Letters A* 248(1998) pp 29-36, November 1998.
- [20] Breen J., “Computational Nonlinear Dynamics: Monostable Stochastic Resonance and a Bursting Neuron Model”. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, USA, 2003.
- [21] Galka A., Maaß T. & G. Pfister, “Estimating the dimensions of high-dimensional attractors: A comparison between two algorithms”. *Physica D* 121, 237-251, Germany, 1998.
- [22] Christianini, Nello, and Shawe J. Taylor. "An introduction to support vector machines (and other kernel-based learning methods)." (2000).
- [23] Guillén P., “*Procesamiento Digital de EEG*”. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, Noviembre 2005.
- [24] Seijas C., Caralli A., S. Villazana, Reylago D. & D. Vega “*Estimación de Propiedades Invariantes en el Espacio de Estado de EEG usando MPI*”. VIII Cong. de Inv., Univ. de Carabobo, Venezuela, 2013.

DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS MUSICALES MEDIANTE EL USO DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL

Caropresse Gerlis Eduardo

Montoya Dan El

gcaropresse@gmail.com

danelmontoya@gmail.com

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Av. Carlos Raúl Villanueva, Edif. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Ofic. 211-c, Ciudad Universitaria de Caracas, Caracas-Venezuela.

Abstract. *Se plantea un plataforma computacional que a partir de un archivo de audio digital WAVE, que contenga un instrumento musical, ésta identifique el instrumento. La plataforma se basa en el procesamiento de la señal digital de audio, extrayendo “características” de la señal como son: la variación del espectro en el tiempo, la forma del inicio de la onda, el contenido espectral, el valor RMS de la señal y el contenido armónico. Estas característica son procesadas por una red neuronal que da como salida el instrumento identificado. La red neuronal consiste de un perceptrón multicapas implementado con el programa WEKA. Los resultados obtenidos son comparados con un trabajo previo realizados con clasificadores k-NN y Bayasiano.*

Key words: Identificación de instrumentos musicales, Procesamiento de Señales, Redes Neuronales, Identificación de patrones.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el reconocimiento de voz, sonido y en particular el sonido producido por instrumentos musicales cada día es más utilizado. En multimedia las aplicaciones para el reconocimiento de instrumentos musicales han ido creciendo; en el caso del estándar MPEG-7 se utiliza la identificación de sonidos para la incorporación de información e indexado sobre películas, video o música, permitiendo una búsqueda más rápida de un video o pieza musical en particular. [1] En la transcripción automatizada de partituras el reconocimiento de estos instrumentos es de gran ayuda para obtener un mejor resultado en la transcripción y la identificación de cada instrumento dentro de la partitura.

Estas aplicaciones requieren de un método automatizado que agilice la identificación y pueda procesar gran cantidad de información (piezas musicales) en poco tiempo.

Los métodos existentes consisten principalmente en la extracción de características del timbre de la señal de audio. Éstas características son procesadas por un clasificador que identifica el instrumento. En este trabajo se utiliza una red neuronal (perceptrón multicapas) como clasificador y características espectrales, temporales y armónicas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Timbre

La identificación de los sonidos se fundamenta en el caracterización del timbre. La definición del timbre es poco concreta, Dubnov [2] da las siguientes definiciones: básicamente multidimensional, envolvente de la señal en tiempo, envolvente del espectro, variación del espectro en el tiempo, etc.; Otra definición dada por [2] dice: El timbre es el parámetro que diferencia dos sonidos que tiene la misma amplitud (loudness) y el mismo tono (pitch).

La identificación del timbre se basa en la extracción de características de la señal. En el trabajo de D. Deng [1] se presentan hasta 44 características del timbre.

Para este trabajo se utilizaron solo seis características que fueron utilizadas en el trabajo de Segovia [5], las características del timbre se pueden clasificar de varias formas, en el trabajo [1] se clasifican en: características basadas en percepción, características del grupo MPEG-7 y coeficientes de Mel.

2.2. Características Basadas en Percepción

Para estas características se realiza un proceso previo a la señal basado en un modelo de nervio auditivo, la señal musical muestreada es dividida en segmentos de 40 ms de duración con 10 ms de solapamiento entre segmentos consecutivos. Cada segmento de señal se analiza con un banco de filtros de 40 bandas centrada cada una en la escala de frecuencias Bark. [1] Esta escala comienzan en la frecuencia 141 Hz y termina en 8.887 kHz, después del proceso se obtiene una señal en tiempo de 40 canales.

2.2.1. Raíz Media Cuadrática (*RMS*)

La raíz media cuadrática (Root-mean-square *RMS*) es una característica que suma la distribución de energía en cada trama y en cada canal en el tiempo, se calcula con la Eq. (1). [1] Para el programa desarrollado en este trabajo se tomó el valor medio del valor RMS por trama obteniendo la característica *RMSM*.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N F_n^2}{N}} \quad (1)$$

2.2.2. Centroide Espectral (Spectral centroid)

Esta característica mide el promedio ponderado de las amplitudes del espectro en cada segmento de señal, se calcula con la Eq. (2), donde f_k es la frecuencia en el k -ésimo canal, el número de

canales es $K = 40$, y $P(f_k)$ el espectro en amplitud del k -ésimo canal. [1]

$$Centroid = \frac{\sum_{k=1}^K P(f_k) f_k}{\sum_{k=1}^K P(f_k)} \quad (2)$$

2.2.3. Ancho de Banda (*Bandwidth*)

El ancho de banda (*Bandwidth*) o también llamado ancho del centroide (*centroid width*), es una característica que muestra el rango de frecuencia de una señal ponderada por su espectro, se calcula con la Eq. (3). [1] Para el programa desarrollado en este trabajo se tomó el valor medio del *Bandwidth* por trama obteniendo la característica *BandwidthM*.

$$Bandwidth = \frac{\sum_{k=1}^K |Centroid - f_k| P(f_k)}{\sum_{k=2}^K P(f_k)} \quad (3)$$

2.2.4. Flujo Espectral (*Flux*)

La característica de flujo espectral (*Flux*) describe la variación del espectro en el tiempo, segmento a segmento. Esta se calcula como la diferencia al cuadrado entre las magnitudes normalizadas de los espectros consecutivos, esta se calcula mediante la Eq. (4). [1] En este caso se calculó el la desviación estándar del *Flux* trama a trama para obtener la característica *FluxD*.

$$Flux = \sum_{k=2}^K |P(f_k) - P(f_{k-1})|^2 \quad (4)$$

2.3. Características del Grupo MPEG-7

El grupo MPEG publicó un estándar para el contenido de datos del audio digital, donde propone un grupo de característica para la identificación del timbre. Este estándar tiene características tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo. [6] [3] Para este trabajo se utilizaron las siguientes dos características.

2.3.1. Logaritmo del Tiempo de Ataque (*LAT*)

Esta característica se define como el logaritmo del tiempo que hay entre el instante donde comienza la envolvente de la señal hasta donde alcanza su parte estable, la envolvente es estimada por el cálculo del valor cuadrático medio local de la amplitud en cada trama, la Eq. (5) expresa el cálculo de esta característica, donde T_0 es el instante donde comienza la señal y T_1 donde alcanza su sostenimiento. [6] [3]

$$LAT = \log_{10}(T_1 - T_0) \quad (5)$$

2.3.2. Desviación Armónica (*HD*)

Se calcula como el promedio sobre la duración del segmento de sonido de la desviación espectral armónica instantánea (*IHSD*) en cada trama, expresado en la Eq. (9). La *IHSD* se calcula como la desviación espectral de la amplitud logarítmica de las componentes de una envolvente global espectral, expresado en la Eq.(8), donde $A(i, k)$ representa la amplitud del k -ésimo pico armónico en la trama i -ésima, M es el número total de armónicos considerados y $SE(i, k)$ es la amplitud de la envolvente espectral de la i -ésima trama en el k -ésimo armónico, Eq. (6) y (7). [4] [6] [3]

$$SE(i, k) = \frac{A(i, k) + A(i, k + 1)}{2} \quad \text{para } k = 1 \quad (6)$$

$$SE(i, k) = \frac{\sum_{j=-1}^1 A(i, k + j)}{3} \quad \text{para } k = \{2, K - 1\} \quad (7)$$

$$IHSD(i) = \frac{\sum_{k=1}^K |\log_{10}(A(i, k)) - \log_{10}(SE(i, k))|}{\sum_{k=1}^K \log_{10}(A(i, k))} \quad (8)$$

$$HSD = \frac{\sum_{i=1}^M IHSD(i)}{M} \quad (9)$$

2.4. Coeficientes de Mel (*MFCCD1*)

La señal de audio es dividida en un número determinado de tramas. A cada trama de la señal se le calcula su DFT. Luego, el espectro de amplitud de cada DFT es filtrada por un banco de filtros de respuesta en frecuencia tipo pasabanda de forma triangular, cuyos centros están espaciados según la escala de frecuencias mel. Subsecuentemente, se toman los logaritmos de estas salidas y finalmente se obtienen los MFCC para cada trama, calculando la DCT de estos logaritmos, la Eq. (10) expresa la escala de frecuencias donde f es la frecuencia en Hz y ϕ se expresa en mel. [5]

$$\phi = 2595 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right) \quad (10)$$

2.5. Red Neuronal

Las redes neuronales son modelos computacionales que tratan de imitar la función de aprendizaje del cerebro. Están formadas por un conjunto de unidades de procesamiento llamadas “neuronas” conectadas en paralelo, que pueden filtrar y procesar las entradas para tomar decisiones.

3. METODOLOGÍA

3.1. Base de Datos

Para la prueba esta plataforma se contó con una base de datos que contiene muestras de audio de cuatro instrumentos musicales utilizados en la música tradicional venezolana, esto son: Bandola, Cuatro, Guitarra y Mandolina. Estas muestras consisten en grabaciones de todas las notas que produce cada instrumento en cada cuerda, grabada 5 veces cada una. La grabaciones se realizaron en formato WAVE a una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz en canal mono. Esta base de datos se desarrolló en el Trabajo de Especial de Grado de Segovia [5].

3.2. Procedimiento

El proceso general de la identificación se muestra en la Fig. 1, este proceso consiste en tomar el archivo WAVE y extraer la señal digital, normalizarla en energía para luego extraer las características: RMSM, BandwidthM, FluxD, HD, LAT y MFCCD1, para cada nota y cada instrumento obteniendo un vector de medición para cada uno. Para extraer las características se utilizaron los toolbox: IPEMToolBox para las características basadas en percepción, el MPEG-7 Audio Reference Software Toolkit para las de MPEG-7 y el MFCC1D fue extraída con el Auditory Toolbox versión 2, todos estos en MatLab. Luego de obtener las características para cada nota de cada instrumento, éstas se formatearon en un archivo ARFF que es utilizado por el programa WEKA, el cual dispone de un clasificador con redes neuronales.

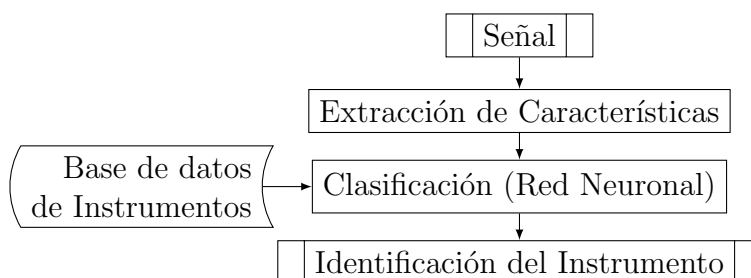


Figura 1: Esquema general del proceso de identificación

La red neuronal utilizada es de tipo perceptrón multicapas, con una función de activación tipo sigmoide y algoritmo de aprendizaje de backpropagation. Las entradas de la red neuronal son las características: RMSM, BandwidthM, FluxD, HD, LAT y MFCCD1, y las salidas los cuatro instrumentos.

4. EXPERIMENTACIÓN

Para probar el desempeño de la clasificación se tomaron los vectores de medición de las muestras de audio y se procesaron con la red neuronal con 4 evaluaciones, cambiando sus porcentajes de prueba y de entrenamiento. Los porcentajes para el entrenamiento de la red fueron: 60 %, 75 %, 80 % y 90 %, y para la evaluación: 40 %, 25 %, 20 % y 10 %, respectivamente.

La medición del desempeño de la red neuronal se realizó: mediante el análisis de matrices de confusión y mediante la estimación de las tasas de error para cada instrumento.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 1 se muestran las matrices de confusión y el porcentaje de tasa de error (% T.E.) para cada evaluación, donde las columnas indican como fueron clasificados los instrumentos por la red neuronal. Los porcentajes de T.E. evidencian como al aumentar el porcentaje de muestras para el entrenamiento disminuye el error.

En el trabajo de Segovia [5] se realizó el mismo procedimiento pero con un clasificador Bayesiano y uno k-NN, los resultados se muestran en la Tabla 2, al comparar los resultados de las Tablas 1 y 2 se observa como los errores obtenidos con la red neuronal son mejores que los de el Clasificador Bayesiano y el k-NN.

Tabla 1: Matrices de confusión para cada evaluación y Tasa de Error (T.E. %)

Inst.	Evaluación 1				Evaluación 2				Evaluación 3				Evaluación 4			
	Gui	Cua	Man	Ban	Gui	Cua	Man	Ban	Gui	Cua	Man	an	Gui	Cua	Man	Ban
Gui	4	0	2	0	4	0	0	0	4	0	0	0	3	0	0	0
Cua	0	7	0	1	0	3	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0
Man	0	0	3	6	0	0	5	2	0	0	3	3	0	0	2	0
Ban	0	0	0	7	0	2	0	3	0	0	0	3	0	0	1	1
% T.E.	0	0	6,7	23,33	0	10,53	0	10,53	0	0	0	20	0	0	12,5	0

Tabla 2: Porcentaje de Tasa de Error (Tesis Segovia[5])

Clas. Inst.	Evaluación 1		Evaluación 2		Evaluación 3		Evaluación 4	
	Bayesiano	k-NN	Bayesiano	k-NN	Bayesiano	k-NN	Bayesiano	k-NN
Ban	33,3	58,3	14,3	28,6	16,7	16,7	0	0
Cua	0	30	0	50	0	60	0	50
Gui	0	0	0	12,5	0	0	0	0
Man	31,3	37,5	40	70	50	50	50	50

6. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se concluye que la red neuronal tuvo un mejor desempeño que el clasificador Bayesiano y el k-NN. Al aumentar el porcentaje de muestras para el entrenamiento de La Red, el resultado obtenido mejora progresivamente. La comparación de los resultados obtenidos de La Red Neuronal con El Clasificador Bayesiano y el k-NN, evidencia a ésta como una buena alternativa para probar la plataforma con un mayor número de características y con archivos de audio que contengan mas de un instrumento musical.

REFERENCIAS

- [1] Da Deng, Christian Simmermacher, and Stephen Cranefield. A Study on Feature Analysis for Musical Instrument Classification, 2007.
- [2] Shlomo Dubnov. *Polyspectral Analysis of Musical Timbre*. PhD thesis, Hebrew University, 1996.
- [3] MPEG-7. Information Technology - Multimedia Content Description Interface - Part 4: Audio, 2001.
- [4] Geoffroy Peeters. A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. *CUIDADO IST Project Report*, 54(version 1.0):1–25, 2004.
- [5] Andrés Segovia. *Desarrollo de una Plataforma para Identificar Instrumentos Musicales Monofónicos Mediante el uso de Análisis de Señales*. Tesis de pregrado, Universidad Central de Venezuela, 2009.
- [6] Xin Zhang and ZW Ras. Analysis of sound features for music timbre recognition, 2007.

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELECTRO-TÉRMICO EN CADENAS DE AISLADORES DE VIDRIO Y POLÍMERO, ANTE CONTAMINACIÓN SALINA

Ing. Adrián Beria

adrberia@hotmail.com

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Sede Puerto Ordaz.

M. Sc. Francisco Rojas

frojashdeze37@gmail.com

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Sede Puerto Ordaz.

Ing. M. Sc. Juan Toledo

jtoledo@corpoelec.gob.ve

CORPOELEC, Gerencia ingeniería y proyectos de expansión de generación oriente superintendencia de estudios e ingeniería de expansión. Unidad de Proyectos Eléctricos, Supervisión y Control. Proyecto Hidroeléctrico Manuel Piar en Tocoma.

Ing. Tiuna Mendoza

tmendonza@corpoelec.gob.ve

CORPOELEC, Central hidroeléctrica Antonio José de Sucre, Macagua, Centro de Investigaciones Aplicadas (CIAP).

Ing. Cristian Gutiérrez Aguirre

lider1lineas@yahoo.com

CORPOELEC, Unidad de mantenimiento de transmisión sur de la sub - Comisionaduría, Centro Transmisión Sur en Macagua.

Ing. William Torres

Williamtorres42@gmail.com

CORPOELEC, Central hidroeléctrica Antonio José de Sucre, Macagua, Centro de Investigaciones Aplicadas (CIAP), Gerencia de estudios y pruebas de CORPOELEC.

Resumen. *En este trabajo se realizará un análisis electro-térmico del comportamiento de las cadenas de aisladores de vidrio y polímero, ante una capa de agua salada de espesor de 1 mm. Se usará el método de los elementos finitos (MEF) como herramienta computacional, mediante el programa de simulación ANSYS 12.0, para obtener los niveles de campo eléctrico y la distribución de temperatura con, y sin contaminación salina. Para las pruebas experimentales se*

usaron una cámara de termovisión marca FLYR y un medidor de campo eléctrico marca, HI 3604. Los resultados obtenidos demuestran que la contaminación aumenta la temperatura en el caso del vidrio en un 2,73%, mientras que el polímero un 0,94 %; para el potencial en el caso del vidrio, aumento un 13,94 %, y el polímero un 12,87%. Bajo los efectos de contaminación el campo eléctrico experimental y el simulado difieren en menos del uno por ciento, validando el resultado de las simulaciones.

Palabras claves: Simulación termoeléctrica, Aisladores, Contaminación Salina, Método de los Elementos Finitos.

1. INTRODUCTION

Los aisladores que forman parte del aislamiento externo de los sistemas de transmisión y de distribución deben ser capaces de soportar la tensión normal de trabajo del sistema, así como las sobretensiones que se produzcan, tanto por rayos como por problemas internos, es decir, los aisladores deben cumplir los parámetros de aislamiento establecidos y deben mantener en todo momento la corriente de filtración a través de ellos en valores bajos, aun bajo condiciones de alta humedad, a fin de evitar descargas superficiales y pérdidas de energía [1].

De manera general puede decirse que los aisladores ubicados en las líneas eléctricas aéreas están siempre expuestos a la contaminación, pues aun cuando se toman medidas con respecto a limitar o reducir las emisiones contaminantes por las fuentes industriales, la contaminación del tipo natural es prácticamente imposible de evitar, por lo que se ha dirigido principalmente los trabajos de investigación al diseño y selección de aislamientos adecuados, así como de establecer medidas y procedimientos para su explotación, bajo diferentes condiciones meteorológicas y de contaminación que se pueda presentar [2], [3].

El objetivo general de la investigación es analizar las propiedades termoeléctricas y el comportamiento ante agentes contaminantes en aisladores, de polímero y de vidrio, usados en líneas de transmisión para niveles de tensión de 400 kV.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las pruebas de aisladores poliméricos, para determinar anomalías internas o externas más usadas actualmente cuando están en servicio, son la distribución de campo eléctrico, termografía infrarroja y efecto corona. Mediante cada una de estas técnicas se puede predecir el estado del aislador, si existen fallas ocultas como perforaciones, grietas o fisuras que pueden poner en riesgo la capacidad mecánica al exponer el núcleo, compuesto por una barra de fibra de vidrio (EPR) al ambiente (humedad) y provocar una caída del conductor de potencia por rotura frágil del aislador que lo sostiene a la estructura (torre) [4].

La medición de campo eléctrico a través de los aisladores se realiza en la línea de transmisión a lo largo del aislador, deslizando el equipo de prueba a unos diez centímetros de la falda del polímero, tomando el registro de campo eléctrico para cada falda y se grafica obteniéndose una curva la cual muestra el nivel de campo a lo largo de la cadena. Del análisis de esta distribución, se puede obtener información acerca de la condición del aislamiento, pudiendo detectar anomalías tales como grietas, perforaciones, fallas en el núcleo de fibra de vidrio, imperfecciones en las faldas del aislador, de acuerdo a este análisis puede generarse una orden de mantenimiento o reemplazo del aislador inclusive.

Para el desarrollo del montaje, el laboratorio de ensayos cuenta con la fuente de tensión AC para inyecciones variables desde 0 hasta 150 kV, conectando a un transformador 400/240000 V, con sus equipos de medición asociado de tensión y corriente incluida, solo es necesario colocar el espécimen (S) entre la fase T2 y tierra. La distancia mínima de aislamiento fase a tierra es de 2,40 m para una tensión máxima de 245 kV, efectivos a 60 Hz.

En la figura 1 se puede observar una ilustración real del montaje.

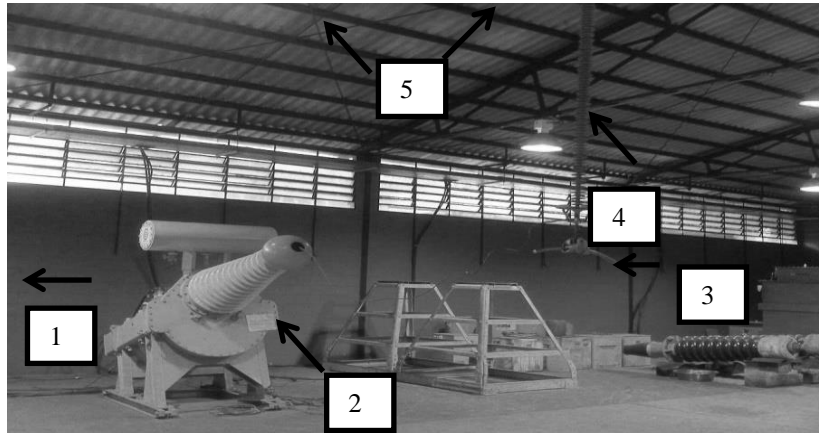


Figura 1 - Ilustración real de las pruebas desarrolladas en el laboratorio de Ensayos Electromagnéticos del CIAP-Macagua.

Dónde:

1. Fuente de tensión variable de 0-230 kV.
2. Transformador 400/240000.
3. Conductor calibre 2/0 AWG.
4. Aislador Polimérico marca Sediver.
5. Cable puesta a tierra.

En la figura mostrada se observa el montaje del ensayo para medir los niveles de campo eléctrico a lo largo del aislador para una tensión de 150 kV, aunque en los objetivos planteados se deberían hacer a un voltaje de 400 kV, por limitaciones del transformador empleado, se realizara a la tensión permitida por la maquina eléctrica.

El objetivo principal de estas pruebas es de poder validar las simulaciones realizadas en la investigación, por lo que se hará un modelo a 150 kV y se compararan los resultados obtenidos en el laboratorio con los del simulador, a través de graficas bidimensionales, usando el programa Microsoft Excel, para su posterior análisis.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se muestran la distribución de temperatura, potencial y campo eléctrico de los aisladores de vidrio y polímero, sin contaminantes, para luego compararlos con el modelo contaminado, con una capa de agua salada de 1mm de espesor en las aletas del aislador, energizando a 400 kV, en ambos casos. La simulación termoelectrónica se realizó con el programa ANSYS, el cual hace uso del MEF para resolver las ecuaciones diferenciales asociadas al modelo termoelectrónico planteado. Posteriormente se comparará con los resultados obtenidos en el laboratorio, solo que al modelo se le inyectaran 150 kV, debido a que la capacidad máxima de la

fuelle de generación es de 230 kV, además por normas de seguridad del laboratorio, la distancia del aislador al suelo no es lo suficiente para suministrar mayor tensión.

3.1 Simulación Térmica

En la figura 2, se muestran los valores de térmicos en las primeras 14 aletas de los aisladores de polímero y vidrio energizado a 400 kV.

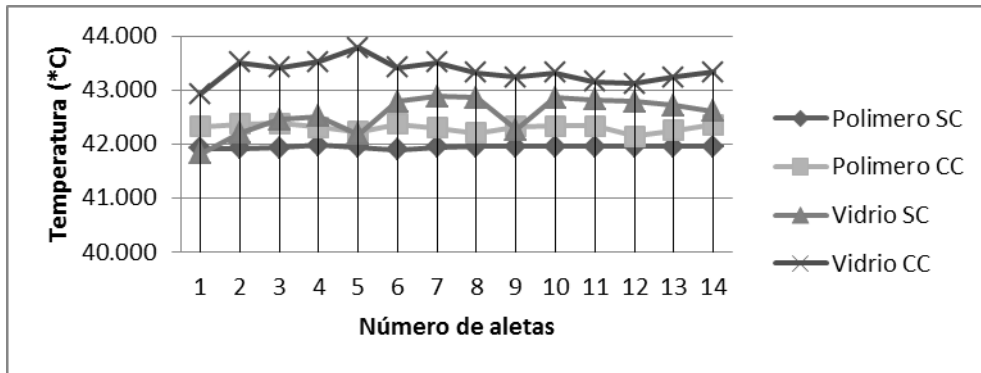
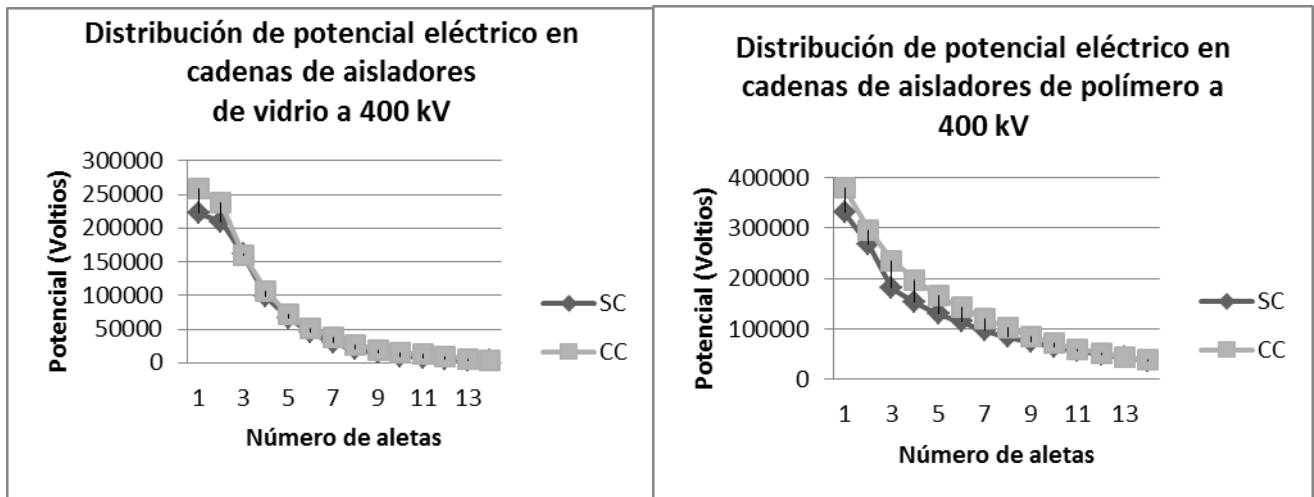


Figura 2 – Distribución de temperatura de aisladores de polímero y vidrio a 400 kV.

En el caso del polímero se muestra un aumento en la temperatura del 0,95%, mientras que el aislador de vidrio aumenta un 2,73%, estando contaminados por una capa de agua salada de 1 mm de espesor. Se puede apreciar que la distribución térmica del polímero, no se ve mayormente afectada por la contaminación de las aletas, esto puede ser debido a la propiedad del polímero el cual presenta valores de calor específico y conductividad térmica menores que el vidrio endurecido, haciéndolo menos susceptible desde el punto de visto térmico, al efecto contaminante.

3.2 Simulación Electroestática

En la figura 3, se muestran los valores de potencial y campo eléctrico, respectivamente, en las primeras 14 aletas de los aisladores de polímero y vidrio energizado a 400 kV.



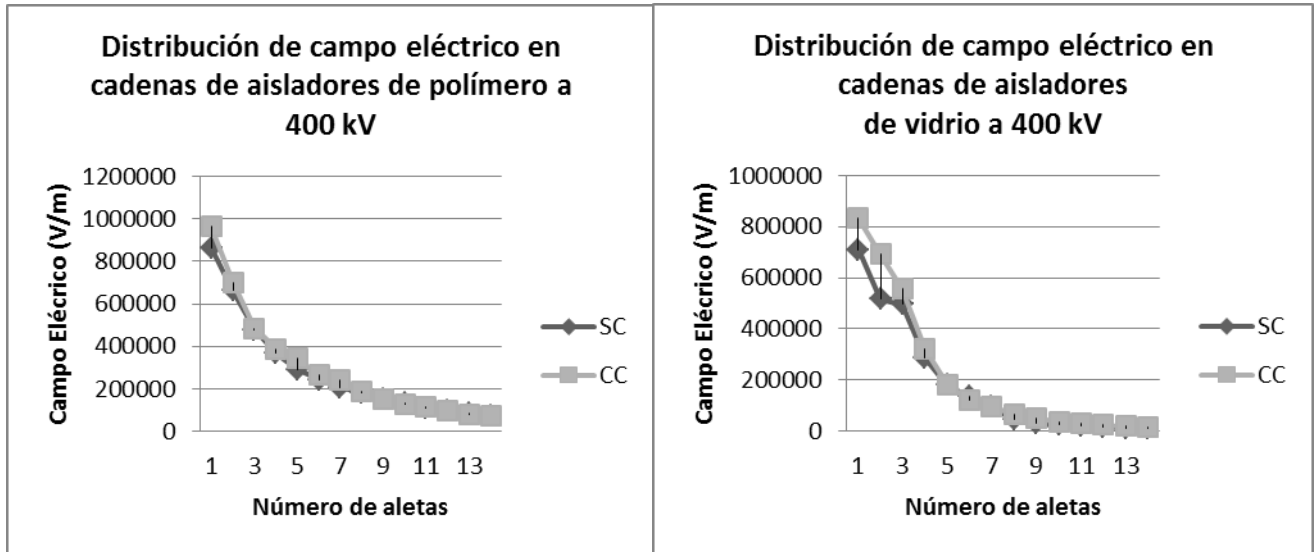


Figura 3 - Distribución de potencial y campo eléctrico de aisladores de polímero y vidrio a 400 kV.

Se observa que el modelo contaminado presenta en la primera aleta del modelo de vidrio un potencial de 258.244 V, mientras que el que no posee contaminación, muestra un valor de 222.247 V, es decir, una diferencia de 35.997 V, lo que equivale a un aumento del 13,93 %, observándose mayor concentración en el modelo contaminado. El campo eléctrico, opera bajo la misma premisa que el potencial ya que se relacionan por la fórmula $E = -\nabla V$, es decir, son proporcionales entre sí, indicando que el efecto del contaminante se puede apreciar también en el campo eléctrico, indicando un aumento en el vidrio del 15%. Para el caso del polímero aumento el potencial en un 12,87%, mientras que el campo eléctrico un 10,22%, durante la contaminación de las aletas en los dos casos.

3.3 Comparación de medidas experimentales y simuladas

Se analizaran los datos obtenidos durante los ensayos, al energizar un aislador de polímero a 150 kV, con y sin contaminantes. En la figura 4 se muestra la distribución campo eléctrico medido cada cinco aletas y luego se comparó con la simulación del experimento realizado.

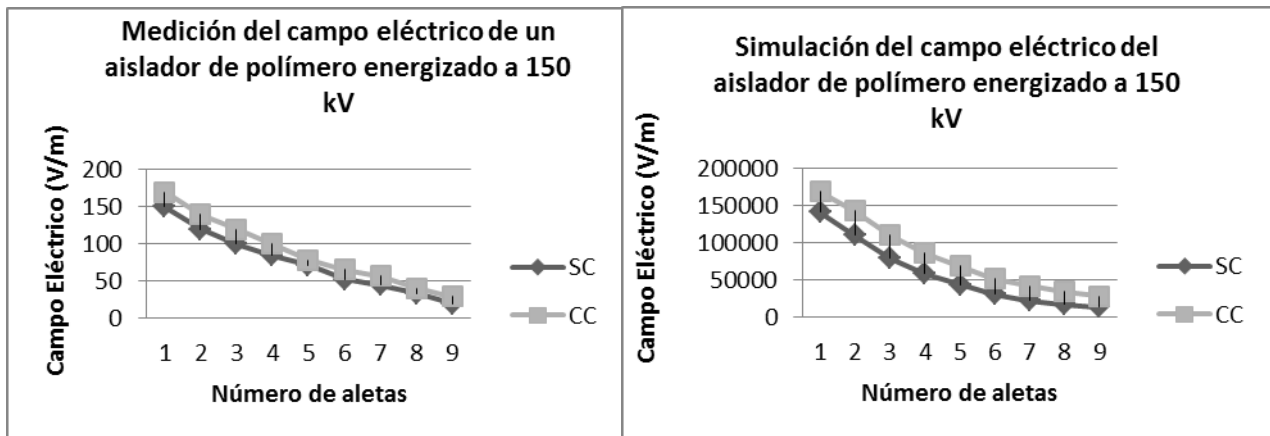


Figura 4 – Distribución de campo eléctrico medido y simulado de un aislador de polímero marca Sediver energizado a 150 kV.

Este ensayo se realizó a las primeras 9 aletas del aislador que tiene un total de 92. Se observa que en las primeras aletas se tiene mayor concentración de campo eléctrico, para el caso contaminado, se tiene en la primera aleta 170 kV/m con respecto al no contaminado, el cual es de un valor de 150 kV/m, donde se nota una diferencia de 20 kV/m, lo cual equivale a un aumento del 11,76%, mientras que el modelo simulado de la primera aleta contaminada presenta un valor de 169,454 kV/m en contraste cuando se encuentra limpia, donde presenta una magnitud de 141,375 kV/m, lo cual equivale a una diferencia de 28,079 kV/m, es decir, un aumento del 16,57 %. En el caso del aislador contaminado, se observa una diferencia entre lo simulado y lo experimental del 0,58%, mientras que para el caso sin contaminar, un 6,66%, pero cabe destacar que el aislador usado en las pruebas estaba previamente contaminado naturalmente y su vida útil ya había pasado, por lo que se puede explicar esa diferencia porcentual en los casos no contaminados, entre lo real y lo simulado.

4. CONCLUSIONES

- El estudio de las cadenas de aisladores de vidrio y de polímero para 400 kV, arrojaron valores de campo eléctrico superior al recomendado por EPRI, lo que trajo como consecuencia la reducción de la vida útil en los aisladores de la Línea El Tablazo-Cuatricentenario de 30 a 11 años, debido al estrés eléctrico en el que se encontraba sometido.
- El aislador de polímero presentó un mejor comportamiento termoeléctrico ante el contaminante usado en las simulaciones y las pruebas experimentales, en comparación a la cadena de aisladores de vidrio.
- Durante los ensayos en el laboratorio el campo eléctrico en el aislador de polímero energizado a 150 kV aumentó un 11,76 % al aplicar el contaminante, mientras que en el modelo simulado en 16,57 %, pero el modelo usado durante las pruebas estaba previamente contaminado naturalmente por las condiciones ambientales en las que se encontraba y su vida útil ya había pasado, esto se observa en los valores de las primeras aletas de, 150 kV/m (medido) y 141 kV/m (simulado).

REFERENCIAS

- [1]. Almirall, J. *Temas de Ingeniería Eléctrica*. Poligráfica Félix Varela, 2009.
- [2]. Abreu, A. Experiencia en la evaluación de aisladores poliméricos para la red de 23,9 KV de ENELVEN, a través de un laboratorio natural. *II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica*, 2009.
- [3]. Rojas, F., Rodríguez, A., Sanzonetty, E. Influencia de la contaminación con agua pura, de mar y sal en estrés eléctrico de un aislador polimérico sometido a 34,5 kV. *Asociación Venezolana para el Avance de la Ciencia (ASOVAC)*, 2012.
- [4]. Norma ANSI C29.1. Electrical Power Insulator Test Methods, 1998.

CLASIFICACIÓN DE SEÑALES ELECTROENCEFALOGRÁFICAS UTILIZANDO ENTRENAMIENTO CRUZADO DE MÁQUINAS DE VECTORES DE SOPORTE

Sergio Villazana

Guillermo Montilla

César Seijas

Antonino Caralli

svillaza@uc.edu.ve

montillaleon@gmail.com

cseijas@uc.edu.ve

acaralli@uc.edu.ve

Centro de Investigación en Bioingeniería, Universidad de Carabobo

Fac. de Ingeniería, Av. Universidad, Bárbula, Valencia-Venezuela

Antonio Eblen

Laboratorio de Neurofisiología, Universidad de Carabobo

Dpto. de Ciencias Fisiológicas, Fac. de Ciencias de la Salud, Bárbula, Valencia-Venezuela

aeblen@uc.edu.ve

Resumen. *Este artículo presenta una aplicación de entrenamiento cruzado de Máquinas de Vectores Soporte (de sus siglas en inglés Support Vector Machines, SVM) para clasificar registros electroencefalográficos (EEG) en normales y patológicos. Los registros de EEG patológicos corresponden a personas con diagnóstico comprobado de epilepsia. El entrenamiento cruzado ha demostrado ser una técnica para eliminar selectivamente los vectores de soporte de error reduciendo la complejidad de la función subyacente, lo que implica una mayor posibilidad de clasificar las muestras con menor error. En esta técnica, la optimización se realiza en dos etapas, 1º) Se divide el conjunto de datos en un número elegido a priori de subconjuntos, y se entrena una SVM por cada subconjunto, 2º) Se halla el margen (distancia) de cada uno de los datos del conjunto de datos total a cada función de decisión, y se obtiene el margen promedio de cada muestra. Las muestras cuyo margen promedio esté fuera de cierto rango se eliminan del conjunto de datos. Luego se entrena la SVM final con el conjunto de datos reducido. Los resultados demuestran un alto desempeño en la clasificación de los patrones electroencefalográficos, obteniéndose una alta tasa de precisión mayor al 95%.*

Palabras Claves: Entrenamiento Cruzado, Epilepsia, EEG, Máquinas de Vectores Soporte.

1. INTRODUCCIÓN

La epilepsia es un trastorno crónico del cerebro caracterizada por convulsiones recurrentes que afecta a personas de todas las edades. Alrededor de 50 millones de personas a nivel mundial tienen epilepsia [1]. Cerca del 5% mundial de los pacientes con epilepsia son latinos y caribeños [2]. La epilepsia puede desarrollarse debido a, anomalías en la red neuronal cerebral, desequilibrio de los neurotransmisores, o alguna combinación de estos factores.

El electroencefalograma (EEG) es la herramienta que registra los potenciales eléctricos generados por fuentes de microcorrientes cerebrales por medio de electrodos ubicados sobre la superficie del cráneo [3,4] o directamente sobre la corteza cerebral, en cuyo caso recibe el nombre de electrocortigrama, ECoG. Las amplitudes pueden llegar a los 350 μV para los EEG superficiales, y de 1 a 2 mV para los ECoG. El rango de frecuencias de las ondas cerebrales va desde 1 Hz hasta los 50 Hz [5]. La medición puede ser de carácter bipolar o unipolar, colocando un electrodo de referencia o tomando como referencia el potencial promedio de todos los electrodos.

Las Máquinas de Vectores Soporte (de sus siglas en inglés *Support Vector Machines*, SVM) [6] son algoritmos de clasificación y regresión, cuyos requisitos de almacenamiento y cálculo crecen exponencialmente con el número de vectores de entrenamiento [7,8]. El clasificador basado en SVM está basado en rasgos de espectros de orden superior de las señales de EEG obtenidas de pacientes epilépticos y pacientes de control. Los EEG son series de tiempo altamente no lineales y no gaussianas que exhiben espectros de orden superior, los cuales se extraen y se utilizan como rasgos que mejoran el desempeño del clasificador [9].

El entrenamiento cruzado (EC) es un procedimiento para reducir el número de vectores de soporte (VS) acotados o de error. Con el entrenamiento cruzado es posible crear una distribución separable de ejemplos de entrenamiento con un impacto mínimo en la posición de la función de decisión [10], y romper la complejidad de SVM durante la etapa de entrenamiento.

Los estadísticos de orden superior son los momentos y cumulantes de orden mayor al segundo (los momentos de orden 1 y 2 son la media y la varianza). Los momentos de orden superior son generalizaciones naturales de la autocorrelación y los cumulantes son combinaciones lineales de los momentos. Los cumulantes de orden 3 y 4 son el *skewness* y la *kurtosis* [11] (su traducción es asimetría y apuntamiento). El *skewness* es una medida del grado de “inclinación” hacia a un lado de la media de una distribución de probabilidad (DP) de una variable aleatoria, puede ser positivo o negativo. La *kurtosis* es una medida de la dispersión de los datos en torno a la media de una DP de una variable aleatoria. La bicoherencia es una versión normalizada al cuadrado del biespectro de una señal que cuantifica el grado de acoplamiento de fase entre componentes espectrales de una señal. El biespectro se usa para buscar interacciones no lineales entre componentes espectrales de una señal [12]. El biespectro es la transformada de Fourier del cumulante de tercer orden. Si los cumulantes de tercer orden de un proceso son iguales a cero, su biespectro es cero, y su bicoherencia también. Si el biespectro no es cero, entonces el proceso es no-Gaussiana, y si el proceso es lineal y no-Gaussiana, la bicoherencia es una constante distinta de cero [11, 13, 14].

Este trabajo propone un entrenamiento cruzado de Máquinas de Vectores de Soporte con estadísticos de orden superior como rasgos de entrada para clasificar segmentos de señales EEG en normales y epilépticos.

2. BASE DE DATOS DE EEG

La base de datos utilizada en este artículo se describe en [15]. Está conformada por cinco conjuntos A, B, C, D y E, cada uno con 100 señales monocal de EEG de 23,6 segundos de duración cada uno, muestreados a 173,61 Hz. Estas señales EEG están libres de artefactos debido a la actividad muscular o movimientos de los ojos. Los conjuntos A y B (voluntarios despiertos, relajados con ojos abiertos y cerrados, respectivamente) consisten en segmentos tomados de los registros de EEG superficiales de cinco voluntarios sanos usando el sistema 10-20 de colocación de los electrodos. Los conjuntos C, D y E corresponden a ECoG de pacientes epilépticos. Los conjuntos C y D (tomados en el hipocampo de los hemisferios opuestos y dentro de la zona epileptogénica, respectivamente) contienen registros de la actividad cerebral medida durante los intervalos sin crisis. El conjunto E contiene registros durante la actividad convulsiva. La Figura 1 muestra una representación de las señales de los cinco conjuntos.

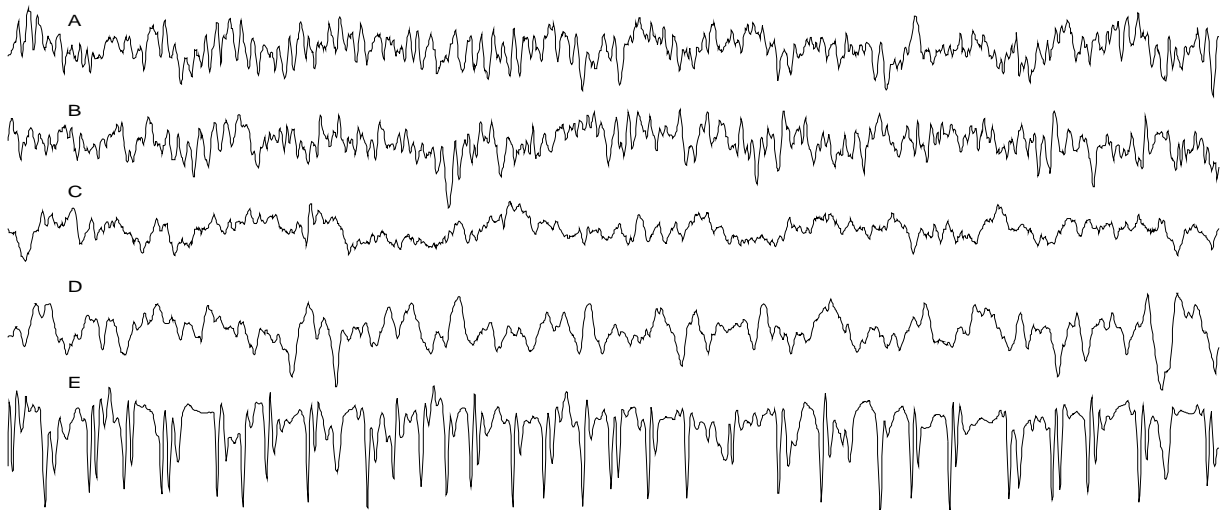


Figura 1. Segmentos de 10 segundos de ejemplo de cada uno de los cinco conjuntos A al E.

3. REVISIÓN TEÓRICA

3.1 Clasificador SVM de margen suave, C-SVM

Este trabajo está centrado en el clasificador SVM de margen suave llamado C-SVM [6,16,17], donde C es la constante de regularización que controla el balance entre maximizar el margen y minimizar el error. Dado n ejemplos de entrenamiento x_i y sus clases asociadas $y_i = \pm 1$, la función de decisión es, $f(x)$, es: $f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i K(x_i, x) + b^*$, donde α_i^* son los coeficientes de Lagrange, $K(\cdot, \cdot)$ es la matriz kernel, b^* es la distancia de la función de decisión al origen, y x es cualquier vector de prueba. Los coeficientes α_i^* se obtienen resolviendo el problema: $\alpha_i^* = \arg \max \sum_i \alpha_i - 1/2 \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j)$, sujeto a las restricciones: $0 \leq \alpha_i \leq C$ y $\sum_i \alpha_i y_i = 0$. El problema produce tres categorías de ejemplos que dependen del valor de α_i^* , y que deben cumplir las condiciones Karush-Kuhn-Tucker [6,17]. Los VS de frontera son aquellos vectores tal que $0 < \alpha_i^* < C$, su margen es 1 (bien clasificados). Los VS no acotados o de error tienen margen negativo (mal clasificados) y $\alpha_i^* = C$. Los ejemplos con $\alpha_i^* = 0$ no contribuyen en la función de decisión SVM, tienen margen mayor que 1 (bien clasificados).

3.2 Entrenamiento cruzado (EC)

La función decisión f puede ser expresado por múltiples combinaciones lineales de las funciones base $K(x_i; \cdot)$, ya que dichas funciones base $K(x_i; \cdot)$ asociadas a los VS x_i no constituyen necesariamente un conjunto linealmente independiente [10]. Existen métodos de reducción que intentan obtener un subconjunto de los VS que sea suficiente para expresar la función de decisión. En [18,19,20] afirman que el conjunto de VS obtenido no es linealmente independiente, por tanto, puede reducirse para producir la misma función de decisión. En [21] se propone calcular la forma reducida por filas de la matriz $K(x_i; \cdot)$ y eliminar aquellos VS que conducen a filas cero. El EC está inspirado en los algoritmos de edición de conjunto de entrenamiento propuestos por Hart [22]. El EC divide el conjunto de entrenamiento en S subconjuntos de tamaño r y entrena S SVMs independientes en cada subconjunto s_i . Las funciones de decisión de estas SVMs se utilizan para descartar los ejemplos de entrenamiento cuyos márgenes no cumplen cierto criterio. El algoritmo de EC es [22]: 1.- Dividir los datos en S subconjuntos de igual tamaño no solapados. 2.- Entrenar las S SVMs usando cada subconjunto como conjunto de entrenamiento. 3.- Calcular el margen promedio para cada ejemplo de entrenamiento (x_i, y_i) . 4.- Eliminar los ejemplos de entrenamiento cuyo margen promedio m_i se encuentra fuera del intervalo cerrado $[0,1]$. 5.- Entrenar la SVM final con los ejemplos de entrenamiento restantes.

3.2 Estadísticos de Orden Superior

El *skewness* está definido como $C_{3x}(0,0) = E\{x^*(n)x(n)x(n)\}$, la *kurtosis* se define como, $C_{4x}(0,0,0) = E\{x^*(n)x(n)x(n)x^*(n)\} - 2C_{2x}(0)C_{2x}(0) - M_{2x}^*(0)M_{2x}(0)$ donde $C_{2x}(0)$ es la varianza. El biespectro $P_{3x}(f_1, f_2)$ y su *cumulante* está relacionado a la Transformada de Fourier de la señal respectiva por $P_{3x}(f_1, f_2) = E\{X^*(f_1 + f_2)X(f_1)X(f_2)\} = \sum_{k,m=-\infty}^{\infty} C_{3x}(k, m)e^{-2\pi i(f_1 k + f_2 m)}$. En [9,11] puede hallar un desarrollo más extenso de los estadísticos de orden superior.

4. PARTE EXPERIMENTAL

Los EEG de la base de datos ya están filtrados con un filtro pasa banda entre 0.53 Hz y 40 Hz [22]. Se eliminó el ruido de línea con un filtro de ranura sintonizado a la frecuencia de línea. Se obtuvo 2098 subsegmentos de 2000 muestras cada uno, en total, se generaron 10490 subsegmentos de EEG. Los subsegmentos de los conjuntos A y B se etiquetaron con -1 (normal) y aquellos pertenecientes a los conjuntos C, D y E se etiquetaron +1 (epiléptico). A cada subsegmento se le removió la media, y se calcularon los siguientes rasgos: potencia de la señal, *skewness*, *kurtosis* y la máxima coherencia. Los rasgos se normalizaron entre ± 1 . Se tomó el 80% de los datos para entrenar y el 20% para validar. Los datos de entrenamiento se dividieron en diez subconjuntos. En todos los experimentos se utilizó el algoritmo C-SVM de LIBSVM [23], con el kernel RBF ($\sigma = 20 \rightarrow \gamma = 0,00125$), en las diez SVMs se fijó $C = 10^3$, en la última SVM, C se fijó en ∞ [10], en la práctica se fijó en 10^8 . Las medidas de desempeño fueron la *sensibilidad* (fracción de casos verdaderos positivos, VP, clasificados como positivos con respecto a los VP), la *especificidad* (fracción de los casos verdaderos negativos, VN, clasificados como negativos con respecto a los VN), la *precisión* (fracción de los casos VP con respecto a todos los ejemplos clasificados como positivos, VP y falsos positivos), la *exactitud* (fracción de los casos clasificados VP y VN con respecto a todos los ejemplos) y el *Valor-F* (*F-score*), esta última medida combina la *precisión* y la *sensibilidad*. El *Valor-F* está dado por

$2 \times \text{Precisión} \times \text{Sensibilidad} / (\text{Precisión} + \text{Sensibilidad})$. Se realizaron múltiples corridas de entrenamiento cruzado y se tomaron los valores promedios que se muestran en la Tabla 1. La Tabla 1 también muestra las medidas de desempeño del clasificador obtenido usando el entrenamiento convencional de una sola SVM.

Tabla 1. Medidas de desempeño de los entrenamientos cruzado y convencional (una SVM)

Tipo Entrenam.	Fase	Nº VS ⁽¹⁾	<i>Sensibilidad</i>	<i>Especificidad</i>	<i>Precisión</i>	<i>Valor-F</i>	<i>Exactitud</i>
Cruzado	Entren.	25	0.9994	0.9999	0.9999	0.9997	0.9996
	Valid.	-	0.9154	0.9440	0.9672	0.9360	0.9270
Una SVM	Entren.	2283	0.9802	0.8973	0.9349	0.9570	0.9471
	Valid.	-	0.9808	0.9139	0.9438	0.9619	0.9538

⁽¹⁾Nº VS: Número de Vectores de Soporte.

En la Tabla 1 se observa una gran reducción del número de vectores de soporte (≈ 91 a 1) con altas *sensibilidad* (91,54% de los VP fueron clasificados como positivo) y *especificidad* (94,40% de los VN fueron clasificados como negativo), también tiene alta *precisión* (el 96,72% de los clasificados como positivo son VP, es decir, el 3,28% de los casos VN fueron clasificados como positivo). Es evidente el alto *Valor-F*, mayor que la *sensibilidad*, ya que la *precisión* fue bastante alta. También se observa de la Tabla 1 que la precisión del clasificador obtenido con el entrenamiento cruzado es mayor que la obtenida con el clasificador obtenido convencionalmente.

5. CONCLUSIONES

El clasificador propuesto demostró su potencial aplicación clínica en la detección de trazados EEG epilépticos diferenciándolos de los trazados normales. El clasificador obtenido con entrenamiento cruzado (EC) tuvo alta precisión, más del 95% de los casos epilépticos fueron clasificados positivos y menos del 4% de los casos normales fueron clasificados epilépticos (falso positivo). El número de vectores de soporte se redujo bruscamente con un mínimo impacto en la exactitud del clasificador. En general, el EC demostró ser una metodología potente para minimizar el número de vectores de soporte y mantener bajo el error de generalización.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC) por el financiamiento de la difusión de la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, 2012. Epilepsy. Nota Descriptiva Nº 999. Disponible: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs999/en/index.html>.
- [2] OPS, ILAE, Buró Internacional de Epilepsia y Organización Mundial de la Salud, 2008. Informe sobre la Epilepsia en Latinoamérica. Coordinador del informe: Dr. Carlos Acevedo. Disponible: http://new.paho.org/hq/dmdocuments/2008/Informe_sobre_epilepsia.pdf.
- [3] Nunez Paul L., 2009, Physiological Foundations of Quantitative EEG Analysis in Quantitative EEG Analysis Methods and Clinical Applications, Artech House.
- [4] Paul L. Nunez and Ramesh Srinivasan (2007), Scholarpedia, 2(2):1348. doi:10.4249/scholarpedia.1348.

- [5] Malmivuo J. and Plonsey R. (2005), Bioelectromagnetism, Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields, Oxford University Press, New York.
- [6] V. Vapnik, "Statistical Learning Theory", Wiley, New York, 1998.
- [7] T.Joachims, "Making Large-Scale Support Vector Machine Learning Practical", in Advances in Kernel Methods, Cambridge, MIT Press, 1999.
- [8] J. C. Platt, "Fast Training of Support Vector Machines Using Sequential Minimal Optimization", in Advances in Kernel Methods, Cambridge, MIT Press, 1998.
- [9] Seijas Cesar, Caralli Antonino, and Villazana Sergio. "Neuropathology Classifier Based on Higher Order Spectra." Journal of Computer and Communications 1 (2013): 36.
- [10] Bakır, G., Bottou, L., & Weston, J. (2005). Breaking SVM Complexity with Cross Training. Advances in Neural Information Processing Systems, 17, 81-88.
- [11] Swami, A., Mendel, J. M., & Nikias, C. L. (2000). Higher-order Spectral Analysis Toolbox: for Use with MATLAB: User's Guide. Version 2.0. Mathworks, Incorporated.
- [12] Chua, K. C., Chandran, V., Acharya, U. R., & Lim, C. M. (2011). Application of higher order spectra to identify epileptic EEG. Journal of medical systems, 35(6), 1563-1571.
- [13] Ning, T., & Bronzino, J. D. (1990). Autoregressive and bispectral analysis techniques: EEG applications. Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, 9(1), 47-50.
- [14] Salai Selvam, V., and S. Shenbagadevi. (2013). "Bispectral Analysis of Scalp Electroencephalograms: Quadratic Phasecoupling Phenomenon in Detecting Brain Tumor." American Journal of Applied Sciences 10.3: 294-306.
- [15] Andrzejak, R. G., Lehnertz, K., Mormann, F., Rieke, C., David, P., & Elger, C. E. (2001). Indications of nonlinear deterministic and finite-dimensional structures in time series of brain electrical activity: Dependence on recording region and brain state. Phys. Rev. E, 64(6), 061907.
- [16] Burges, C. J. C. (1998). A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. Data Mining and Knowledge Discovery, 2(2):121–167.
- [17] Christianini, Nello, and Shawe J. Taylor. "An introduction to support vector machines (and other kernel-based learning methods)." (2000).
- [18] Syed, Nadeem Ahmed, et al. "Incremental learning with support vector machines." (1999).
- [19] Burges, Christopher JC. "Simplified support vector decision rules." ICML. Vol. 96. 1996.
- [20] C. J. C. Burges and B. Schölkopf. Improving speed and accuracy of support vector learning machines. Advances in Neural Information Processing Systems, 9, MIT Press, 1997, 375-381.
- [21] Downs, Tom, Kevin E. Gates, and Annette Masters. "Exact simplification of support vector solutions." The Journal of Machine Learning Research 2 (2002): 293-297.
- [22] Hart, P. (1968). The condensed nearest neighbor rule. IEEE Transaction on Information Theory, (14):515–516.
- [23] Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin, LIBSVM: a library for support vector machines. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2:27:1--27:27, 2011. Software available at <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.

APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE WAVELET Y MAQUINAS DE VECTORES DE SOPORTE PARA IDENTIFICAR EL ESTADO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES

Elimar Hernández

Carlos Jiménez

elimarvilar@hotmail.com

carlosjimenezing@gmail.com cjimenez@uc.edu.ve

Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia-Venezuela.

Resumen. *En este trabajo se realizó un procedimiento para identificar el estado de funcionamiento de los motores y predecir su funcionamiento a partir del análisis de las variables eléctricas utilizando la transformada de wavelet y máquina de vectores de soporte. Para la obtención de rasgos que representarían indicadores del estado del motor se aplicó la transformada de wavelet haciendo ajustes a sus parámetros. Las variables eléctricas el flujo y la corriente estática fueron obtenidas a través de un sistema de adquisición. Se utilizaron motores en buen estado y con fallas. Los motores con fallas se les hizo perforación a uno en la pista interna del rodamiento y a otro en la pista externa del rodamiento. Otro motor con falla utilizado es el que presentaba desgaste del rodamiento. Las condiciones de operación de los motores fueron en plana carga y a 5/7 de su plena carga. La transformada de Wavelet se utilizó para procesar las variables eléctricas y obtener los rasgos para ser utilizados como discriminantes para el clasificador. Las Wavelets madres empleadas fueron la Haar, Daubechies, Coiflet y Symlets y se analizaron diferentes niveles de descomposición. Para la máquina de vectores de soporte se utilizaron diferentes funciones Kernel y se ajustaron los parámetros de la misma. Los resultados se mostraron en tablas, con la indicación del error total y la máquina de soporte vectorial con los parámetros de entrenamiento que mejor resultado produjo.*

Palabras Claves: Motor, Wavelet, Máquinas de Vectores de Soporte, predicción

1. INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos de inducción son pieza fundamental en todo proceso industrial. Debido a los constantes esfuerzos de carga y a los procesos cada vez más complejos a los que son sometidos estos motores, hay un incremento en las fallas y aspectos como seguridad, confiabilidad, eficiencia y buen funcionamiento son algunas de las mayores preocupaciones. En este sentido las técnicas para diagnosticar a tiempo el estado de los motores juegan un

papel importante para dar continuidad en la operación del sistema y evitar paradas de forma no planificada que pueden generar pérdidas económicas a la empresa.

De esta manera, la presente investigación tiene por objetivo desarrollar un clasificador binario que permita identificar el estado de funcionamiento del motor a partir del análisis de las variables eléctricas utilizando como herramientas la transformada de wavelet (TW) y las máquinas de vectores de soportes (MVS). En este trabajo se utilizó la TW como una técnica para extraer características de las señales del motor que permitieron facilitar el proceso de clasificación y por otro lado se emplearon las MVS para clasificar, pues ambas (TW y MVS) han demostrado un excelente desempeño en este tipo de aplicaciones.

2.1 Transformada de wavelet

La transformada Wavelet (TW) se puede comparar con la conocida transformada de Fourier (TF). Ambas transformadas analizan una señal $f(t)$ comparándola con otra señal más simple y de la cual se conocen a priori sus características. El resultado de esta transformación son coeficientes que mientras más parentesco exista entre la señal original y la función de comparación mayor será el valor de los mismos, a diferencia de la transformada de Fourier, la transformada de Wavelet, puede entregar información temporal y frecuencial en forma cuasi-simultánea, mientras que la TF sólo da una representación frecuencial.

La transformada de Wavelet permite realizar un análisis de múltiple resolución (MRA), lo cual descompone la señal con distinta resolución para diferentes frecuencias. El análisis de las señales con la transformada de wavelet es equivalente a un proceso de filtrado, donde se realiza una división de los coeficientes, obteniéndose los coeficientes de aproximación (A) y detalle (D). El proceso de filtrado o descomposición se itera, para descomponer la señal en N niveles, cada una con una resolución más baja. Lo anterior da origen a una descomposición multinivel conocida como ramificación o árbol de descomposición Wavelet, cuya idea es expuesta en la fig.1 [1, 2, 3,4].

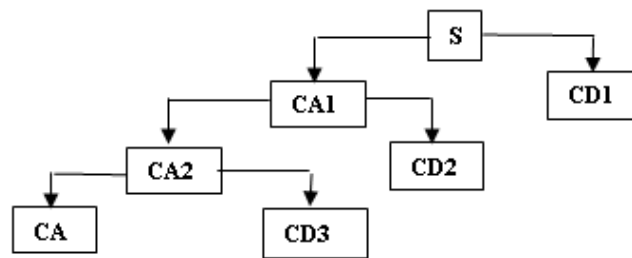


Figura 1. Árbol de descomposición Wavelet.

2.2 Máquinas de Vectores de Soporte

La máquina de los vectores de soporte (MVS) es un método general para la resolución de problemas de clasificación, regresión y estimación. La idea principal de las máquinas de vectores de soporte es construir un hiperplano como una superficie de decisión en la cual se maximice el margen de separación entre los ejemplos positivos y negativos o las clases.

Existen Máquinas de Vectores de Soportes no lineales, que se aplican en el caso donde se necesitan funciones no lineales para delimitar las clases de los datos. Se hace una

transformación de los puntos de entrenamientos a un espacio distinto, llamado espacio de características de mayor dimensión, buscando con esto que en el nuevo espacio, las clases tengan una mayor probabilidad de ser separadas linealmente. Para esto se utiliza una función Kernel Φ donde se mapeara el espacio de entradas X a un nuevo espacio de características de mayor dimensionalidad. [5, 6,7].

3. Diseño del clasificador binario para detectar el estado de funcionamiento de los motores de inducción.

Dentro de las fallas que afectan el funcionamiento del motor de inducción, las más frecuentes son las producidas en los rodamientos, como consecuencia del permanente movimiento y variados estados de carga a los que están sometidos los mismos, de allí, que para efectos de esta investigación se seleccionó como data aquella que tomara en cuenta este tipo de fallas. [8, 9, 10,11]

Para la simulación de las fallas en las pistas internas y externas de los rodamientos de los motores de inducción se tomaron dos rodamientos en buen estado y se le realizó una perforación en la pista interna de uno de los rodamientos y en la pista externa del otro. Las fallas consideradas fueron: Falla en pista interna, Falla en pista externa y Falla en los elementos rodantes.

Para definir el clasificador más óptimo se realizaron ocho ensayos diferentes considerando variaciones en los parámetros de la transformada de Wavelet y de la máquina de vectores de soporte SVM para dos condiciones de funcionamiento del motor, quedando distribuidos de la siguiente manera:

a) Motor operando a 5A (5/7 de su plena carga)

Ensayo I (EA-PB): Entrenamiento con datos del motor A y prueba con datos del motor B

Ensayo II (EB-PA): Entrenamiento con datos del motor B y prueba con datos del motor A

Ensayo III (EA-PA): Entrenamiento con datos del motor A y prueba con datos del motor A

Ensayo IV (EB-PB): Entrenamiento con datos del motor B y prueba con datos del motor B

b) Motor operando a 7A (Plena carga)

Ensayo V (EA-PB): Entrenamiento con datos del motor A y prueba con datos del motor B

Ensayo VI (EB-PA): Entrenamiento con datos del motor B y prueba con datos del motor A

Ensayo VII (EA-PA): Entrenamiento con datos del motor A y prueba con datos del motor A

Ensayo VIII (EB-PB): Entrenamiento con datos del motor B y prueba con datos del motor B

Los ensayos se realizaron modificando para la MVS su función Kernel (Lineal, Polinomial, y Base radial) y sus parámetros de sintonía, por otro lado, para la TW se varió la Wavelet Madre (Los tipos de Wavelet utilizadas en esta investigación fueron: Haar, Daubechies, Coiflets y Symlets) y el nivel de descomposición.

4. RESULTADOS

En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos, considerando como data original aquella a la que no se le aplicó la Transformada de Wavelet y de este modo evaluar el beneficio que aporta al clasificador la aplicación de dicha técnica sobre la data antes de introducirla a la máquina de vectores de soporte. La data utilizada en estos ensayos se seleccionó aleatoriamente. Un total de 240 muestras se eligieron del total de los datos

disponible (720) para realizar las pruebas, esta muestra se separó en dos, una parte para entrenamiento (160) y otra para validación (80).

GRUPO I: Motor operando a 5A (5/7 de su plena carga)

En este ensayo a la data de corriente estática en el tiempo para la condición de 5A se le aplicó la TW, utilizando como Wavelet madre la db5, de donde se tomaron los coeficientes de aproximación 1 y a los cuales se le determinaron los momentos de orden 12 y 20. El tamaño de la data es de 120, de los cuales se tomaron 80 para la etapa de entrenamiento y 30 para la fase de prueba, finalmente estos momentos se aplicaron a la MVS utilizando como función kernel la 'rbf'. Lo indicado anteriormente define las características del clasificador más óptimo y los mismos fueron determinados después de realizar diferentes ensayos en los cuales se modificaban los parámetros de la transformada de Wavelet, de los momentos y de la máquina de vectores hasta lograr alcanzar el mayor porcentaje de acierto. (Ver tabla 1)

Tabla 1. Porcentaje de acierto del clasificador para la condición de operación de 5A

Condición	ENSAYO	DATOS ORIGINALES (sin TW)		APLICANDO WAVELET	
		Nº de errores	% de acierto	Nº de errores	% de acierto
5A	EA_PB	0	100	0	100
	EB_PA	5	93,75	2	97,5
	EA_PA	0	100	0	100
	EB_PB	0	100	0	100

GRUPO II: Motor operando a 7A (Plena carga)

En este grupo solo se modifica la data, considerando aquí la corriente estática para la condición de operación de plena del motor. Los parámetros del clasificador siguen siendo: wavelet madre db5, coeficiente de aproximación 1, momentos 12 y 20 y MVS con kernel igual a 'rbf' (Ver tabla 2)

Tabla 2. Porcentaje de acierto del clasificador para la condición de operación de 7A

Condición	ENSAYO	DATOS ORIGINALES		APLICANDO WAVELET	
		Nº de errores	% de acierto	Nº de errores	% de acierto
7A	EA_PB	10	87,5	2	97,5
	EB_PA	1	98,75	0	100
	EA_PA	6	92,5	3	96,25
	EB_PB	0	100	0	100

4.1 Análisis de las pruebas desarrolladas

El grupo de pruebas realizadas se enfocaron en la generación de un clasificador basado en MVS y TW, que al ser entrenado con un conjunto de datos de corrientes estáticas asociados al motor con rodamientos en buen y mal estado, podría predecir la condición de funcionamiento asociada a los datos introducidos en la fase de prueba. El análisis de los resultados obtenidos se agrupa en dos casos:

- **Caso I:** Se encuentran las pruebas en las cuales se realizó el entrenamiento con los datos asociados a un motor y la predicción con los datos pertenecientes a otro motor, esto permitió medir la capacidad de predicción del modelo frente a datos pertenecientes a otro motor que no intervinieron en la etapa de entrenamiento. En las condiciones de 5/7 carga y carga nominal se obtuvieron porcentajes de predicción mayores al 97 por ciento, lo cual demuestra la gran capacidad del modelo generado para la detección de fallas en estado incipiente a través del análisis de las corrientes estatóricas del motor.

- **Caso II:** Aquí se encuentran las pruebas en las cuales se realizó el entrenamiento y la predicción con los datos pertenecientes a un mismo motor, en esta etapa se apreció el comportamiento del modelo frente a datos pertenecientes al mismo motor pero que no intervinieron en el entrenamiento. Se observó que en la mayoría de los casos el modelo generado presenta una capacidad de predicción del 100 por ciento, a excepción de los datos pertenecientes al ensayo VII en el cual se obtuvo 96,25 por ciento de acierto. No obstante, se demuestra un error de predicción bajo en el reconocimiento de patrones que pertenecen a un mismo motor.

5. CONCLUSIONES

La presente investigación demostró que la Máquina de vectores de soporte empleada como clasificador es capaz de estimar con alto porcentaje de acierto el estado de funcionamiento de los motores y que su combinación con las TW mejora su rendimiento disminuyendo en la mayoría de los casos el porcentaje de error en la estimación. Adicionalmente se encontró que al extraer los momentos de orden superior a los coeficientes obtenidos de la transformada se logra una mejor capacidad de discriminación entre las diferentes clases.

Los ensayos se realizaron aplicando como entrada la corriente estatórica en el tiempo. Estos ensayos también se realizaron con el flujo de la maquina como entrada al clasificador sin embargo para este caso la capacidad de acierto fue menor, incluso la separación de las clases no fue tan efectiva.

El análisis de los momentos de los coeficientes de la transformada mostró que los momentos pares generan lo que se considera una buena agrupación y separación de las clases, específicamente en este trabajo se seleccionaron los momentos 12 y 20.

Se verificó la utilidad de la Transformada Wavelet como una herramienta adicional para el procesamiento previo de la data a ser aplicada a la máquina de vectores pues, en el 50% de los ensayos realizados se logró mejorar el porcentaje de acierto en la predicción del estado del motor y en ningún caso se obtuvo un porcentaje menor con respecto a aquellos que no incluían la Transformada de Wavelet. La Wavelet madre que permitieron un mejor diagnostico fueron la Daubechies-5 y la Symlets-5.

En cuanto al tiempo de procesamiento de los datos se puede apreciar en la simulación de los ensayos que el mismo fue de 0,3s para la MVS y de menos de 4s para el cálculo de los momentos y la transformada de Wavelet, el cual resulta en un tiempo de respuesta rápido. Es importante considerar que la evaluación de los Tiempos de procesamiento está fuertemente asociada a la capacidad de cálculo del hardware donde se ejecuta la aplicación. Para los

resultados que se presentaron se utilizó un computador con procesador Pentium IV con frecuencia de trabajo de 2.1 Giga Hertz y con 512 MB de RAM.

El modelo desarrollado presentó una capacidad de predicción mayor del 96% de acierto. Durante los ensayos se entrenó con los datos asociados a un motor y la predicción con los datos pertenecientes a otro motor, así mismo se entrenó y probó con los datos de un mismo motor pero que no intervinieron en la etapa de entrenamiento. Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten asegurar que son un método efectivo y exitoso para predecir la condición de funcionamiento de los motores eléctricos y resulta una herramienta valiosa para fundamentar programas de mantenimiento de tipo preventivo y predictivo.

REFERENCIAS

- [1] Chui, K., Charles. *An Introduction in Wavelet*. Academia Press Inc. Reino Unido. 1992
- [2] Mallat, S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Segunda Edición Academic Express U.S.A. 1998
- [3] Kaiser, G. *A Friendly Guide to Wavelets*. Birkhauser U.S.A. 1999.
- [4] Rao, R., Bopardikar, A. *Wavelet Transforms. Introduction to Theory and Applications*. Addison Wesley. 1998.
- [5] Betancourt, G. Las máquinas de Soporte Vectorial (SVMs) *Scientia Technica* Año XI, No 27, Abril 2005 UTP, ISSN 01222-1701. 2005.
- [6] Gunn, S. *Support Vector Machines for Classification and Regression*. Faculty of Engineering and Applied Science. University of Southampton USA. 1998
- [7] Crisianini, N., Shawe–Taylor, J. *An introduction to support vector machines*. 1999.
- [8] Verucchi, C., Acosta, G. *Técnicas de Detección y Diagnóstico de Fallos en Máquinas Eléctricas de Inducción*. 2004
- [9] Carvajal, F., Ramírez, J., Arco L. *Diagnostico en línea y fuera de línea de motores de inducción de baja, media y alta tensión*. 1999
- [10] Rodríguez I, Rubén T, Alves R. *Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción, empleando la Técnica de Vectores de Soport*. 2009
- [11] Chapman, S. *Máquinas eléctricas*. Segunda edición. 1993

EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE FABRICACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD COMO ASISTENTE A LA ENSEÑANZA DE CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

María F. Velasco B

Maria.velasco@inabio.edu.ve

Universidad Nacional Experimental del Táchira, Urbanización Paramillo, San Cristóbal, Edo. Táchira, Venezuela

Vannessa Duarte

Yomar González

vannessa.duarte@inabio.edu.ve

yomar.gonzalez@inabio.edu.ve

Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela Ciudad Universitaria, Av. Los Estadios, Los Chaguaramos, Caracas-Venezuela

Abstract. *Durante un procedimiento quirúrgico laparoscópico se requiere de la asistencia precisa del manejo de cámara durante la cirugía, además de un espacio adecuado de trabajo para un buen desempeño, es por esto que se propone el diseño de un asistente para el control y posicionamiento de la cámara en cirugía laparoscópica. La configuración de un brazo robótico de dos grados de libertad contempla un extenso trabajo de investigación, iniciando en la evaluación de la propuesta de un prototipo de brazo robótico como elemento principal para asistir el manejo de la cámara de intervenciones quirúrgicas laparoscópicas, resultando importante conocer las dimensiones que permiten realizar movimientos precisos así como los componentes mecánicos y físicos involucrados en la trayectoria y desplazamiento del robot. Una vez establecidos los parámetros que deben cumplir los dispositivos a seleccionar, se validó las condiciones en las cuales trabajaría el robot una vez ensamblado, lo cual se realizó mediante herramientas computacionales para simular la cinemática basada en las aplicaciones del robot, así como también el uso de una articulación pasiva para mejorar el posicionamiento de éste. De acuerdo a lo anterior, se prepuso un brazo robótico, formado por una articulación giratoria la cual se acopla al servomotor por medio de una cinta transportadora y una lineal que se produce mediante un mecanismo piñón-cremallera, así como también los materiales que conformarán este asistente y los movimientos que éste debe realizar.*

Key words: laparoscopia, robótica, asistentes laparoscópicos, diseño

1 INTRODUCCIÓN

Los asistentes robóticos como herramienta dentro del quirófano han demostrado su valor inobjetable al superar en precisión y calidad la posición de la óptica respecto a los asistentes humanos [[1] y [2]]. Ventajas adicionales de utilizar esta tecnología, es el mayor espacio de trabajo sobre la mesa quirúrgica y la posibilidad de realizar una cirugía en solitario. Los asistentes robóticos para este tipo de cirugía con la mayor cantidad de procedimientos reportados son el AESOP, Endoassist [3].

Las fallas humanas son uno de las principales causas que pueden ocasionar cortes perjudiciales para la integridad del paciente o cortes en zonas donde no habría necesidad de hacerlos. En el caso de la cirugía laparoscópica, es necesario introducir una pequeña cámara al interior del cuerpo del paciente, las fallas humanas debido a fatiga o dificulta la comunicación entre cirujano y auxiliar, pueden ocasionar vibraciones no deseadas o el enfoque hacia un lugar incorrecto, repercutiendo en la recepción de una óptima imagen de lo que sucede al interior del paciente [1].

Lastimosamente las fallas permanecen intrínsecas en la naturaleza humana, es por esta razón que en ingeniería se desarrollan herramientas auxiliares para aumentar la precisión de los procedimientos quirúrgicos [4]. Por este motivo se elaboró una propuesta de un asistente a la enseñanza para el posicionamiento de cámara en procedimientos de cirugía laparoscópica de dos grados de libertad, ante la necesidad de sustituir al personal encargado del manejo de la cámara para estas intervenciones por un asistente robótico de asistencia médica.

2 ARQUITECTURA EXTERNA DEL ASISTENTE LAPAROSCOPICO

Los criterios de diseño del asistente laparoscópico se basaron en los requerimientos funcionales que demanda el procedimiento quirúrgico, tomando en cuenta aspectos de gran importancia como lo es el un espacio de trabajo reducido, la cantidad de movimientos necesarios para posicionar la cámara y el espacio ocupado por el asistente [5]. El prototipo propuesto consta de un brazo de dos grados de libertad con una base circular, un eslabón y un efector (ver Figura 1). Basados en investigaciones previas [[3],[4], [5]] y en las simulaciones con diferentes prototipos planteados se omitió la articulación del codo ya que puede producir inestabilidad o movimientos no deseados, logrando un mejor resultado con un eslabón completo, reduciendo el uso de componentes mecánicos y actuadores necesarios para producir movimiento en esta área. El efector o pinza posee forma de anillo lo que proporciona una mayor libertad de movimiento y por tanto un mejor posicionamiento de la cámara al momento de una intervención quirúrgica.

2.1 Actuadores

Para los dos actuadores se escogió el uso de servomotores, simplificando el diseño gracias a los circuitos de control que poseen, logrando un posicionamiento más preciso y no requieren elementos externos para su control como es el caso de los motores DC. La ventaja que proporciona el uso de servomotores es que permiten el control de velocidad y torque dependiente del voltaje suministrado en los terminales de alimentación, evitando el uso de sistemas externos como engranajes. El control de voltaje se suministra mediante una tarjeta de control para servomotores Hitec HS-311 y micro servo Hitec HS-55.

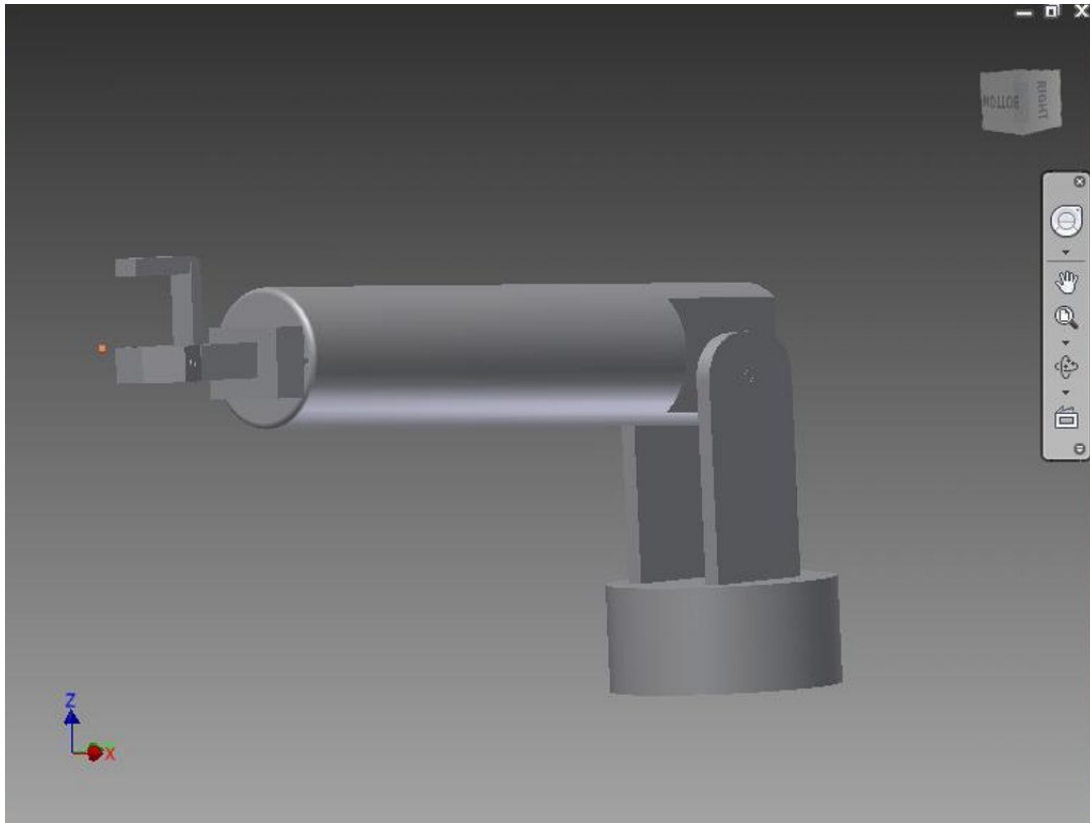


Figura 1: Modelo final propuesto

2.2 Sistema de transmisión

El sistema de transmisión de la primera articulación consta de un perno de 1/4 de pulgada y 10 cm de largo que unirá la base con el eslabón sujeto con una tuerca acoplada al servomotor para producir movimiento a través de una cinta transportadora. La segunda articulación produce un movimiento lineal por medio de un mecanismo piñón- cremallera. El piñón se unirá con el eje del micro servo y al girar producirá el movimiento, permitiendo que la cremallera se desplace de manera lineal.

2.3 Materiales

El material que conformara la estructura física del asistente laparoscopico, es decir el eslabón, la base y el efector, debe ser un material liviano que no ofrezca mayores cargas a los servomotores, es por esto que se escogió un polímero líquido a temperatura ambiente como es la resina epoxica, obteniendo la pieza deseada mediante moldes de yeso compacto.

2.4 Cinemática

El asistente laparoscopico de dos grados de libertad cuenta con un movimiento rotatorio entre la base y el eslabón y uno lineal entre el extremo superior del eslabón y el efector final. El primero

permite ubicar la cámara a la altura requerida por el movimiento arriba-abajo del eslabón, el segundo posterior a lograr la altura requerida pueda trasladarse según se requiera en determinado momento de la intervención quirúrgica. Para el cálculo de la posición y el desplazamiento del asistente laparoscópico se aplicó cinemática directa [6], calculada mediante ecuaciones sencillas de trigonometría, definiendo el valor en el plano del punto X (Ec. 1), Y (Ec.2) y Z (Ec. 3), donde L es la longitud del eslabón y K el desplazamiento lineal realizado por el efector final.

$$\text{Cos}(\theta) = \frac{X}{L} \quad (1)$$

$$\text{Sen}(\theta) = \frac{Y}{L} \quad (2)$$

$$Z = K \quad (3)$$

Mediante la utilización del Robotworks® se simuló el movimiento cuyas ecuaciones fueron introducidas en el programa Labview®, cuyos indicadores mostraron el valor de cada punto mediante el movimiento producido por el asistente robótico Fig.2, en donde el acople entre ambos programas permite observar los movimientos y desplazamientos al introducir diferentes ángulos a dichas ecuaciones para conocer la posición del efector final (Fig. 3).

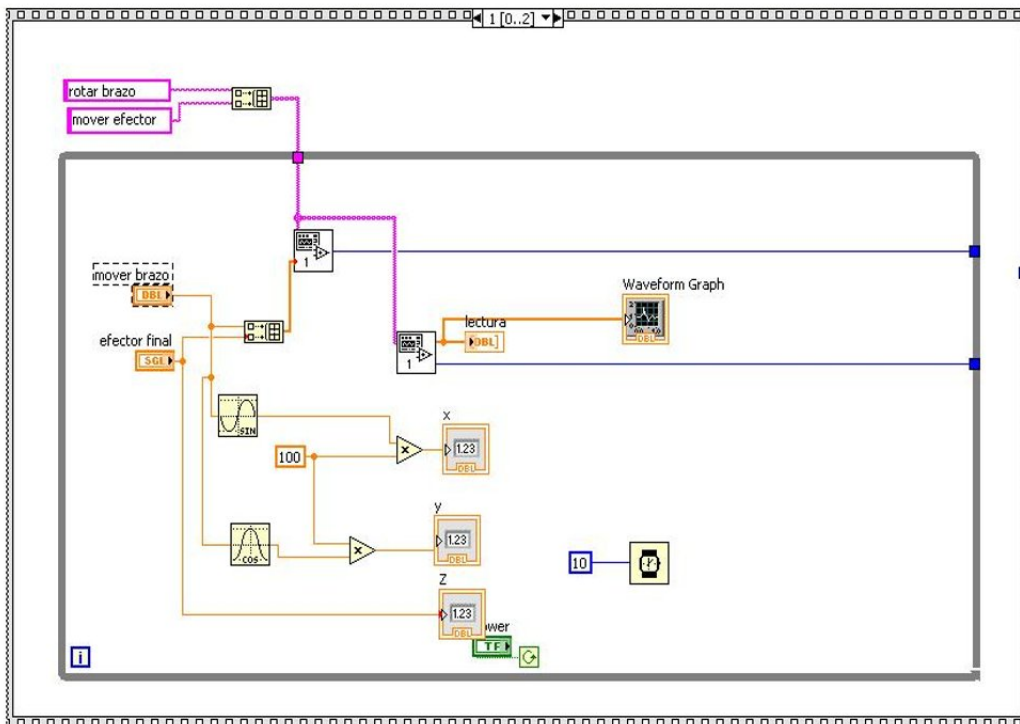


Figura 2: Diagrama de bloques en LabView®

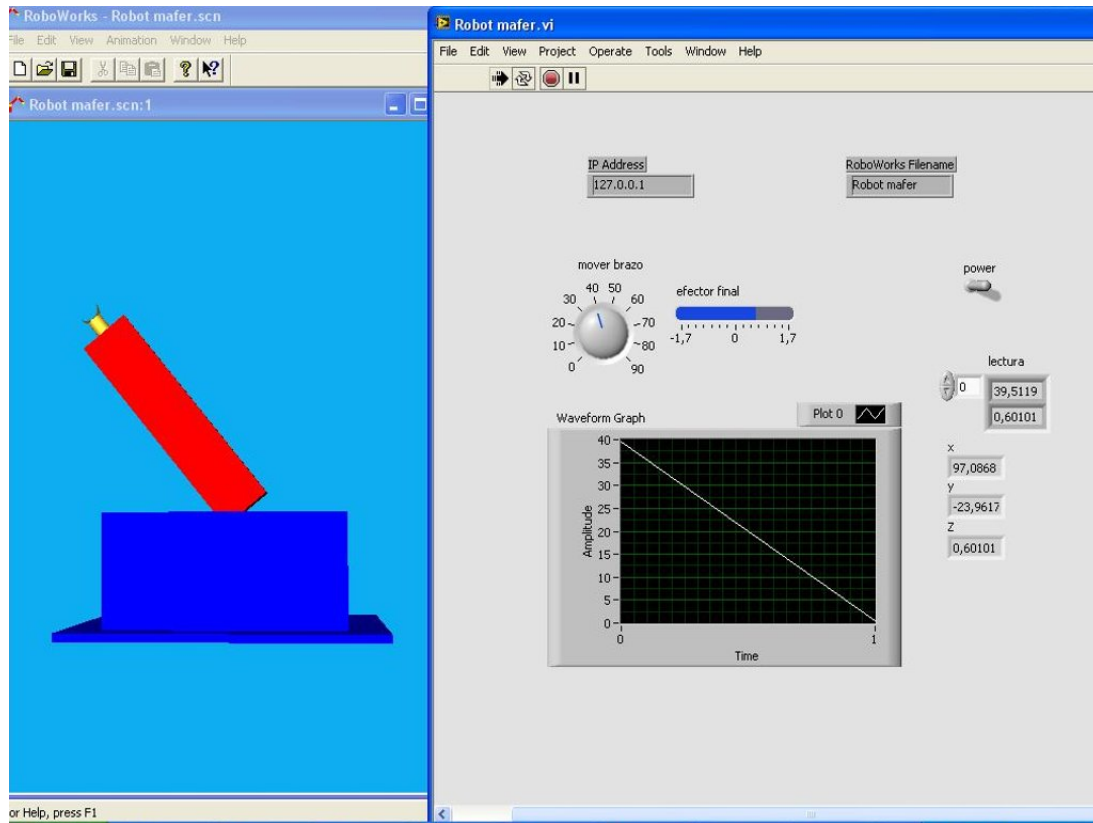


Figura 3: Robotworks® enlazado con LabView®

Después de analizar los elementos necesarios para la fabricación del prototipo de asistente laparoscópico se puede determinar que los componentes escogidos se encuentran en el mercado local (tabla 1.). Lo que indica la factibilidad de fabricación de un asistente robótico con fines académicos asistiendo el posicionamiento de cámara en cirugía laparoscópica.

3 CONCLUSIONES

Este trabajo muestra el diseño de una nueva estructura de asistente robótico para posicionamiento y fijación de la cámara de laparoscopia. La estructura diseñada con dos grados de libertad consta de uno eje rotatorio y otro de movimiento lineal con el fin de proporcionar un campo de trabajo preciso y seguro para el paciente y capaz de trabajar en espacios limitados y cumpliendo con los movimientos indispensables para el posicionamiento de la misma. La simulación del movimiento ha permitido evaluar la precisión y factibilidad de uso del dispositivo, modificando la angulación del mismo y al mismo tiempo se mostró que una articulación era innecesaria y podría causar efectos no deseados al ponerse en práctica su uso. A su vez, se demuestra que con materiales nacionales se puede llevar a cabo la construcción del mismo y realizar pruebas piloto del funcionamiento del robot.

Tabla 1: Materiales necesarios para la elaboración del asistente laparoscópico

Descripción	Cantidad
Resina epóxica	500 ml
Mecanismo piñón- cremallera	1
Perno	1
Molde de yeso	3
Servomotor Hitec H-311	1
Microservo Hitec HS-55	1
Yeso odontológico rosado	1kg
Cinta transportadora	1
Montaje para servo	1
Tornillos Allen	2

REFERENCES

- [1] PROSKE J.M., & DAGHER I., Comparative study of human and robotic camera control in laparoscopic biliary and colon surgery *Journal of Laparoendoscopic Advance Surgical Techniques- Part A14*, vol. 6, pp. 345-348, 2004.
- [2] QUAYLE S. & COLLYER S., comparison of a novel Endoscope Holder and traditional camera assistant for Laparoscopic simple Nephrectomy in a porcine model. *Journal of Endourology*, vol. 19, n. 2, pp. 218-220, 2005.
- [3] SATODATE & HITOSHI INOUE., Proper Arrangement of the lines and cables on the Setup of the Laparoscopic surgery; development of new device line-Hanger, *Surgical laparoscopic percutaneous techniques*, Vol. 14, n. 5, pp. 260-262, 2004.
- [4] CÓRDOVA A. & BALLANTYNE G., Sistema Quirúrgicos Robóticos y Tele robóticos para Cirugía Abdominal, *Revista de Gastroenterología del Perú*, vol.23, n. 1. 2003.
- [5] PIÑANGO A. & ZAMBRANO A., *Diseño y construcción de un simulador para cirugía laparoscópica*, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 2003.
- [6] MUÑOZ, LOZANO, GARCÍA & PÉREZ, Control cartesiano de un asistente robótico para cirugía laparoscópica, *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*, Vol. 3, Málaga, España, 2006.

ANÁLISIS DE LA ENTROPÍA APROXIMADA DE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA Y LA VARIABILIDAD DE LA DESPOLARIZACIÓN Y REPOLARIZACIÓN VENTRICULAR EN SUJETOS DIABÉTICOS

María G. Rodríguez

Miguel Altuve

marrodri@ucab.edu.ve

maltuve@usb.ve

Escuela Ing. de Telecomunicaciones, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela

Grupo de Bioingeniería y Biofísica Aplicada, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

Bhakti Guerra

Adriano Adrianza

Sara Wong

bhguerra.11@ucab.edu.ve

aadrianza.11@ucab.edu.ve

swong@usb.ve

Escuela Ing. de Telecomunicaciones, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela

Grupo de Bioingeniería y Biofísica Aplicada, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

Resumen. *La diabetes mellitus es una enfermedad metabólica caracterizada por la acumulación de glucosa en la sangre debido a la incapacidad del páncreas para producir suficiente insulina o a la incapacidad de las células para procesar la insulina que es producida. Más de 347 millones de personas padecen actualmente de diabetes y se estima que para el año 2030 ésta será la séptima causa de muerte a nivel mundial. De esos decesos, entre un 50% y 80% se deberán a causas cardiovasculares asociadas a la Neuropatía Autonómica Cardiovascular (NAC) como consecuencia de la diabetes. La NAC produce trastornos de la frecuencia cardíaca y de la dinámica vascular debido al daño de las fibras nerviosas autonómicas que inervan el corazón. La evaluación y el diagnóstico de la NAC puede ser realizada mediante pruebas no invasivas. Entre estas pruebas se encuentra la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC), variación en el tiempo de la longitud del ciclo cardíaco (intervalo RR en el electrocardiograma), siendo esta de poca variabilidad en pacientes con NAC. De la misma manera, la variabilidad en el tiempo de la duración de la despolarización y repolarización ventricular (variabilidad del intervalo QT del*

ECG o VQT) puede arrojar información sobre el estado cardiovascular de la persona. En este trabajo se pretende estudiar el nivel de entropía de las series VFC y VQT en sujetos diabéticos, con miras a encontrar información útil para la detección o el diagnóstico temprano de la NAC. Para alcanzar este propósito se utilizaron las señales ECG de 19 sujetos diabéticos con complicaciones cardíacas y de 11 sujetos control. Se determinó la entropía aproximada de cada una de las señales con el fin de obtener una medida de regularidad. Los resultados obtenidos muestran que existen diferencias significativas entre los grupos de estudio para la serie VQT ($p < 0,05$), pero no para la serie VFC ($p > 0,05$). El resultado obtenido para la entropía de la VQT ($p < 0,027$) confirma que existen anomalías en la regulación del sistema nervioso autónomo sobre la repolarización ventricular en la diabetes mellitus. En cuanto al valor observado para la entropía de la VFC ($p > 0,7$), este resultado puede deberse a que los pacientes diabéticos reciben tratamiento médico producto de su condición clínica.

Palabras claves: Procesamiento de señales biomédicas, Entropía aproximada, Neuropatía autonómica diabética cardiovascular, Variabilidad de la frecuencia cardíaca, Variabilidad del intervalo QT.

1. INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus (DM) es una enfermedad metabólica caracterizada por acumular glucosa en sangre debido a la incapacidad del páncreas para producir suficiente insulina o de las células para procesarla. La DM afecta a más de 347 millones de personas a nivel mundial y se estima que entre un 50% y un 80% mueren a consecuencia de complicaciones cardíacas [1], siendo la Neuropatía Autonómica Cardiovascular (NAC) la de mayor prevalencia y la menos estudiada en estos casos [2], [3].

El corazón se encuentra profundamente inervado por el Sistema Nervioso Autónomo (SNA), responsable del balance simpático-vagal que, conjuntamente, regulan las funciones autonómicas del cuerpo humano. Es posible examinar el estado del SNA a partir de la señal electrocardiográfica (ECG). Dado el ECG, se pueden obtener series temporales que revelan información del SNA. Dos de estas señales son: la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC) que es la variación del intervalo de tiempo entre latidos cardíacos, y la Variabilidad del intervalo QT (VQT), que registra la variación temporal en el proceso de despolarización y repolarización ventricular [4].

Las señales biomédicas pueden ser analizadas mediante la obtención de características no lineales como la entropía aproximada (ApEn, *Approximate Entropy*) [5] [6]. Ésta fue desarrollada por Pincus (1991) con el propósito de medir la complejidad de un sistema, cuantificando el caos presente en sus señales, considerando la cantidad de patrones repetitivos presentes en ellas. La investigación de Pincus tuvo como finalidad desarrollar un algoritmo de entropía que pudiera converger teniendo una señal ruidosa y de dimensión relativamente pequeña.

En este trabajo se estudia la ApEn entre la VFC y la VQT en sujetos diabéticos, con miras a encontrar información que pueda ayudar en el diagnóstico temprano de las complicaciones de la diabetes, en particular la NAC.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: la sección 2 presenta la metodología, donde se da una breve descripción de la entropía aproximada y se describe la base de datos y el protocolo experimental utilizado. La sección 3 contiene los resultados del estudio y, por último, se presentan las conclusiones.

2. METODOLOGÍA

2.1 Entropía Aproximada

La entropía aproximada (ApEn, *Approximate Entropy*) es un indicador no lineal/mono-variable que permite cuantificar el grado de complejidad de un sistema a partir de una secuencia temporal que de éste provenga. Este índice está estrechamente relacionado con la entropía, la cual mide el nivel de información presente en una serie temporal. Además, permite discriminar señales en función de su regularidad sin tener en cuenta el modelo de sistema que las generó, en consecuencia, es independientemente de la naturaleza de la señal, es decir, determinística o estocástica, lineal o no [7].

El valor de la ApEn es un valor positivo, donde un valor próximo a cero corresponde a series con elevada regularidad (series predecibles), mientras que valores alto corresponde a secuencias de pocos patrones repetitivos. Es decir, la ApEn será mayor mientras menos regular sea la secuencia y tendrá un menor valor mientras más regular ésta sea [8].

La $ApEn(x(n), m, r, N)$ mide la semejanza logarítmica entre patrones consecutivos de longitud m (pertenecientes a la secuencia $x(n)$, de N muestras), que tengan una diferencia menor que r veces la desviación estándar $x(n)$ ($std(x(n))$). Así, teniendo N muestras de la serie $x(n)$, se podrá calcular $ApEn(x(n), m, r, N)$ como sigue:

- Se generan $N-m+1$ patrones denominados $X(1) \dots X(N-m+1)$, con: $X(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)]$, donde $i = 1, 2, \dots, N-m+1$. Cada uno de los vectores representa m valores consecutivos de $x(n)$.
- Se mide la frecuencia de patrones similares de longitud m con tolerancia de r , $C_r^m(i)$, dado por

$$C_r^m(i) = \frac{d[X(i), X(j)] \leq r}{N - m + 1} \quad (1)$$

Donde $j = 1, 2, \dots, N-m+1, \forall j \neq i$ y $d[X(i), X(j)]$ cuantifica la cantidad de patrones similares (separados j veces hasta un máximo de m muestras) que tienen una diferencia menor a la tolerancia r , así

$$d[X(i), X(j)] = \max_{k=1,2,\dots,m} (|x(i+k-1) - x(j+k-1)|) \quad (2)$$

- Se calcula el logaritmo de cada $C_r^m(i)$ y se promedia para todo las muestras N :

$$C_r^m = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} C_r^m(i) \quad (3)$$

- Luego se aumenta la dimensión en $m+1$, se calcula nuevamente C_r^{m+1} con la Ec.(3)
- En consecuencia, la entropía condicional se calcula mediante la ecuación

$$ApEn(x(n), m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} (C_r^m - C_r^{m+1}) \quad (4)$$

Sin embargo, N es un número finito y la Ec.(4) quedará como

$$ApEn(x(n), m, r, N) = C_r^m - C_r^{m+1} \tag{5}$$

No existe una regla para establecer los valores de m y r , sin embargo Pincus recomienda seleccionar $m = \{1, 2\}$ y r entre $[0.1, 0.25]$. Para este estudio se seleccionó $m = 2$ y $r = 0.1$.

2.2 Protocolo de prueba y mediciones

Para este estudio se utilizaron las señales ECG en estado de reposo de 19 sujetos diabéticos (edad promedio 56.44 ± 9.60 años) con complicaciones cardíacas, de ahora en adelante se denominará grupo diabético (GD), y 11 sujetos control (edad promedio 52.63 ± 4.99) que conforman el grupo control (GC); para más información sobre la base de datos referirse a [9]. A estas señales se les aplicó un algoritmo basado en ondículas [10], con el que se detectan las ondas Q, R y T (final de la onda T), y se construyen las series temporales VFC y VQT de cada grupo.

En cuanto al cálculo de la ApEn, debido a que éste es dependiente del tamaño de la secuencia en estudio, es decir, su valor varía de acuerdo al número de muestras (N) en la señal [8], todas las secuencias VFC y VQT fueron limitadas a un máximo de 80 muestras cada una.

La prueba de los rangos con signo de Wilcoxon se utilizó para determinar la diferencia significativa entre los grupos (diabéticos y control) para los datos calculados, con un umbral de significación estadística de $p < 0.05$.

3. RESULTADOS

Las secuencias VFC estudiadas tienen valor promedio \pm std por grupo de: GD 0.92 ± 0.13 , GC 0.82 ± 0.09 ; mientras que las series VQT analizadas cuentan con valor promedio \pm std por grupo de: valores promedio: GD 0.36 ± 0.04 , GC 0.33 ± 0.02 .

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en el estudio. Se muestra el valor promedio \pm std de la ApEn calculada en ambas secuencias, VFC y VQT, para cada población (GD y GC). Así mismo, se muestra el valor de significancia p , comparando los resultados entre grupos.

Tabla 1. Entropía aproximada obtenida de las series VFC y VQT en los dos grupos de estudio, diabéticos (GD) y control (GC).

	<i>ApEn(VFC)</i>	<i>ApEn(VQT)</i>
GD	0.245 ± 0.132	0.482 ± 0.284
GC	0.243 ± 0.147	0.694 ± 0.224
<i>p</i>	0.7796	0.0267

La fig.1 presenta el diagrama de caja de los resultados obtenidos. A la izquierda se observa la diferencia que existe entre los resultados de la ApEn para las secuencias de la VQT en cada grupo. Esto no se observa para la ApEn en las secuencias de la VFC (diagrama de la derecha).

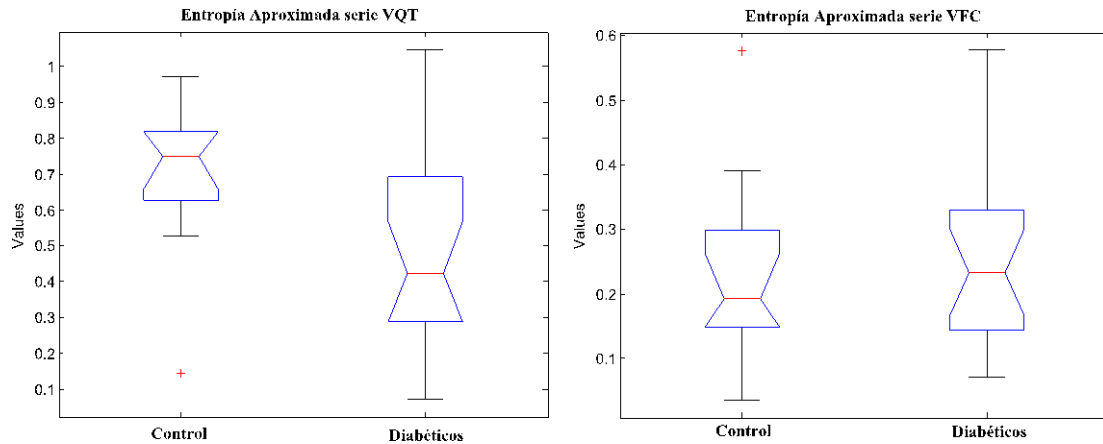


Figura 1. Entropía Aproximada de la VQT y la VFC, comparación entre grupos (GC y GD)

4. CONCLUSIONES

Hallada la entropía aproximada en las series VFC y VQT para ambos grupos (GD vs. GC), los resultados muestran que sólo existe diferencia significativa entre ellos para la secuencia VQT ($p < 0,03$). Estos resultados estarían en concordancia con estudios previos que muestran que existen anomalías a nivel de la regulación del sistema nervioso autónomo sobre la repolarización ventricular en la diabetes mellitus. En cuanto al valor observado para la entropía de la VFC, este resultado puede deberse a que los pacientes diabéticos reciben tratamiento médico producto de su condición clínica. Para futuros trabajos, se propone analizar estas series (ampliando la base de datos) empleando otras técnicas de entropía que permitan normalizar su valor respecto a la longitud de la secuencia, así como realizar un análisis multifactorial combinando este indicador con otros índices lineales y no lineales.

REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, Septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.who.int/es/>. [Último acceso: 15 Julio 2013].
- [2] Chacín, L., Jatem, E. & Rojas, C., Neuropatía autonómica cardiovascular diabética. *Diabetes Internacional*, vol. I, n. 1, 2009.
- [3] Vinik, A. & Ziegler, D., Diabetic cardiovascular autonomic neuropathy. *Contemporary Reviews in Cardiovascular Medicine*, vol. 115, n° 3, 2007.
- [4] Guyton, A., & Hall J., *Tratado de Fisiología Médica*. pp. 115-127. McGraw-Hill Interamericana, 2001.
- [5] Loforte, L., Carraul, G., Mainardi L. & Beuche, A., Heart Rate and Respiration Relationships as a Diagnostic Tool for Late Onset Sepsis in Sick Preterm Infants. *Computers in Cardiology*, Valencia, 2006.

- [6] Fan, S.-Z., Yeh, J.-R., Chen, B.-C. & Shieh, J.-S., Comparison of EEG Approximate Entropy and Complexity Measures of Depth of Anaesthesia During Inhalational General Anaesthesia. *Journal of Medical and Biological Engineering*, vol. 31, n° 5, pp. 359-366, 2011.
- [7] Pincus, S. M. Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proc. Nati. Acad. Sci. USA*, vol. 88, pp. 2297-2301, 1991.
- [8] Fonseca, S., Milho, J., Passos, P., Araújo, D. & Davids, K. Approximate Entropy Normalized Measures for Analyzing Social Neurobiological Systems. *Journal of Motor Behavior*, vol. 44, n° 3, pp. 179-183, 2012.
- [9] Quintero, L., Parra, R., Wong, S., Antepara, N., Almeida D. & Passariello, G., Diseño de una base de datos para el diagnóstico precoz de la neuropatía diabética. *III Congreso Venezolano de Bioingeniería Valencia*, Valencia, 2006.
- [10] Rivera, P., Severeyn, É., Wong S. & Pérez, J., Study of Cardiac Repolarization during Oral Glucose Tolerance Test in Metabolic Syndrome Patients. *Computing in Cardiology*, Cracovia, 2012.

PARÁMETROS DE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA DURANTE LA PRUEBA ORAL DE TOLERANCIA A LA GLUCOSA: UN ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS SIMPLES

Érika Severeyn

Sara Wong

Miguel Altuve

severeynrika@usb.ve

swong@usb.ve

maltuve@usb.ve

Grupo de Bioingeniería y Biofísica Aplicada, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

Gabriela Ávila

gabiavil@yahoo.com

Laboratorio de Evaluación Nutricional, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

José Luis Cevallos

jose.cevallos@ucv.ve

Laboratorio de Investigaciones Clínicas, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

Resumen. *El síndrome metabólico (SM) preconditiona al individuo a sufrir de Diabetes Mellitus tipo 2 (DM2) o enfermedad cardiovascular. El SM se caracteriza por la presencia de tres o más de los siguientes síntomas: obesidad abdominal, dislipidemia, hipertensión arterial y glucosa sanguínea elevada en ayunas. Estudios corroboran que el SM es reversible e incluso se puede volver asintomático con la realización de una actividad física moderada y constante en el tiempo. Por lo tanto, aquellos individuos que realizan actividades físicas disminuyen su riesgo de desarrollar el SM, previniendo así su evolución hacia la DM2. En este trabajo se busca establecer relaciones entre los cambios de la glucosa en sangre con cambios electrocardiográficos observados durante la prueba oral de tolerancia a la glucosa (POTG) en tres poblaciones: sujetos sedentarios con SM y sin SM y sujetos deportistas. A cada uno de los sujetos se les realizó un perfil 20, un perfil lipídico y la POTG de cinco puntos. Además, en cada una de las etapas de la POTG, se analizó la variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) a través de los parámetros: RMSSD, SD, potencia en HF y en LF, y cociente $LF/(HF+LF)$. Los resultados encontrados muestran diferencias significativas entre grupos en todos los valores de*

la duración del intervalo RR durante la POTG. Esto puede deberse a que los deportistas tienden a tener bradicardia, debido a la acomodación que sufre el corazón para amoldarse a los altos requerimientos de oxígeno durante el entrenamiento. Un análisis de correspondencias simples (ACS) arrojó que el parámetro LF a los 60 minutos y HF a los 0 minutos de la POTG pueden discriminar entre sujetos deportistas y sujetos sedentarios con y sin SM. Por otro lado, los parámetros HF a los 60 minutos y LF 0 minutos discriminan entre sujetos sedentarios sin SM y sujetos sedentarios con SM. Estos hallazgos sugieren que los parámetros LF y HF de la VFC pueden usarse en un futuro como elementos de diagnóstico en el SM, partiendo de una prueba no invasiva como es el electrocardiograma.

Palabras Claves: Síndrome Metabólico, Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca, Análisis de Correspondencias Simples, Prueba Oral de Tolerancia a la Glucosa, Análisis Estadístico

1. INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus es una enfermedad caracterizada por la acumulación de glucosa en la sangre como consecuencia del deficiente o nulo desempeño del páncreas para producir insulina. Se sabe que la diabetes es una enfermedad que no tiene cura, pero se puede controlar manteniendo los niveles de glucosa sanguínea lo más cercano a los niveles normales. Las causas que generan una enfermedad como la diabetes todavía no están claras, sin embargo, existen condiciones pre-diabéticas que predisponen o son la antesala al desarrollo de la enfermedad. Entre estas condiciones se encuentra el Síndrome Metabólico (SM) [1].

El SM se está convirtiendo en uno de los principales problemas de salud pública del siglo XXI. En EE.UU la prevalencia de esta condición varía entre un 21,8% y 43,5% [2]. En Venezuela se estudió una muestra importante en el estado Zulia, encontrándose una prevalencia del 23,7% en mujeres y 57,1% en hombres [3]. El SM se encuentra estrechamente asociado al incremento de cinco veces en la prevalencia de diabetes tipo II y de tres veces el incremento en la enfermedad cardiovascular coronaria y aterosclerosis. Por lo que se puede considerar al SM como un elemento importante en la epidemia actual de diabetes y enfermedad cardiovascular coronaria [4].

Los sujetos con vidas sedentarias tienen más probabilidades de desarrollar el SM que aquellos con vidas activas que realizan algún deporte [5]. Incluso en sujetos diagnosticados con SM, si se les somete a programas de ejercicio acorde a sus posibilidades tienden a mejorar los niveles de triglicéridos, HDL, peso, IMC y tolerancia al ejercicio, logrando así, en ocasiones la total mejoría [6]. Hoy en día se relaciona la baja SI a la obesidad, a la inactividad física y a cambios del control del ritmo cardíaco.

Ya que el deporte contribuye en la mejora de los pacientes con SM, se puede considerar la realización de un protocolo que permita el estudio de los síntomas que definen el SM, los valores de sensibilidad a la insulina y los parámetros electrocardiográficos en diferentes poblaciones, con el objetivo de encontrar diferencias entre poblaciones en los parámetros de la VFC durante el metabolismo de los azúcares y la sensibilidad a la insulina. Dichos parámetros pueden significar en un futuro, no solamente valores de diagnóstico del SM sino también de prevención y posible tratamiento de este padecimiento. De esta manera, el objetivo del presente trabajo es establecer relaciones entre los cambios de la glucosa en sangre con cambios electrocardiográficos durante la prueba oral de tolerancia a la glucosa (POTG) en tres tipos de

sujetos: sujetos sedentarios con SM, sujetos sedentarios sin SM y sujetos deportistas a dedicación.

2. METODOLOGÍA

2.1 Base de Datos

Tres tipos de poblaciones son analizadas en este trabajo: sedentarios con SM (SCSM), sedentarios sin SM (SSSM) y deportistas maratonistas a dedicación (DMD), con un entrenamiento semanal de 180 a 200 Km de recorrido. Las características de estas poblaciones son:

- SCSM: 10 sujetos (10 hombres), índice de masa corporal (IMC) de 34 ± 7 Kg/m² y edad de 31 ± 7 años.
- SSSM: 15 sujetos (15 hombres), IMC = 23 ± 4 Kg/m² y edad de 27 ± 4 años
- DMD: IMC = 21 ± 2 Kg/m² y edad de 33 ± 9 años.

A cada uno de los sujetos se les realizó un perfil 20, un perfil lipídico, la POTG de cinco puntos (una medición de glucosa e insulina en ayunas y cuatro mediciones después de la toma de 75 gr de glucosa, en intervalos de 30 minutos) y cinco registros electrocardiográficos (ECG) de 10 minutos cada uno, antes de la toma de cada una de las muestras de sangre. El protocolo clínico tuvo una duración total de 120 minutos por sujeto.

El procedimiento experimental del protocolo clínico utilizado en la base de datos se desarrolló de la siguiente manera:

- Adquisición de la señal ECG antes de la POTG.
- Toma de la muestra de sangre en el estado basal, el sujeto se encontraba en ayunas.
- Toma de los 75 gramos de glucosa líquida.
- Se obtuvieron, a partir de ese punto, cuatro muestras más de sangre en intervalos de 30 minutos y antes de cada una de éstas se adquirió una señal ECG de quince minutos.

2.2 Análisis de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca

El análisis de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC) permite estudiar las disfunciones cardiovasculares, diabetes, entre otros [7]. La VFC se ha utilizado como herramienta para el análisis de la respuesta cardíaca vinculada al rendimiento deportivo [8]. La VFC es extraída a partir de la serie de tiempo RR, la cual a su vez es extraída de la señal electrocardiográfica. La serie RR viene dada por el Δt entre las ondas R en el tiempo. [9].

Para la medición de los parámetros de la VFC se pueden usar los métodos de dominio en el tiempo y los métodos de dominio en frecuencia.

- Los métodos de dominio en el tiempo son los más simples y determinan medidas estadísticas. Estas medidas se obtienen a partir de los intervalos RR o frecuencias cardíacas instantáneas, así como también de las diferencias entre los intervalos RR. En la tabla 1 se muestran los parámetros de la VFC que se obtienen a partir de los métodos de dominio en el tiempo, así como su descripción [10].
- Los métodos en el dominio de la frecuencia consisten principalmente en tomar series de números a lo largo del eje del tiempo y realizar el análisis espectral utilizando la densidad espectral de potencia [10]. La tabla 2 muestra los componentes espectrales.

Tabla 1. Algunos parámetros en el dominio del tiempo de la VFC.

Variable	Unidades	Descripción
SDRR	ms	Desviación estándar de todos los intervalos RR
RMSSD	ms	La raíz cuadrada de la media de la suma de los cuadrados de las diferencias entre intervalos RR adyacentes.

Tabla 2. Componentes en el dominio de frecuencia.

Variable	Unidades	Descripción	Rango de Frecuencia
LF	ms ²	Rango de potencia de bajas frecuencias	0.04-0.05 Hz
LF normalizado		LF/ LF+HF	
HF	ms ²	Rango de potencia de altas frecuencias	0.15-0.4 Hz

2.3 Tratamiento Estadístico

Para hallar las diferencias significativas entre grupos, se usó el Método de Análisis de Varianza (ANOVA), en donde se tomó como diferencia significativa un valor de $p < 0.05$.

Además, con el fin de determinar similitudes y/o diferencias entre los grupos y el estudio de la VFC, se realizó un análisis de correspondencias simples (ACS) con el fin de observar si se pueden caracterizar los diferentes tipos de poblaciones estudiadas, usando como variables los parámetros en el dominio en el tiempo y en el dominio de la frecuencia.

3. RESULTADOS

En el estudio estadístico se encontraron diferencias significativas entre grupos en todos los valores de RR durante la POTG, entre los DMD ($RR_{promedio} = 1108 \pm 142 \text{ms}$), SSSM ($RR_{promedio} = 954 \pm 139 \text{ms}$), y SCSM ($RR_{promedio} = 861 \pm 135 \text{ms}$). Esto puede deberse a que los sujetos deportistas tienden a tener bradicardia, debido a la acomodación que sufre el corazón para amoldarse a los altos requerimientos de oxígeno durante el entrenamiento. Los valores de RR en cada grupo y en cada etapa de la POTG se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de RR en cada etapa de la POTG.

Minutos de la POTG	RR (ms)					
	DMD		SCSM		SSSM	
	Media	STD	Media	STD	Media	STD
0	1124*	136	858	123	952	146
30	1082*	115	843	137	966	160
60	1139*	165	883	151	960	151
90	1101*	169	862	143	947	143
120	1096*	128	857	134	944	120
$RR_{promedio}$	1108*	142	861	135	954	139

* Diferencias estadísticamente significativas entre el grupo DMD y SSSM y entre el grupo DMD y el grupo SCSM.

Se realizó un ACS encontrándose que el parámetro LF a los 60 minutos y HF a los 0 minutos de la POTG, con unas contribuciones del 24,85% y 17,4% respectivamente en el ACS, pueden discriminar entre los DMD y los SSSM y SCSM. Por otro lado, los parámetros HF a los 60 minutos y LF a los 0 minutos, con unas contribuciones de 23,37% y 22,13% respectivamente

en el ACS, discriminan entre SSSM y SCSM. En la figura 1 se puede observar el resultado gráfico del ACS. En la tabla 4 se pueden observar las contribuciones de los factores.

Tabla 4. Contribuciones de las variables de la Variabilidad de la Frecuencia Cardiaca en el ACS.

Variables	Factor 3	Factor 4
RMSSD0	0,55	8,47
RMSSD60	7,34	0,12
LF0	22,13	5,10
LF30	11,05	8,25
LF60	0,01	24,85
LF120	1,80	7,75
HF0	1,39	17,43
HF60	23,37	0,86

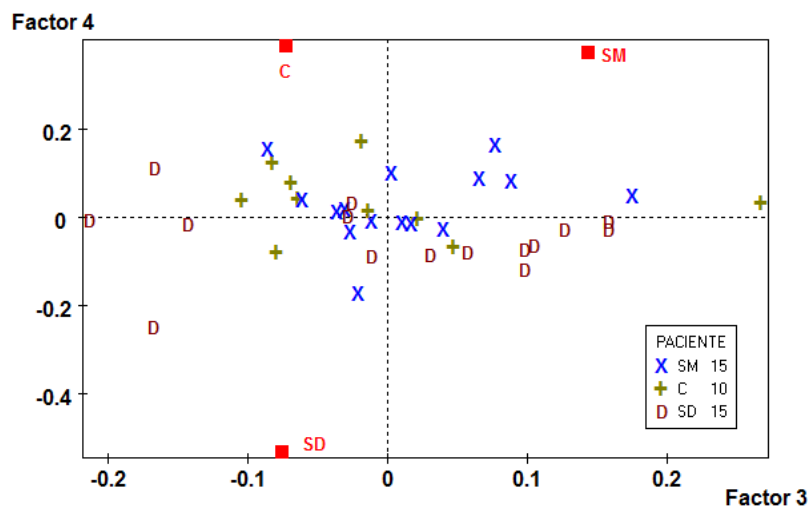


Figura 1- Análisis de Correspondencias Simples.

No se encontraron diferencias significativas en los parámetros de la VFC entre etapas de la POTG en los grupos SSSM y DMD, sin embargo en el grupo SCSM en los valores de $LF/(LF+HF)$, se encontraron diferencias significativas entre las etapas basal (0.7 ± 0.1) y la etapa a los 30 minutos (0.8 ± 0.1), evidenciándose un aumento en el tono simpático durante la POTG, que no fue observado en los otros grupos.

4. CONCLUSIONES

En el trabajo desarrollado se utilizaron los registros electrocardiográficos de una base de datos que consiste en 10 sujetos sedentarios sin SM, 15 sujetos sedentarios con SM y 15 sujetos deportistas a dedicación, el protocolo clínico diseñado permitió el registro electrocardiográfico de cinco etapas durante la POTG. Para cada registro se realizó el estudio de la VFC obteniendo los parámetros en el dominio del tiempo: SD y RMSSD y los parámetros en el dominio de la frecuencia RR, LF, HF y $LF/(LF+HF)$.

No se encontraron diferencias significativas en los parámetros SD, RMSSD, LF, HF y $LF/(HF+LF)$ entre el grupo DMD y SCSM y SSSM. Sin embargo, si se encontraron diferencias significativas entre los valores de RR entre el grupo DMD y los grupos SCSM y SSSM, debido

a que los sujetos deportistas presentan bradicardia asociada a la acomodación del músculo cardiaco como respuesta a las exigencias del entrenamiento. Igualmente no se encontraron diferencias significativas en los parámetros de la VFC entre etapas de la POTG en los grupos DMD y SSSM, sin embargo en el grupo SCSM si se observó un aumento en el tono simpático durante la POTG.

Los resultados de la ACS arrojaron que los parámetros de LF y HF pueden discriminar entre los DMD y los SSSM y SCSM, a pesar de que en el estudio estadístico estándar no arrojó diferencias significativas.

Los hallazgos encontrados en este trabajo, sugieren que los parámetros LF y HF de la VFC, los cuales fueron capaces de diferenciar en el ACS, los diferentes tipos de poblaciones, pueden usarse en un futuro como elementos de diagnóstico en el SM, partiendo de una prueba no invasiva como es el electrocardiograma.

REFERENCIAS

- [1] Zimmet P, Alberti G. “Una nueva definición mundial del síndrome metabólico por la federación internacional de diabetes: fundamento y resultados”, *Rev. Esp. Cardiol*, vol. 58, n. 12, pp. 1371-1376, 2005.
- [2] Ford ES, Giles WH, Dietz WH. Prevalence of the metabolic syndrome among US adults: findings from the third National Health and Nutrition Examination Survey. *JAMA*. vol. 287, pp. 356-9, 2002.
- [3] Bermudez V, Cano C, Medina M. Utilidad y ventajas del uso de modelos matemáticos en el estudio de la insulinoresistencia y función de la célula β pancreática, homeostasis model assesment (HOMA): fundamento y bases para su implementación en la práctica Clínica. *AVFT*, vol. 20, pp. 43-51, 2001.
- [4] Fundación Bengoa, Alimentación y nutrición. Síndrome Metabólico: Una Epidemia Global. I Foro: Alimentación y Nutrición, Retos y Compromisos. Disponible en:http://www.fundacionbengoa.org/i_foro_alimentacion_nutricion_informacion/una_epidemia_global_sindrome_metabolico.asp. Febrero 2010.
- [5] Rennie K, McCarthy N, Yazdgerdi S, Marmot M, Brunner E. Association of the metabolic syndrome with both vigorous and moderate physical activity. *International Journal of Epidemiology*, vol. 32, pp. 600-606, 2005.
- [6] Franks P, Ekelund U, Brage S, Wong M, Wareham N. Does the Association of Habitual Physical Activity With the Metabolic Syndrome Differ by Level of Cardiorespiratory Fitness? *Diabetes Care*, vol. 27, pp. 1187–1193, 2004.
- [7] Chan H, Ming-An L, Pei-Kuang C, Chun-Hsien L. Correlates of the shift in heart rate variability with postures and walking by time–frequency analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. vol. 86, pp. 124–130, 2007.
- [8] Earnest C, Lavie C, Blair S, Church T. Heart Rate Variability Characteristics in Sedentary Postmenopausal Women Following Six Months of Exercise Training: The DREW Study. *Plos One*. vol. 3. n. 6 pp. e2288, 2008.
- [9] Barbieri R, Matten E, Brown E. Instantaneous Monitoring of Heart Rate Variability. Proceedings of the 25, *Annual International Conference of the IEEE EMBS Cancún, Mexico*, pp. 17-21, 2003.
- [10] Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, vol. 17, pp.354–381, 1996.

AN ADAPTIVE RECURSIVE WEIGHTED FILTER BASED ON THE MYRIAD OPERATOR

Anthony Alarcón

José Luis Paredes

anthonnyjag@gmail.com

paredesj@ula.ve

Center for Biomedical Engineering and Telemedicine (CIByTEL)

Universidad de Los Andes. Mérida–Venezuela

Abstract. *In this paper, we introduce a new family of nonlinear filters based on the Myriad operator. The proposed approach introduces recursivity into the filtering operation where previous filter outputs are fedbacked into the filtering operation to conform an observation window that has input samples and previous filtered values leading thus to a recursive Weighted Myriad filter (RWMy). The proposed filtering structure is equipped with a tuning parameter that allow to set the degree on impulsiveness rejection capability. Thus, as that parameter goes to infinity the RWMy reduces to the well-known Infinity Impulse response (IIR) filter which has been proven to outperform the finite impulse response (FIR) filter. Furthermore, an adaptive optimization algorithm based on equation error formulation is also proposed for the design of RWMy where an absolute error cost function is minimized at each iteration. Extensive computer simulations show that the proposed approach outperforms the no recursive version much like the IIR outperforms the FIR filters.*

Keywords: Recursive weighted myriad, Maximum likelihood, Equation error formulation, Adaptive filter theory, Nonlinear filter.

1 INTRODUCTION

It is well-known that signal filtering in real-environment scenario where signal's contaminations exhibit a higher impulsiveness than that described by the Gaussian noise model demands the use of a robust filtering operation suitable for noise modeled by heavy-tailed distribution. Weighted Myriad Filter (WMyF), for instance, emerges as a robust nonlinear filtering approach that is derived as a generalization of the sample myriad [1]. More precisely, given N observation samples $\{x_i\}_{i=1}^N$ and weights $\{w_i\}_{i=1}^N$ the weighted myriad is the maximum likelihood estimator of location parameter for the class of Cauchy distribution — a particular case of the family of α -stable distribution. WMyF takes advantage of a linearity parameter, that, in a tuning fashion way, adds

to the filtering operation the capability to adapt to several degrees of impulsive noise rejection [1, 2]. Following this line of thought, in this paper we propose a new recursive weighted myriad filter under the framework of a noncausal system where given N observation input samples $\{x_i\}_{i=1}^N$ weighted by $\{g_i\}_{i=1}^N$ and M previous filtered outputs $\{y_j\}_{j=1}^M$ with weights $\{h_j\}_{j=1}^M$ the recursive WMyF outputs the maximum likelihood estimation for the location parameter for the Cauchy distribution of the joint data samples $\{x_i|_{i=1}^N, y_j|_{j=1}^M\}$ weighted, respectively, by $\{g_i|_{i=1}^N, h_j|_{j=1}^M\}$. Much like recursive linear filters (IIR) offer several advantages over the nonrecursive counterpart (FIR filter), the proposed recursive WMyF also exhibit superior performance than the one found with nonrecursive WMyF [3]. Furthermore, equipped with tuning parameters the proposed filtering approach can be suitably adapted to different degree of impulsiveness of the background noise. However, the fact that the output of a Myriad based estimator is restricted to the dynamic range of the input samples affects the performance of the new filtering framework leading to an undesirable attenuation of the filter outputs [1]. To overcome this apparent limitation the previous filtered output are scaled as they are introduced in the Myriad operation avoiding thus the attenuation on the filter's output. Furthermore, we propose an adaptive optimization algorithm for the design of this new family of nonlinear filter, under the framework of equation error formulation where the previous filter outputs are replaced by the previous desired samples leading to a two-input single output system during the learning stage. The performance of the proposed approach is tested in several signal processing tasks that involve the design of frequency selective filters. It is shown that the proposed approach yields much better performance than the linear counterpart (IIR) and it has similar performance than the WMyF at a much lower computational cost.

2 PRELIMINARY BACKGROUND

Impulsive noise in real-environment scenario can be statistical characterized by heavier-than-Gaussian tail distribution. One of the statistical model most widely used is the α -stable distribution family supported, perhaps, by the Generalized Central Limit Theorem. A member of this distribution family that is of particular interest is the Cauchy distribution since it is the only heavy tail distribution with close form expression for the probabilistic density function (pdf) for which an estimation of parameter location has been derived [4]. To be more precise, let's model the observation sample as $x_i = \theta + \eta_i$, $i = 1, 2, \dots, N$, where the common parameter θ is a unknown location parameter to be estimated and η_i represents independent and identically distributed (i.i.d.) impulsive noise added to the signal of interest. By involving the maximum likelihood estimation (MLE) approach, the signal of interest can be estimated as $\hat{\theta} = \arg \max \prod_{i=1}^N f_\eta(x_i - \theta)$, where $f_\eta(x)$ is the distribution function followed by the additive noise. That is, for the Cauchy distribution $f(x) = (\gamma/\pi)[1/(\gamma^2 + x^2)]$, where γ is the dispersion parameter of the distribution.

It has been shown in [1] that the MLE of location parameter is given by the myriad operator. That is

$$\hat{\theta}_k = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^N \log [k^2 + (x_i - \theta)^2] = \text{myriad} (x_i|_{i=1}^N; k). \quad (1)$$

where k is a linearity parameter that gives to the myriad operator the capability of tuning its impulsive rejection property, ranging from the mean operator of the observation sample for $k \rightarrow \infty$ to the mode operator of $\{x_i|_{i=1}^N\}$ for $k \rightarrow 0$.

A more general expression for the myriad operator that makes it suitable for a wide variety of filtering processes is the weighted myriad (WMy) framework [4]. That is defined as

$$\hat{\theta}_k = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^N \log [k^2 + |w_i| (sgn(w_i)x_i - \theta)^2] = \text{myriad} (|w_i| \circ sgn(w_i)x_i|_{i=1}^N; k) \quad (2)$$

where $|w_i| \circ sgn(w_i)x_i$ denotes the weighting process of the WMy framework [5], that allows to capture the statistical relationships among different samples in an observation signal window where the value given to w_i is related to some degree of reliability of the i_{th} sample [1].

Interestingly, if the contamination follows a Gaussian distribution¹ the WMy behaves as a linear FIR filter as the tunable parameter k becomes infinity. $\hat{\theta}_{k \rightarrow \infty} = \sum_{i=1}^N w'_i \cdot x_i$, where $w'_i = w_i / \sum_{i=1}^N |w_i|$.

Note that the filter output depends on the input observation samples x_i and the filter weights that defines the kind of filtering operation. A more general linear filtering approach that uses not only input samples but also previous computed outputs to define the current filter output is the class of filter with infinite impulse response (IIR), leading to recursive linear filter that has better frequency response than the nonrecursive counterpart.

Much like FIR filters can be extended to a recursive version — the IIR filters. It is natural to think that the weighted myriad filter (WMyF) which is supported by similar principles can be extended to a richer filtering structure, namely the Recursive Weighted Myriad Filter (RWMyF).

3 RECURSIVE WEIGHTED MYRIAD FILTER

The introduction of previously computed outputs of the filtering in the Myriad framework leads to the definition of a more robust filter with a high degree of accuracy and a reduced number of parameters. Formally,

Definition 1.1: Given a set of observation samples $\{x_i = x(n+i)|_{i=N_1}^{N_2}\}$ and a set of previous computed outputs $\{y_j = y(n-j)|_{j=1}^M\}$, with weights $\{g_i|_{i=N_1}^{N_2}\}$ and $\{h_j|_{j=1}^M\}$, and linearity parameters k_1 y k_2 . The Recursive Weighted Myriad Filter is defined as

$$\begin{aligned} y_{k_1, k_2}(n) &= \arg \min_{\theta} \sum_{i=-N_1}^{N_2} \log [k_1^2 + |g_i| (sgn(g_i)x_i - \theta)^2] + \sum_{j=1}^M \log [k_2^2 + |h_j| (sgn(h_j)y_j - \theta)^2] \\ &= \text{myriad} (|g_i| \circ sgn(g_i)x_i|_{i=N_1}^{N_2}; |h_j| \circ sgn(h_j)y_j|_{j=1}^M; k_1; k_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Figure 1(a) illustrates graphically the proposed filtering structure. Note that previous filter outputs are fed back into the myriad operator to define a new output.

One of the strongest limitations of equation (3) and its output is the passiveness of the system and the attenuation associated to this framework. To overcome this apparent limitation, it is proposed the Scaled RWMy where the output is defined as $y(n)^{(S)} = \left(\sum_{i=-N_1}^{N_2} |g_i| + \sum_{j=1}^M |h_j| \right) \hat{\theta}_{k_1, k_2}$, and allows to break the unconstrained representation given by (3) and its normalization.

¹It is well-known that under MLE principle the optimum filtering operator for additive Gaussian noise is a linear FIR kind of filter.

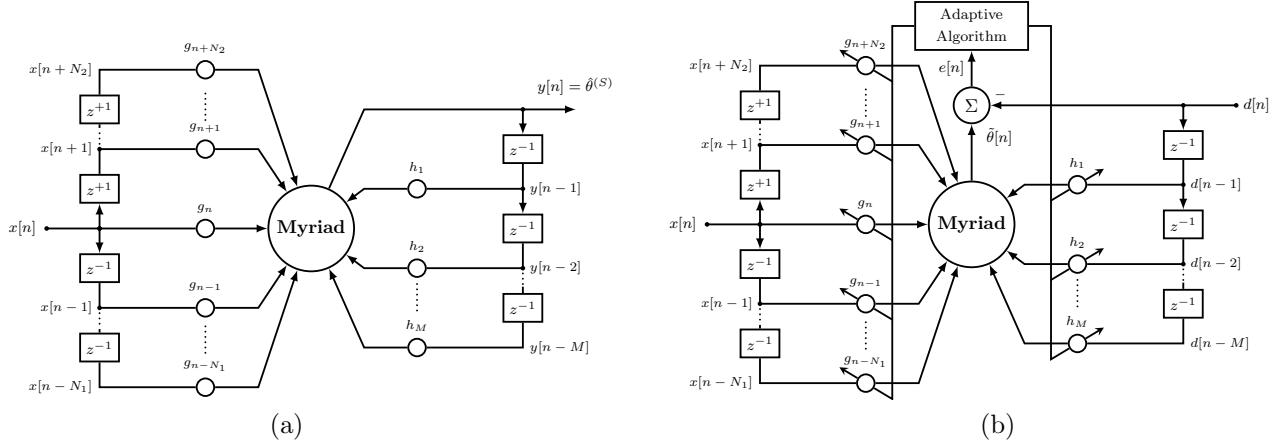


Figure 1: (a) Recursive weighted myriad filter. (b) Adaptive training structure.

4 ADAPTIVE RECURSIVE WMy FILTERING ALGORITHM

Most applications that demand filtering operations need to design optimal values for their weights. To this end, we adopt an adaptive approach where the RWMy filter's weights are found such that a cost function is minimized iteratively following the steepest descent approach. Taking the mean absolute error (MAE) between the filter's output $y(n)$ and a desired signal $d(n)$ as a cost function, i.e.

$$J(g, h; k_1, k_2) = E\{|y(n)^{(S)}[n] - d[n]|\} \quad (4)$$

where $E\{\cdot\}$ represents the statistical expectation. However, taking the derivative of (4) with respect to g_i and h_j with $i = -N_1, -N_1 + 1, \dots, N_2$ and $j = 1, 2, \dots, M$ becomes mathematically intractable since the recursive operation leads to successive application of chain rules. To overcome this drawback we follow the equation error formulation where the previous filter outputs are replaced by previous desired signal ($y(n-i) = d(n-i)$) breaking in that way the recursion and leading to a two-input single output $[\tilde{y}(n)^{(S)}]$ system without recursion as shown in Fig. 1(b).

Following the steepest-descendent approach, it can be shown that the filter weights can be update as

$$\begin{aligned} g_i[n+1] &= g_i[n] - \mu \operatorname{sgn}(e[n]) \left[\operatorname{sgn}(g_i[n]) \tilde{\theta}_{k_1, k_2}[n] + \left(\sum_{i=-N_1}^{N_2} |g_i[n]| + \sum_{j=1}^M |h_j[n]| \right) \frac{\partial \tilde{y}_{k_1, k_2}[n]}{\partial g_i} \right] \\ h_j[n+1] &= h_j[n] - \mu \operatorname{sgn}(e[n]) \left[\operatorname{sgn}(h_j[n]) \tilde{\theta}_{k_1, k_2}[n] + \left(\sum_{i=-N_1}^{N_2} |g_i[n]| + \sum_{j=1}^M |h_j[n]| \right) \frac{\partial \tilde{y}_{k_1, k_2}[n]}{\partial h_j} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

where $\operatorname{sgn}(\cdot)$ represent the sign function. $g_i[n]$ and $h_j[n]$ are the i th and j th filter's weights iteration at the n th and $\mu > 0$ is the step-size parameter.

It is shown in [6] that the partial derivative of $\tilde{y}(n)$ with respect to g_i , h_j are respectively,

$$\frac{\partial \tilde{\theta}_{k_1, k_2}}{\partial g_i} = - \frac{k_1^2 \operatorname{sgn}(g_i) (\tilde{\theta} - \operatorname{sgn}(g_i) x_i)}{[k_1^2 + |g_i| (\operatorname{sgn}(g_i) x_i - \tilde{\theta})^2]^2} \frac{\sum_{i=-N_1}^{N_2} |g_i| \frac{k_1^2 - |g_i| (\operatorname{sgn}(g_i) x_i - \tilde{\theta})^2}{[k_1^2 + |g_i| (\operatorname{sgn}(g_i) x_i - \tilde{\theta})^2]^2} + \sum_{j=1}^M |h_j| \frac{k_2^2 - |h_j| (\operatorname{sgn}(h_j) d_j - \tilde{\theta})^2}{[k_2^2 + |h_j| (\operatorname{sgn}(h_j) d_j - \tilde{\theta})^2]^2}}{\quad} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \tilde{\theta}_{k_1, k_2}}{\partial h_j} = - \frac{k_2^2 \operatorname{sgn}(h_j) (\tilde{\theta} - \operatorname{sgn}(h_j) d_j)}{[k_2^2 + |h_j| (\operatorname{sgn}(h_j) d_j - \tilde{\theta})^2]^2} \left(\sum_{i=-N_1}^{N_2} |g_i| \frac{k_1^2 - |g_i| (\operatorname{sgn}(g_i) x_i - \tilde{\theta})^2}{[k_1^2 + |g_i| (\operatorname{sgn}(g_i) x_i - \tilde{\theta})^2]^2} + \sum_{j=1}^M |h_j| \frac{k_2^2 - |h_j| (\operatorname{sgn}(h_j) d_j - \tilde{\theta})^2}{[k_2^2 + |h_j| (\operatorname{sgn}(h_j) d_j - \tilde{\theta})^2]^2} \right) \quad (7)$$

5 SIMULATION RESULTS

This section develops computer simulation examples involving the design of a bandpass filter.

Considering a three tones signal $s[n] = \sum_{k=1}^3 a_k \sin(2\pi f_k n)$ with amplitudes $a_1 = 3$, $a_2 = 1$ and $a_3 = 0,6$, Nyquist sample frequency of 1kHz, normalized frequencies $f_1 = 0,02$, $f_2 = 0,09$ and $f_3 = 0,2$. The desired signal $d[n]$ is represented by the central frequency signal $d[n] = a_2 \sin(2\pi f_2 n)$. The additive noise that contaminates the input signal is modeled by α -stable noise with $\alpha = 0,8$ and $\gamma = 0,1$. In this simulation we want to design 82 taps RWMY filter with $N_1 = 25$, $N_2 = 27$ and $M = 30$ and compare its performance to those yielded by FIR, IIR and nonrecursive WMY filter designed for the same filtering task with 82 parameters. The FIR and IIR filter taps are designed using the *fir1* and *yulewalk* MATLAB functions, respectively, with cutoff normalized frequencies of $f_{c_1} = 0.05$ and $f_{c_2} = 0.13$. The nonrecursive WMY is designed through the algorithm proposed in [4] with $k_1 = 0,57$. Furthermore, the scaled RWMY filter is designed using the proposed adaptive approach, expressions (5), (6) and (7) with $\mu(n) = 0,001$ for $n < 100$, a step-size function as $\mu(n) = 0,001 \exp(-n/1000)$ for $n > 100$ and $k_1 = k_2 = 0,57$. The results of filtering the signal $x[n] = s[n] + \eta[n]$ with the FIR, IIR, WMY and RWMY filters are shown in Fig. 3.

In all representations of Fig. 3 involve a clean first half, or without noise, and the last part with α -stable noise. Figure 3(a) shows the input signal to the filtering frameworks and the desired signal in Fig. 3(b). From Fig. 3(c) and 3(d), it can be seen it the good performance of linear representations to a clean signal, but the poor performance to a corrupted heavy-tailed noise of input. Finally, the weighted myriad filter shown in figure 3(e) allows a good rejection of input noise but with a strong low pass characteristic. However, it is the scaled approach, figure 3(f), which offers the best estimation and the most similar output to a desired signal.

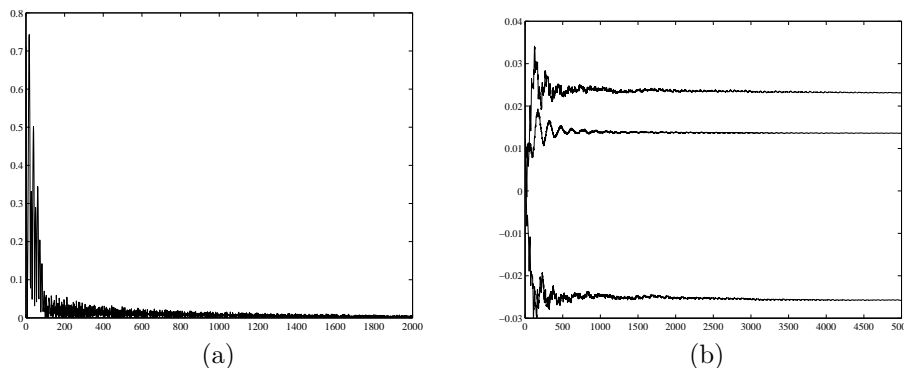


Figure 2: Band Pass Filter. (a) Error. (b) Weights: g_{15} , h_5 and g_{25} .

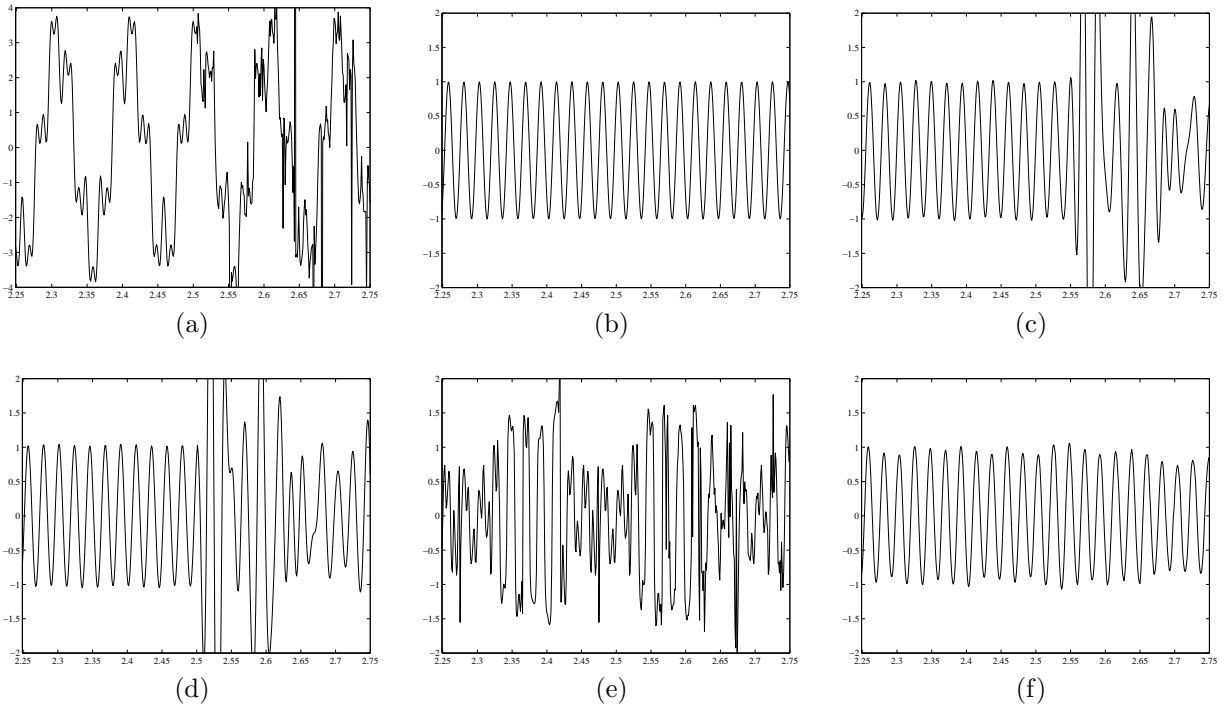


Figure 3: Design of a Band Pass Filter. (a) Input corrupted signal. (b) Desired signal (c) FIR filter output (d) IIR filter output (e) Nonrecursive WMy filter output (f) RWMY filter output.

Thus, the performance of the scaled framework is led by the convergency of the parameters presented in the figure 2. Figure 2(a) shows the minimization of the equation error formulation presented in equation (4). Likewise, figure 2(b) represent the adaptability of the parameters g_{15} , h_5 and g_{25} in decremented order, respectively.

Acknowledgements

This research has been partially supported by the CDCHTA-ULA by grant I-1336-12-02-B.

REFERENCES

- [1] GONZALEZ J. G. & ARCE G. R., Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments. *IEEE Trans. on Signal Proces.*, vol. 49, no. 2, pp. 438–441, Feb. 2001.
- [2] LIM H. S., CHUAH T. C. & CHUAH H. T., On the optimal alpha-k curve of the sample myriad. *IEEE Trans. on Signal Proces.*, vol. 14, no. 8, pp. 545–548, Aug. 2007.
- [3] GÓMEZ M. A., Diseño de filtros myriad ponderados recursivos y sus algoritmos de optimización. Thesis, Electrical Engineering Department, ULA–Mérida, Venezuela, Apr. 2012.
- [4] KALLURI S. & ARCE G. R., Adaptive weighted myriad filter algorithms for robust signal processing in α -stable noise environments. *IEEE Trans. on Signal Proces.*, 46(2):322–334, Feb. 1998.
- [5] ARCE G. R. & PAREDES J. L., Recursive weighted median filters admitting negative weights and their optimization, *IEEE Trans. on Signal Proces.*, vol. 48, no. 3, pp. 768–779, Mar. 2000.
- [6] ALARCÓN A. J., Caracterización de filtros myriad ponderados adaptativos. Thesis, Electrical Engineering Department, ULA–Mérida, Venezuela, In Process.

ANALYSIS OF DIAGNOSABILITY FOR GAS LIFT WELLS

Rubén J. Leal

Edgar Camargo

lealrs@pdvsa.com

camargoea@pdvsa.com

AIT, PDVSA Occidente, Edificio la Salina, Av. Hollywood, Cabimas, Zulia-Venezuela

José L. Aguilar

Addison Rios

aguilar@ula.ve

ilich@ula@ula.ve

CEMISID, Universidad de los Andes facultad de Ingeniería Eléctrica, Mérida, Mérida – Venezuela

Louise Travé-Massuyès

louise@laas.fr

LAAS-CNRS, Toulouse, France,

Abstract. A major contribution to the supervision, is to provide a reliable diagnosis of changes in the behavior of the components of a process. An important aspect in this domain is to determine the diagnosability property of the process. On the other hand, the oil extraction industry requires maximum performance of their production systems, so it is necessary an efficient diagnosability to these production systems. In this paper, we present an analysis of diagnosability for a gas lift well, based on the paradigm of structural analysis.

Keywords: Fault Diagnosis, Diagnosability, Structural Analysis, Gas Lift Well.

1. INTRODUCTION

Most production processes of oil and gas require constant supervision and control of the facilities associated. Particularly, it is necessary the diagnosis and early detection of faults, in

order to have enough time to counteract the consequences that could bring failures. Some of the possible operations to counteract are reconfiguration, maintenance or repair actions [1].

In the oil extraction industry is essential get the maximum of their production systems, for which we must improve and streamline the diagnostic process. This study will investigate one of the most used methods for the artificial extraction of oil, which are wells with gas injection [2]. Oil wells based on gas injection with highly oscillatory flow, are a major problem in the oil industry. There are several diagnostic analysis related to pipelines, storage tanks and wells.

A typical diagnosis system must be able detecting and isolating a set of faults. Diagnostic utilizes observations, i.e. measurements from the system under diagnosis, to determine if a specific behavioral mode is present in the system or not. This paper addresses the problem of the analysis of diagnosability in gas lift wells, as the first step toward analyzing of diagnosability of oil production processes. This analysis approach is based on structural models. For that, we identify the different structural models for a diagnosability analysis in the area of continuous processes, and to use a specific model of the oil extraction. Then, we carry out an analysis of diagnosability using sequential residual generation techniques such as is carried out in [1].

2. PRELIMINARY KNOWLEDGE ABOUT FAULT DIAGNOSIS

Basically, failure means any change in the behavior of any of the components of the system, so that it can no longer fulfill the function for which it was designed. There are three objectives to reach [3]. *Fault detectability* is the ability to detect certain faults: *Fault isolation*, is the ability to isolate a fault that has occurred, from the faults that are detectable: *and the Identification of the fault*. There are several methodologies for obtaining the relationship between symptoms and diagnosis of the system. The methodology more useful in the last decade for dynamic systems are the model based diagnosis (MBD) [4]. The fundamental aspects are the comparison of the observable elements with the functioning of the model, and the analysis of the behavior of these elements. MBD technique is based on the generation of residue. A method to generate residuals, which is used in this paper, is based on analytical redundancy relations approach (ARR) [4]. It uses analytical mathematical models that characterize the system, to reproduce the behavior of the components or system under evaluation.

A residual generator takes measurements variables from the system as input, and produces a residual as output. A residue is a signal ideally zero in the non-faulty case and non-zero else. In the sequential residual generation used in this work, the unknown variables in a model, or sub-model, are computed by solving equations one at a time in sequence, and a residue is then obtained by evaluating a redundant equation. In this class of method, the original model is often divided into sub-models with specific properties and residual generators are then designed for each sub-model. The residue generation approaches have in common that the systems should be over-determined [5]. Several algorithms for calculating ARR from over-determined systems have been proposed in [1, 6].

3. STRUCTURAL ANALYSIS

The structural analysis is a set of tools to explore the fundamental properties of a system using a structural model, either in the form of a graph structural or incidence matrix. In our work, a structural analysis of the system is used for the fault detection and isolation, following the approaches used by the community of Fault Detection and isolation (FDI). A previous work has modeled the diagnosability based on FDI approaches for continuous processes [5]

3.1 Structural model

A structural model is a representation of a system in which only connections between variables and equations are observed. Consider a model $M(X,Z,E,F)$, where E is a set of equations $E = \{e_1, \dots, e_m\}$, X is a set of unknown variables $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, Z is a set of known variables $Z = \{z_1, \dots, z_p\}$. F is a set of parameters which modify the normal behavior of system $F = \{F_1, \dots, F_o\}$, they are not considered as unknown variables. In the case where there are differential or integral variables in the model, it is necessary a fourth set, $D = \{\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n\}$, which contains the derivatives of the variables of X . We assume that the equations in the set E have the form.

$$e_i: f_i(\dot{x}, x, z, F) = 0, \quad 1 \leq i \leq m \quad (1)$$

Where, \dot{x} , x , F and z are vectors of the sets D , X , F and Z , respectively.

Definition 1: ARR for $M(X,Z,E,F)$. Let $M(X,Z,E,F)$ be a model, then an equation $r_i: f(z, \dot{z}, \ddot{z}, \dots) = 0$ is an ARR for $M(E,X,Z,F)$, if for each z consistent with $M(E,X,Z,F)$, the equation is fulfilled [1].

Definition 2: Residual Generator for $M(E,X,Z,F)$. A system taking a subset of the variables z as input, and generating a scalar signal r_i as output, is a residual generator for the model $M(E,X,Z,F)$, if for all z consistent with $M(E,X,Z,F)$, it hold that $\lim_{t \rightarrow \infty} r_i(t) = 0$ [1].

Definition 3: The fault signature matrix of M . It is a table obtained by the concatenation of all possible signatures of faults. Each row corresponds to an ARR and each column to a failure mode. A "1" in position (ij), indicates that the fault j is detected by the ARR i [6].

Definition 4: Detectability for $M(E,X,Z,F)$. A fault $F_o \in F(M) \forall o = 1, \dots, n$, is detectable if there is a residue different from zero in the residual generator, i.e. $r_i \neq 0$.

Definition 5: Isolability for $M(E,X,Z,F)$. When two signatures are identical, related failures are considered non-decoupled, that mean they cannot be isolated [6]. Therefore, all signatures must be different from each other $S(F_o) \neq S(F_n), \forall faults$.

3.2 Analytical Structural model

In this section we present the FDI techniques. Typically, they use the paradigm of analytical redundancy relationship (ARR). The procedure consists in the generation of residue (a residue must be equal to zero when the system is in normal state, i.e. without failure) [6].

Definition 6: Over-determined System (SO). M is an SO if E cardinality is greater that X cardinality i.e. $|E| > |X|$. A condition that must be satisfied is that must be at least one more equation than unknown variables, which means that the system is over-determined.

Definition 7: Minimal Structurally Over-determined (MSO). A MSO contains only one equation more than unknown variables, and each MSO is equivalent to ARR [6].

In [1] provides an algorithm that identifies the MSO, enabling the construction of more efficient ARRs. In [6] introduced an algorithm and the notion of TES (Test Equation Support) which are sets of equations which express redundancy specific to a set of considered faults. Each TES corresponds to a set of faults which influence the residual generator constructed.

Definition 8 Test Equation Support (TES): Given a model M and a set of faults $F(M)$, an equation set M is a TES if M is a SO set, and if $F(M')$ correspond a part of the model, being $F(M) \neq 0$ and for any $M' \subseteq M$, where M' is a SO set it holds that $F(M') \subseteq F(M)$.

The minimal test equation support indicates which part of the model to use in order to derive a residual with the corresponding TES, and which are the minimum sets of equations needed for deriving a residual. Such sets of equations will be referred to as MTES.

Definition 9 Minimal Test Equation Support (MTES): A TES of M is a MTES if is the smaller subset sensitive to a fault with the degree of redundancy equal to one, i.e. one equation more than unknown variables. A MTES set could be used to develop a consistency check for a part of the system, and a set of $F(M)$ can be detected with this consistency. [6].

4. ANALYSIS OF DIAGNOSABILITY FOR A GAS LIFT WELL

In this section we present the method of the structural analysis of gas lift well, and then apply the method of analytic redundancy relations for fault diagnosis like in [2].

4.1 Structural Analysis of oil extraction by gas lift injection

The detection is achieved if there is residue sensitive to considered system faults. If the detectability of faults is reached, then, the fault isolation is examined. According to the technique described in section 3, we calculate the MTES using the algorithm proposed in [6]. Fig. 1 shows the incidence matrix of the structural analysis for gas lift well. It indicates the relationship between the variables and equations that characterize the system. Particularly, we study two failures: f1 (malfunction in the injected gas flow into the annular) and f2 (malfunction in the mixed flow to the separator in the production line). The algorithm proposed in [6] returns as result two MTES's, one for each failure.

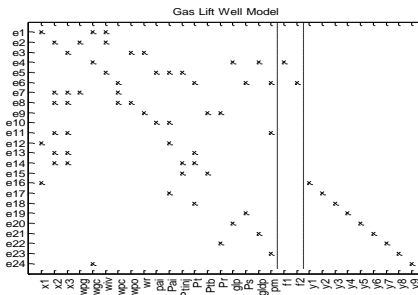


Figure 1 - Incidence matrix.

In this case, to fulfill *definition 4*, the minimum subset of equations where the analytical relation can be found characterizing each failure are shown below, and the unknown variables in each subset of the model can be computed by solving equations, one at time, in a sequence. Then, a residual is obtained.

$$ARR_1 = x_1 + c_{iv} \sqrt{\frac{M}{RT_a} \cdot P_a (P_a + gL_t P_m)} - w_{gc} \tag{2}$$

$$ARR_2 = -\frac{\left[\frac{d}{dt}(x_2) - (w_{gc} - x_1)\right] \cdot (P_m L_t A_t + L_r A_r \rho_o)}{x_2} - c_{pc} \sqrt{P_m (P_t - P_s)}, \tag{3}$$

To fulfill the diagnosability, the *definition 5* about isolability must be achieved. Each signature of the residue must be different each other. The importance of our proposition to reach the diagnosability in this case of study, is that we used only the surface variables of the well, without the need to place sensors on the bottom, which are very expensive and highly sensitive to damage. Each MTES is sensitive to a failure, as shown in the table 1. It indicates the sensitivity

of each failure with respect to each residue. We have used a sequential residual generation algorithm to obtain ARR's from MTES proposed in [6].

Table 1. Fault signature matrix.

	f_n	f_1	f_2
Arr_1	0	1	0
$Arr_{2,3}$	0	0	1

5. EXPERIMENT

We have tested the behavior of the system in normal state and the when the system behavior under a fault. Fig. 2a shows the residue analysis in normal state of the system; we can see the ARR's are almost zero. Fig. 2b and Fig. 2c shows the case when f_1 and f_2 are activated simultaneously and when are activated in different moments to see if the diagnosability is reached. In both case, both ARR_1 and ARR_2 , are activated in a way to reach the property of diagnosability, even when the fault is triggered the residue maintains the same representation of the fault only that more widely.

Theorem 1: the MTES sets are smaller subsets sensitive to a fault with the degree of redundancy equal to one, i.e. all subsets of M such that $\varphi(M) = 1$, and contains information sufficient to observe the changes of the system from normal mode to failure mode $f_n(M) \neq f(M)$, such that, are sufficient to detect this behavior changes.

Proof Theorem 1: the set M is the family of equation consistent whit the behavior of a gas lift well and a SO, M' is a MTES which are the minimum subset of equations of M with redundancy equal to one, two MTES was found for two fault, since there is a one-to-one correspondence between MTESs and ARR, and then through the process of backtracking for the elimination of unknown variables in the MTES derived the analytical equation, and with the help of the table 1 we can observed that $f_n(M) \neq f_1(M)$ and $f_n(M) \neq f_2(M)$.

Theorem 2: The, fault isolation will consist in looking for the fault signature in the fault signature matrix, to distinguish between the two faults considered. Therefore all signatures must be different from each other $S(F_1) \neq S(F_2)$.

Proof Theorem 2: according to the definition of isolability, two faults are structurally isolable if their fault signatures are different. The fault signature matrix (Table 1) exemplifies the concept, and can be interpreted as $S(f_1) \neq S(f_2)$. For our case study two MTES was found, one for each fault proposed, looking the vector of the fault signature matrix proofs that their signature were different.

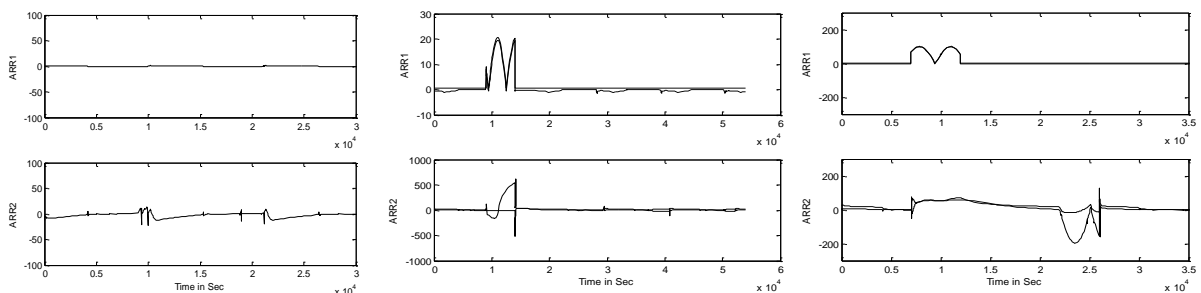


Figure 2 - Residue Analysis normal state Vs f_1 and f_2 simultaneously

6. CONCLUSION

All automated systems are not exempt of failures. This paper developed the technique of structural analysis for gas lift well. Particularly, we have obtained a structural model based on the dynamic process model of the gas lift well which use only surface variables, whit the respectively incidence matrix, and applied an algorithm to find MTES. Whit this, we have analyzed the detectability and isolability of the gas lift well with only surface variables as observable variables and showed the relationship between the observed variables and the subsystems of redundancy.

In particular, we have created the residual generators for a gas lift wells, in order to reach the diagnosability property, only with surface variables. The residuals obtained monitor each fault, according to the fault signature matrix shown in table 1. With this technique we have obtained a residue with each fault, enabling the ability to isolate and detect the failure of interest. In this way, for this case we can guarantee the property of diagnosticability. But, in some systems can be more complex because maybe we do not obtain a residue by fault. That will be studied in next works. With diagnosability analysis based on residual generation we can discriminate system failures, however when there are a lot of faults, maybe the isolability cannot be reached. For this we must use new techniques to find subsets of equations susceptible to faults and obtain the equations of ARR. Additionally, maybe it is necessary to find possible new sensors placement to increase observability. Also this will be done in future work.

Acknowledgements

This work has been supported by the PCP program “Supervision and maintenance task in a shared organizational environment”.

REFERENCES

- [1].Krysander, M., Åslund, J., and Nyberg, M. An efficient algorithm for finding minimal over-constrained subsystems for model-based diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 38(1), pp 197-206, 2008.
- [2].Leal, R., Aguilar, J. Camargo, E. Ríos, A. Modelo de Diagnosticabilidad para Procesos de Producción Petrolero. *Proceeding of the 5to Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica (V CIBELEC 2012)*, pp. C17-C23, Mérida, (2012).
- [3].Blanke, M. Kinnaert, M., Lunze, J. and Staroswiecki, M. *Diagnosis and fault tolerant control*. Springer. 2003.
- [4].Staroswiecki, M., and Declerck, P. Analytical redundancy in nonlinear interconnected systems by means of structural analysis”. *In Proceedings of IFAC AIPAC’89*, pp 51–55, 1989.
- [5].Travé-Massuyès, L., Escobet, T., and R. Milne. Model-based diagnosability and sensor placement. Application to a frame 6 gas turbine subsystem. *In DX01 twelfth international workshop on principles of diagnosis*, pp 205–212, 2001.
- [6].Krysander, M., Åslund, J., and Frisk, E. A structural algorithm for finding testable sub-models and multiple fault isolability analysis, *In Proceedings of the 21st International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-10)*, 2010.

NUEVAS ECUACIONES DEL TELEGRAFISTA, PARA JABALINAS, USADAS EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Dr. Wilmer Napoleón Malpica Albert

y kv gt@ circlexB i o ckldgo "

Departamento de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica. Universidad Central de Venezuela.

Ciudad Universitaria. Los Chaguaramos. Caracas - Venezuela

Resumen. *En este trabajo, se obtienen las ecuaciones del tipo Heaviside o las ecuaciones equivalentes del telegrafista, empleadas para modelar jabalinas o barras para sistemas de puesta a tierra, teniendo como punto de partida las ecuaciones de potencial. Las nuevas ecuaciones toman en cuenta todos los modos de propagación que pueden ocurrir en la tierra, a diferencia de las ecuaciones del telegrafista obtenidas por Heaviside, donde sólo considera un modo de propagación, particularmente el modo transversal electromagnético TEM. Para el desarrollo de las nuevas ecuaciones se considera que el medio es semi-infinito, formado por dos estratos (tierra – aire) y en cuanto a la dinámica del campo electromagnético se asume que en el suelo ocurre un fenómeno de propagación y radiación del campo electromagnético. Al final, se hace una comparación de las nuevas ecuaciones con las obtenidas por Heaviside. Del sistema de ecuaciones se podrán extraer tanto los parámetros eléctricos como son: resistencias, inductancias y capacitancias, así como la red eléctrica equivalente con parámetros distribuidos.*

Palabras claves: Puesta a tierra, Ecuaciones del telegrafista, Ecuaciones de propagación de ondas, Integrales de Sommerfeld, Impedancia en jabalinas, Funciones de potencial.

1. INTRODUCCIÓN

Una jabalina o una barra enterrada verticalmente es el electrodo de puesta a tierra más utilizado y que se usa para la protección de infraestructuras, equipos y seres vivos ante fallas eléctricas; también es utilizado para el drenaje a tierra de las corrientes ocasionadas por descargas atmosféricas que impactan en edificaciones o estructuras.

Algunos investigadores como Bourg y colaboradores [1], Grcev y Popov [2] utilizan el modelo con parámetros distribuido de la línea de transmisión, deducido de las ecuaciones de Heaviside [3], también conocidas como las ecuaciones del telegrafista, para modelar jabalinas o barras enterradas verticalmente en el suelo y los parámetros utilizados en el modelo como son las inductancias, capacitancias y resistencias son calculados utilizando fórmulas conocidas como las desarrolladas por Dwight [4], Rosa y Grover [5], Sunde [6], Tagg [7], que en general fueron obtenidas asumiendo un régimen estacionario ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) del campo electromagnético.

Las ecuaciones de Heaviside, usadas para modelar líneas de transmisión, lo conforman dos ecuaciones diferenciales acopladas, que presentan una topología que consiste en: una primera ecuación que relaciona la derivada de la tensión $\bar{V}(z)$ con la corriente $\bar{I}(z)$ y una segunda ecuación que relaciona la derivada de la corriente con la tensión, ambas en el dominio de la frecuencia:

$$\frac{d}{dz} \bar{V}(z) - \bar{Z}_{int} \bar{I}(z) - j\omega L_{ext} \bar{I}(z) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} \bar{I}(z) - \bar{Y} \bar{V}(z) = 0 \quad (2)$$

donde \bar{Z}_{int} y L_{ext} son la impedancia interna del conductor [8] y la inductancia externa de la línea respectivamente, \bar{Y} es la admitancia paralelo de la línea por unidad de longitud y z es la variable de posición.

Ahora bien, las ecuaciones de Heaviside sólo toman en cuenta el modo de propagación transversal electromagnético TEM y en el caso de una jabalina pueden existir, en el medio o en la tierra, otros modos de propagación, ya que a medida que nos alejamos de la jabalina el campo tiende a una simetría esférica.

En este trabajo se desarrollan las ecuaciones equivalentes del telegrafista, para ser utilizadas en jabalinas, pero considerando todos los modos de propagación, además se asume que el medio es semi-infinito y formado por dos estratos (tierra – aire) y que existe en el suelo un fenómeno de propagación de las ondas electromagnética.

La presente investigación tiene como objetivo obtener un sistema de ecuaciones, con la misma topología que presentan las ecuaciones de Heaviside (1) y (2), pero válidas para cualquier modo de propagación.

De la solución de las nuevas ecuaciones se podrán extraer los parámetros eléctricos de la jabalina, considerando la dependencia de los parámetros con la frecuencia y la verdadera topología de la red eléctrica para la jabalina.

2. FUNCIONES DE POTENCIAL Y NUEVAS ECUACIONES DEL TELEGRAFISTA

A partir de las cuatro ecuaciones de Maxwell [9] y usando la condición de Lorentz [10], es posible obtener la ecuación no homogénea de Helmholtz para el vector potencial magnético $\bar{\mathbf{A}}$, en el dominio de la frecuencia angular ω :

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{A}} - \gamma^2 \bar{\mathbf{A}} = -\mu \bar{\mathbf{J}}_f \quad (3)$$

donde $\bar{\mathbf{J}}_f$ es el vector densidad de corriente fuente, en este caso se asume que la densidad de corrientes fuentes se encuentran en la jabalina y γ es la constante de propagación que depende de las propiedades del medio y de la frecuencia angular:

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \quad (4)$$

donde; ε , μ y σ son la permitividad, la permeabilidad y la conductividad del medio respectivamente, que en este caso se asumirá que estos parámetros son isotrópicos, lineales y constantes y $j = \sqrt{-1}$.

El potencial escalar eléctrico \bar{V} , en el dominio de la frecuencia ω , se obtiene a través de la condición de Lorentz [10], si el vector potencial magnético $\bar{\mathbf{A}}$ es conocido:

$$\bar{V} = -\frac{j\omega}{\gamma^2} \nabla \cdot \bar{\mathbf{A}} \quad (5)$$

Por otra parte, el campo eléctrico $\bar{\mathbf{E}}$ en el dominio de la frecuencia, se puede obtener si se conocen los potenciales vectorial magnético y escalar eléctrico [11]:

$$\bar{\mathbf{E}}(\omega) = -j\omega \bar{\mathbf{A}} - \nabla \bar{V} \quad (6)$$

Para resolver la ecuación (3), se aplica un método de integración, que se deduce de la segunda identidad de Green [10] [13] y que se muestra a seguir:

$$\bar{\mathbf{A}}(x, y, z) = \mu_1 \int_{\mathcal{V}'} g(x, y, z, x', y', z') \bar{\mathbf{J}}_f(x', y', z') dv' \quad (7)$$

donde: x, y, z son las coordenadas donde se quiere evaluar el campo; $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ son las coordenadas donde se encuentra la densidad de corriente fuente; \mathcal{V}' es el volumen donde se encuentran las corrientes fuentes, μ_1 es la permeabilidad del suelo y g es la función de Green para medios infinitos y bi-estratificados desarrollada por Sommerfeld [12][13]:

$$g(x, y, z, x', y', z') = \frac{e^{-\gamma_1 r}}{4\pi r} + \frac{e^{-\gamma_1 r'}}{4\pi r'} - 2 \int_0^\infty \frac{u J_0(\rho u) \gamma_1^2 \sqrt{u^2 + \gamma_0^2} e^{\sqrt{u^2 + \gamma_1^2} (z+z')}}{4\pi \left(\gamma_0^2 \sqrt{u^2 + \gamma_1^2} + \gamma_1^2 \sqrt{u^2 + \gamma_0^2} \right) \sqrt{u^2 + \gamma_1^2}} du \quad (8)$$

donde: J_0 es la función de Bessel de primer tipo y orden cero, γ_0 es la constante de propagación para el aire, evaluada con la ec. (4) y donde ϵ , μ , y σ deben corresponder a las propiedades del aire; γ_1 es la constante de propagación del suelo y ϵ , μ , y σ deben ser tomadas según las propiedades medias del suelo. Adicionalmente las variables r , r' y ρ vienen dadas por:

$$r' = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z')^2} \quad , \quad r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad , \quad \rho = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \quad (9)$$

La función de Green dada en la ec. (8), sólo es válida para el caso que las corrientes fuentes estén en dirección del eje z que se muestra en la figura 1.

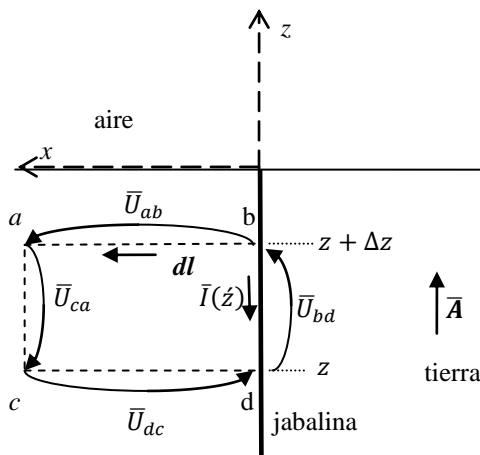


Fig. 1 Jabalina enterrada verticalmente en el suelo de longitud l

La figura 1 muestra una jabalina enterrada en el suelo; el sistema de coordenadas seleccionado, se ubicó de manera tal que el eje z quede de manera coaxial con la jabalina; por otra parte, el plano $z = 0$ se ubicó de forma tal que coincide con el plano formado por la frontera aire – tierra y el eje y , aunque no se muestra, se encuentra saliendo normal al plano de la figura.

Una aproximación que se realiza a la solución propuesta en (7), consiste en substituir la jabalina por un alambre muy fino, de esta forma, en lugar de integrar la densidad de corriente fuente, se integra la corriente en la jabalina:

$$\bar{\mathbf{A}}(x, y, z) = -\mathbf{a}_z \mu_1 \int_{-l}^0 g(x, y, z, x', y', z') \bar{I}(z') dz' \quad (10)$$

donde $\bar{I}(z')$ es la corriente en la jabalina, \mathbf{a}_z es un vector unitario que apunta en la dirección de z , l es la longitud de la jabalina, el signo menos en (10) obedece a que en la figura 1 se toma como sentido positivo de la corriente la dirección $-\mathbf{a}_z$ y por último, por la ubicación de los ejes de coordenada, se tiene que $x' = y' = 0$.

Si la corriente en la jabalina $\bar{I}(z')$ fuera conocida, el vector potencial magnético en la tierra se obtiene con (10) y luego el campo eléctrico se puede obtener usando (5) y (6); pero en este caso, la corriente en la jabalina $\bar{I}(z')$ es lo que se quiere calcular; por lo tanto, la ec. (10) por sí sola no tiene mucha utilidad; sin embargo, en este trabajo, la ec. (10) será usada para determinar las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de la jabalina.

Para obtener las ecuaciones del telegrafista, lo primero que se quiere realizar es sumar las tensiones que se muestran en el camino cerrado formado por las líneas segmentadas mostradas en la figura 1 y cuyos vértices están designados por las letras a , b , c y d ; los puntos a y c se encuentran muy alejados de la jabalina o en el infinito y los puntos b y d se encuentran sobre la superficie de la jabalina, las tensiones \bar{U}_{ab} y \bar{U}_{dc} serán calculadas siguiendo un camino horizontal, en dirección paralela al eje x mostrado en la figura 1.

Para calcular la tensión entre dos puntos cualesquiera k y m se integra el vector campo eléctrico, como se indica a continuación [11]:

$$\bar{U}_{km} = -\int_m^k \bar{\mathbf{E}} \cdot d\mathbf{l} = j\omega \int_m^k \bar{\mathbf{A}} \cdot d\mathbf{l} + \bar{V}_k - \bar{V}_m \quad (11)$$

donde \bar{U}_{km} es la tensión entre los puntos k y m , $d\mathbf{l}$ es el vector diferencial de longitud tangente al camino de integración y \bar{V}_k y \bar{V}_m son los potenciales escalar eléctrico de los puntos k y m respectivamente.

La suma de las tensiones, en un camino cerrado, tiene que ser igual a la integral de línea del campo eléctrico, dado por (6), siguiendo el mismo camino:

$$-\oint \bar{\mathbf{E}} \cdot d\mathbf{l} = j\omega \oint \bar{\mathbf{A}} \cdot d\mathbf{l} = \bar{U}_{ab} + \bar{U}_{ca} + \bar{U}_{dc} + \bar{U}_{bd} \quad (12)$$

Como el vector potencial magnético $\bar{\mathbf{A}}$ tiene sólo componente en la dirección \mathbf{a}_z según (10), la tensión \bar{U}_{ab} calculada según (11) es igual a menos el potencial escalar que tiene el punto b mostrado en la figura 2:

$$\bar{U}_{ab} = -\bar{V}(r, 0, z + \Delta z) \quad (13)$$

donde $(r, 0, z + \Delta z)$ son las coordenadas del punto b , r es el radio de la jabalina y $\Delta z > 0$. El punto a mostrado en la figura 2, no contribuye con el potencial por encontrarse en el infinito.

Análogamente, la tensión \bar{U}_{dc} es igual al potencial escalar que tiene el punto d mostrado en la figura 2:

$$\bar{U}_{dc} = \bar{V}(r, 0, z) \quad (14)$$

donde $(r, 0, z)$ son las coordenadas del punto d mostrado en la figura 2.

La tensión \bar{U}_{ca} se asume nula ya que se considera que no hay fuentes en el infinito:

Por último, la tensión \bar{U}_{bd} como es calculada sobre la superficie de la jabalina, por condiciones de frontera se impone que el campo eléctrico tangencial a la superficie, debe ser continuo, entonces se impone la siguiente condición [8]:

$$\bar{U}_{bd} = \int_z^{z+\Delta z} \bar{Z}_{int} \bar{I}(\zeta) d\zeta \quad (15)$$

donde \bar{Z}_{int} es la impedancia superficial o interna de la jabalina por unidad de longitud [8].

Por otra parte, la integral de línea para el vector potencial magnético, en la ec. (12), viene dado por:

$$\oint \bar{\mathbf{A}} \cdot d\mathbf{l} = \int_z^{z+\Delta z} \bar{\mathbf{A}}(r, 0, m) \cdot \mathbf{a}_z dm \quad (16)$$

Al substituir (13), (14), (15) y (16) en (12) se obtiene lo siguiente:

$$\bar{V}(r, 0, z + \Delta z) - \bar{V}(r, 0, z) - \int_z^{z+\Delta z} \bar{Z}_{int} \bar{I}(\zeta) d\zeta + j\omega \int_z^{z+\Delta z} \bar{\mathbf{A}}(r, 0, m) \cdot \mathbf{a}_z dm = 0 \quad (17)$$

Si ecuación anterior se divide toda por Δz y si $\Delta z \rightarrow 0$, se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d}{dz} \bar{V}_j(z) - \bar{Z}_{int} \bar{I}(z) + j\omega \bar{\mathbf{A}}_s(r, 0, z) \cdot \mathbf{a}_z = 0 \quad (18)$$

donde $\bar{V}_j(z)$ es el potencial escalar eléctrico, que tiene la superficie de la jabalina, en la posición z debido a su propia corriente:

$$\bar{V}_j(z) = \bar{V}(r, 0, z) \quad (19)$$

Al substituir (10) en (18):

$$\frac{d}{dz} \bar{V}_j(z) - \bar{Z}_{int} \bar{I}(z) - j\omega \mu_1 \int_{-l}^0 g(r, 0, z, 0, 0, \zeta) \bar{I}(\zeta) d\zeta = 0 \quad (20)$$

donde g viene dada por la ec. (8).

La ecuación (22) representa una de las ecuaciones equivalentes del telegrafista para jabalinas. La otra ecuación equivalente, se obtiene a partir de las ecuaciones (5) y (10). Para calcular el potencial escalar, en la tierra, es necesario calcular la divergencia del vector potencial magnético:

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{A}}(x, y, z) = -\mu_1 \int_{-l}^0 \frac{\partial}{\partial z} [g(x, y, z, x', y', z')] \bar{I}(z') dz' \quad (21)$$

Pero se desea que la divergencia del potencial vectorial magnético quede en función de la derivada de la corriente, para ello se calculará nuevamente la divergencia del vector potencial magnético, pero en el dominio de las coordenadas de las fuentes (x', y', z') , usando el operador especial ∇' que opera en las coordenadas en cuestión:

$$\nabla' \cdot \bar{\mathbf{A}}_s(x, y, z) = 0 \quad (22)$$

Cuyo resultado debe ser cero en vista que el potencial magnético, sólo depende de las coordenadas (x, y, z) , pero al substituir (10) en (22) se obtiene la siguiente igualdad:

$$\frac{\partial}{\partial z'} [g(x, y, z, x', y', z')] \bar{I}(z') = -g(x, y, z, x', y', z') \frac{d}{dz'} \bar{I}(z') \quad (23)$$

La ecuación anterior es válida para cualquier función de Green, entonces se plantea encontrar otra función de Green f tal que se cumpla la siguiente igualdad:

$$\frac{\partial}{\partial z'} [g(x, y, z, x', y', z')] = \frac{\partial}{\partial z'} [f(x, y, z, x', y', z')] \quad (24)$$

Si f existe, entonces haciendo uso de (23), la divergencia del vector potencial magnético se puede expresar como una función que depende de la derivada de la corriente en la jabalina:

$$\nabla \cdot \bar{A}_s(x, y, z) = \mu_1 \int_{-l}^0 f(x, y, z, x', y', z') \frac{d}{dz'} \bar{I}(z') dz' \quad (25)$$

donde por simple inspección de g , dada por la ecuación (8), y teniendo en cuenta (24), se obtiene f :

$$f(x, y, z, x', y', z') = -\frac{e^{-\gamma_1 r}}{4\pi r} + \frac{e^{-\gamma_1 r'}}{4\pi r'} - 2 \int_0^\infty \frac{u J_0(\rho u) \gamma_1^2 \sqrt{u^2 + \gamma_0^2} e^{\sqrt{u^2 + \gamma_1^2} (z+z')}}{4\pi \left(\gamma_0^2 \sqrt{u^2 + \gamma_1^2} + \gamma_1^2 \sqrt{u^2 + \gamma_0^2} \right) \sqrt{u^2 + \gamma_1^2}} du \quad (26)$$

Finalmente, usando (5), (19) y (25) se obtiene el potencial escalar en la jabalina en función de la derivada de la corriente:

$$\bar{V}_j(z) = \frac{-1}{\sigma_1 + j\omega\epsilon_1} \int_{-l}^0 f(r, 0, z, 0, 0, z') \frac{d}{dz'} \bar{I}(z') dz' \quad (27)$$

donde σ_1 y ϵ_1 son la conductividad y la permitividad del suelo respectivamente. La ecuación anterior es la segunda ecuación del telegrafista que se quería obtener.

Las ecuaciones obtenidas (20) y (27), para modelar jabalinas, presentan la misma topología que tienen las ecuaciones de Heaviside (1) y (2), la primera ecuación (20) relaciona la derivada de la tensión con la corriente de la jabalina y la segunda ecuación (27) relaciona la tensión de la jabalina con la derivada de la corriente. Es por esta razón que en este trabajo se pretende llamar al sistema de ecuaciones obtenido (20) y (27) como ecuaciones del tipo Heaviside o ecuaciones del telegrafista para jabalinas.

3. RED ELÉCTRICA EQUIVALENTE PARA MODELAR JABALINAS

Del sistema de ecuaciones integro – diferenciales (20) y (27), se puede obtener una la red eléctrica equivalente discreta, si la jabalina se divide en n segmentos tal como se muestra en la figura 3, todos de igual longitud Δl . Si el número de elementos es suficientemente grande, entonces se puede asumir que la corriente en cada segmento i es constante e igual a \bar{I}_i . La tensión $\bar{\Delta V}_i$ que cae en el elemento i (ver la figura 2) se puede obtener con la ayuda de la ecuación (22):

$$\bar{\Delta V}_i = \int_{l_{i+1}}^{l_i} \frac{d}{dz} \bar{V}_j(z) dz = (\bar{Z}_{int} \Delta l) \bar{I}_i + j\omega\mu_1 \sum_{j=1}^n \left[\int_{l_{i+1}}^{l_i} \int_{l_{j+1}}^{l_j} g(r, 0, z, 0, 0, z') dz dz' \right] \bar{I}_j \quad (28)$$

donde l_i es la distancia medida desde la superficie de la tierra hasta el elemento i , como se muestra en la figura 2.

Pero la ecuación (22) se puede poner como una ecuación de redes eléctrica, formada por impedancias conectadas en serie:

$$\bar{\Delta V}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Z}_{ij} \bar{I}_j \quad (29)$$

Donde cada elemento de la impedancia serie \bar{Z}_{ij} viene dado por:

$$\bar{Z}_{ii} = \bar{Z}_{int} \Delta l + j\omega\mu_1 \int_{l_{i+1}}^{l_i} \int_{l_{i+1}}^{l_i} g(r, 0, z, 0, 0, z') dz dz' \quad , \quad \bar{Z}_{ij} = j\omega\mu_1 \int_{l_{i+1}}^{l_i} \int_{l_{j+1}}^{l_j} g(r, 0, z, 0, 0, z') dz dz' \quad (30)$$

Por otra parte, si el número de elementos que se divide la jabalina es elevado, entonces se puede suponer que la derivada de la corriente $\frac{d}{dz} \bar{I}(z)$ es constante dentro de cada segmento i y aproximadamente igual a lo siguiente:

$$\frac{d}{dz} \bar{I}(z) \approx \frac{\Delta \bar{I}_i}{\Delta l} \quad \text{si} \quad l_i > z > l_{i+1} \quad (31)$$

donde $\Delta \bar{I}_i$ es la corriente que se drena a tierra por el elemento i .

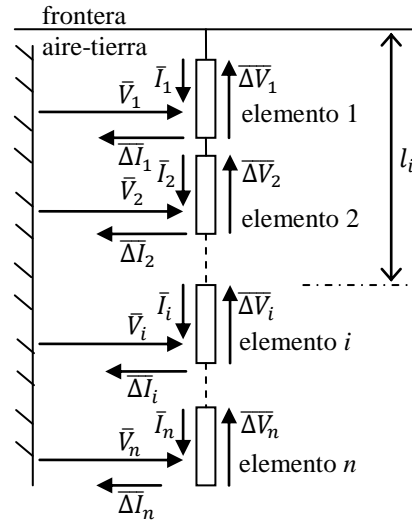


Fig. 2 Jabalina dividida en n secciones o segmentos

Entonces con la ecuación (27) y con la aproximación dada en (31), se puede calcular el potencial promedio \bar{V}_i (ver la fig. 2) que tiene el elemento i :

$$\bar{V}_i = \frac{\int_{l_{i+1}}^{l_i} \bar{V}(z) dz}{\Delta l} = \frac{-1}{\Delta l^2 (\sigma_1 + j\omega \epsilon_1)} \sum_{j=1}^n \left(\int_{l_{i+1}}^{l_i} \int_{l_{j+1}}^{l_j} f(r, 0, z, 0, z') dz' dz \right) \Delta \bar{I}_j \quad (32)$$

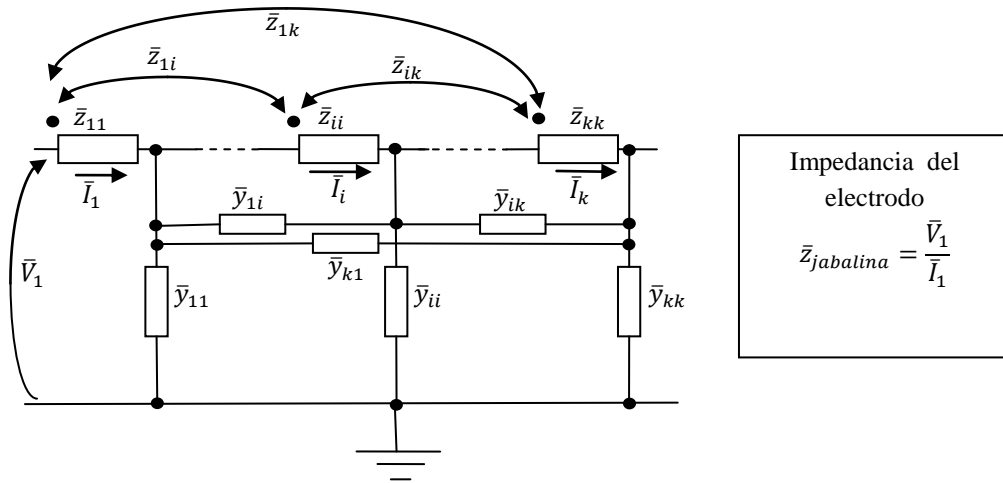


Fig 3. Red eléctrica equivalente entre tres secciones o segmentos (1, j y k) de una jabalina o de una barra para puesta a tierra.

La ecuación anterior se puede poner también como una ecuación de redes:

$$\bar{V}_i = \sum_{j=1}^n (z_{ij} \Delta \bar{I}_j) \quad (33)$$

donde \hat{z}_{ij} son impedancias que se encuentran en paralelo en la red eléctrica y vienen dadas por:

$$z'_{ij} = \frac{-1}{\Delta l^2 (\sigma_1 + j\omega \epsilon_1)} \int_{l_{i+1}}^{l_i} \int_{l_{j+1}}^{l_j} f(r, 0, z, 0, 0, z') dz' dz \quad (34)$$

Con (34) se construye la matriz denominada matriz impedancia paralelo $|\hat{Z}_p|$, de orden $n \times n$, que al invertirla se obtiene la matriz admitancia paralelo $|\bar{Y}_p|$; luego, con los elementos de la matriz admitancia paralelo se obtienen las admitancias de la red equivalente que se muestran en la figura 3:

$$\bar{y}_{ii} = \sum_{j=1}^n \hat{y}_{ij} \quad , \quad \bar{y}_{ij} = -\hat{y}_{ij} \quad (35)$$

donde \hat{y}_{ij} son los elementos extraídos de la matriz $|\bar{Y}_p|$ y \bar{y}_{ij} son las admitancias de los elementos para formar la red eléctrica equivalente y que se muestran en la figura 3.

La figura 3 muestra el circuito equivalente para tres secciones o segmentos de una jabalina, particularmente se muestra el primer segmento y los segmentos j y k ; el modelo eléctrico obtenido es mucho más complejo que el desarrollado por Heaviside [3] para líneas de transmisión, ya que se considera otros modos de propagación. Se puede notar la aparición de impedancias y admitancias “mutuas” entre secciones que no están presentes en el modelo de Heaviside.

Al final, la impedancia de la jabalina, usada como sistema de puesta a tierra vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$\bar{z}_{jabalina} = \frac{\bar{v}_1}{\bar{i}_1} \quad (35)$$

Agradecimientos

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela por el financiamiento de la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Bourg, S.; Sacepe, B.; Debu, T., (1995). Deep earth electrodes in highly resistive ground: Frequency behaviour. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1995. Symposium Record.* 1995. 14-18 Aug. 1995. pp 584 – 589.
- [2] Grcev L., Popov M. (2005): On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 20 Issue:2, April 2005.
- [3] Heaviside O. (1894). *Electrical papers*. Vol. II. New York. Macmillan and Co. pp 76-91.
- [4] DWIGHT H. (1936). *Calculation of Resistances to Ground*. Trans. Am. Inst. Elec. Eng.. Vol. 55, No. 12. pp 1319 – 1328.
- [5] Rosa E., Grover F. (1912). *Formulas and tables for the calculation of mutual and self inductance* (Revised), Bulletin of the Bureau of Standards, Volume 8, N° 1, page 1.
- [6] Sunde E. (1968). *Earth conduction effects in transmission systems*. (first edition). New York. Dower Publication, Inc. pp 14-17, 75-80.
- [7] Tagg, G. (1964). *Earth Resistances*. (first edition). New York. Pitman Publishing Corporation. pp 90-96.
- [8] PERRY M. (1985). *Low frequency electromagnetic design*. (first edition). USA. Marcel Dekker, Inc.. pp 225-231.
- [9] Jackson J. (1975). *Classical electrodynamics*. (second edition). New York. John Wiley & Son, Inc.. pp 219-226
- [10] Panofsky W., Phillips M. (1956). *Classical electricity and magnetism*. (Second printing). USA. Addison-Wesley Publishing Company Inc.. pp 1-6, 10, 210.
- [11] Marshall S., DuBroff R., Skick G. (1997). *Electromagnetismo Conceptos y Aplicaciones*. (primera edición). México. Prentice Hall Hispanoamericana S. A.. pp 316-317.
- [12] Sommerfeld A. (1949). *Partial differential equation in physics*. (second printing). New York. Academic Press Inc.. pp 247-257
- [13] Stinson D. (1976). *Intermediate mathematics of electromagnetic*. (first edition). Englewood Cliffs N. J.. Prentice-Hall, Inc.. pp 227-246.

RECTIFICACIÓN ESTRUCTURAL EN EL DISEÑO DE PRÓTESIS POLICÉNTRICA DE RODILLA UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS

Belkys T. Amador C.

bamador@unet.edu.ve

Grupo de Biomecánica, Universidad Simón Bolívar

Laboratorio de Prototipos, Universidad Nacional Experimental del Táchira

Carmen M. Müller-Karger

Rafael R. Torrealba A.

cmuller@usb.ve

rtorrealba@usb.ve

Grupo de Biomecánica, Universidad Simón Bolívar

Resumen. *Para el desarrollo de la prótesis policéntrica de rodilla con articulación de cuatro barras se requirió dimensionar el mecanismo considerando su desempeño cinemático, y establecer su comportamiento estructural suponiendo el estado de cargas al cual será sometido. El dispositivo propuesto está conformado por 5 eslabones y 4 ejes y fue analizado estructuralmente empleando el método de elementos finitos, a través de un análisis estático considerando materiales lineales e isotrópicos. Se simularon cuatro estados de carga, dos de ellos relacionados con las condiciones I y II de carga máxima de la prueba estructural principal de la norma ISO 10328, un tercero relacionado con una fuerza de compresión de 1000 N sobre la prótesis y el cuarto estado, incluyendo la carga real de una paciente con amputación transfemoral unilateral de 52 kg de peso. Los resultados obtenidos, que mostraron un 45% de los componentes de la prótesis con un factor de seguridad inferior a 1, condujeron al rediseño de varios componentes. Este trabajo presenta los resultados de la rectificación estructural realizada a la prótesis empleando las mismas condiciones de borde y especificaciones utilizadas para el modelo original. Para obtener factores de seguridad superiores a 1 en todos los componentes, se rediseñaron los eslabones trasero e inferior, así como tres de los cuatro ejes de la prótesis. Con el objeto de reducir la masa del dispositivo se modificó la forma de los eslabones, interviniendo las zonas donde los distintos componentes están sometidos a menores esfuerzos. Finalmente, la prótesis diseñada soporta las severas condiciones de carga a las cuales fue sometida, arrojando factores de seguridad superiores a 1. Considerando los resultados de este estudio se procedió a fabricar la prótesis de rodilla para personas con amputación transfemoral y se realizaron algunas pruebas preliminares.*

Palabras claves: Prótesis policéntrica de rodilla, Mecanismo de cuatro barras, Dimensionamiento estructural, Método de elementos finitos, Análisis de esfuerzos.

1. INTRODUCCIÓN

Las necesidades de un grupo de pacientes venezolanos con amputación transfemoral originaron las especificaciones para el diseño conceptual de una prótesis mecánica de rodilla con articulación policéntrica de cuatro barras. El diseño de detalle incluyó el dimensionamiento cinemático del mecanismo [1] y el dimensionamiento estructural de la prótesis. El dimensionamiento cinemático se basó en el análisis de estabilidad del mecanismo [2], donde, de la localización del centro instantáneo de rotación (CIR) en relación a la fuerza de reacción del piso durante el contacto, depende la estabilidad o flexión voluntaria de la prótesis para completar la fase de apoyo. El modelo inicial de la prótesis se conformó como se muestra en la Fig. 1A, por cinco eslabones (aluminio 7075) y cuatro ejes (acero inoxidable 304). Para el dimensionamiento estructural se empleó el método de elementos finitos (MEF), y se estudiaron cuatro estados de carga, dos de ellos señalados en la norma ISO 10328 “Prótesis - Pruebas estructurales para prótesis de miembros inferiores” [3], para las condiciones I y II de carga máxima de la prueba estructural principal, el tercero asociado a la prótesis sometida a una fuerza de compresión de 1000 N (equivalente al peso de una persona de 100 kg en posición unipodal) y el cuarto a la condición de carga real de una paciente con amputación transfemoral unilateral derecha, de 52 kg de peso y 1.60 m de altura, empleando una prótesis de rodilla *Otto Bock* modelo 3R60.

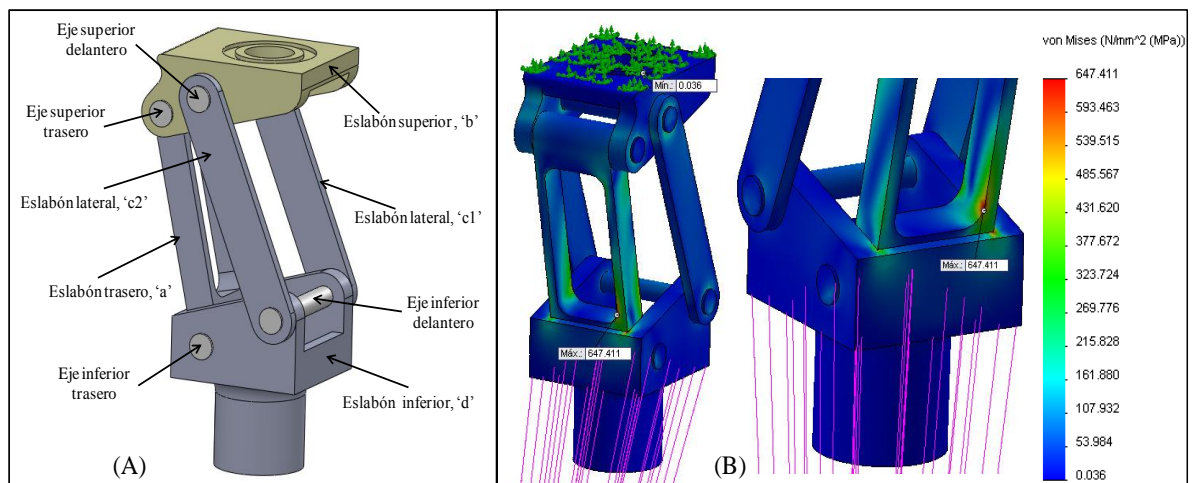


Figura 1. (A) Modelo CAD de la prótesis policéntrica. (B) Distribución de esfuerzos de von Mises en el modelo inicial para el estado de carga 1.

En la Fig. 1B se puede notar que para el estado de carga 1, el esfuerzo de von Mises máximo es de 647.41 MPa y ocurre en la zona inferior del eslabón 'a', cerca de la zona de contacto de ese eslabón con el eslabón 'd'. En la Tabla 1 (columna 2) se observa que el otro eslabón sometido a un esfuerzo elevado es 'd', con 622.83 MPa. Con relación a los ejes, el más demandado es el eje superior trasero, con un esfuerzo máximo de 455.07 MPa, siguiéndole el eje superior delantero con 327.72 MPa. Al calcular el factor de seguridad en todos los componentes (la resistencia a la fluencia del aluminio es 503MPa y la del acero 241MPa), se obtuvo que en los eslabones 'a' y 'd', así como en los ejes superior delantero y superior trasero, se ubicó por debajo de 1, resultados que mostraron la necesidad de rediseñar los componentes. Algo semejante ocurrió para el estado de carga 2 (columna 5 de la Tabla 1), donde tres de los cuatro ejes de la prótesis resultaron con factores de seguridad menores a 1. Estos resultados evidencian la necesidad de rediseñar el eslabón trasero 'a' y el eslabón inferior 'd', así como los ejes superior delantero, superior trasero e inferior delantero, por

supuesto, teniendo presente que la prótesis representa un peso a ser transportado por el usuario, por lo cual se debe cuidar la relación resistencia-peso del dispositivo.

Tabla 1. Esfuerzos de von Mises máximo y factor de seguridad para cada componente de la prótesis para los cuatro estados de carga estudiados.

Componente	Estado 1		Estado 2		Estado 3		Estado 4	
	Esf vM máx (MPa)	Factor de seg	Esf vM máx (MPa)	Factor de seg	Esf vM máx (MPa)	Factor de seg	Esf vM máx (MPa)	Factor de seg
eslabón a	647.41	0.78	417.15	1.21	119.78	4.20	68.93	7.30
eslabón b	458.77	1.10	432.28	1.16	104.64	4.81	67.27	7.48
eslabón c1	330.08	1.52	420.19	1.20	96.68	5.20	31.53	15.95
eslabón c2	486.25	1.03	423.07	1.19	91.85	5.48	34.40	14.62
eslabón d	622.83	0.81	475.98	1.06	133.11	3.78	38.95	12.91
eje sup del	327.72	0.74	314.84	0.77	77.91	3.09	25.88	9.31
eje sup tras	455.07	0.53	411.49	0.59	109.20	2.21	42.71	5.64
eje inf del	240.92	1.00	309.33	0.78	46.06	5.23	22.79	10.57
eje inf tras	192.43	1.25	185.38	1.30	39.94	6.03	32.31	7.46

2. REDISEÑO DE LA PRÓTESIS A PARTIR DE LOS ESTADOS DE CARGA.

Las cargas especificadas por la norma ISO 10328 son muy demandantes, y se requiere garantizar un factor de seguridad mayor o igual a la unidad para asegurar un adecuado desempeño del dispositivo. Con el objeto de alcanzar esta condición en los eslabones trasero 'a' e inferior 'd', así como en los ejes superior delantero, superior trasero e inferior delantero, fue necesario realizar los siguientes cambios en la estructura de la prótesis (Fig. 2A):

- Redimensionar el diámetro de los ejes superior e inferior delanteros de 8 a 10 mm y del eje superior trasero de 8 a 11 mm.
- Modificar los eslabones 'a', 'b', 'c1', 'c2' y 'd' para ajustarlos a los nuevos diámetros de los ejes.
- Incrementar el espesor del tope de extensión ubicado en el eslabón 'd'.
- Incrementar las dimensiones del eslabón 'a' (laterales y zona inferior).
- Reforzar el eslabón 'c1' y 'c2' en las zonas cercanas a los agujeros para los ejes.

Se seleccionó el estado de carga más crítico (estado 1) para realizar el análisis de esfuerzos, se utilizó el programa SolidWorks® Simulation, se ejecutó un análisis estático considerando los materiales lineales e isotrópicos (aluminio 7075 para los eslabones y acero inoxidable 304 para los ejes), y se utilizó el elemento tetraédrico de 10 nodos para el mallado. Para las condiciones de borde, tanto las sujeciones como las cargas externas se ajustaron para simular la Condición I de carga máxima de la prueba estructural principal de la norma ISO 10328 (en la Fig. 2B se incluyen las especificaciones de la norma) y se empleó contacto sin penetración para las distintas conexiones entre los componentes de la prótesis. En la Fig. 2C se presentan las condiciones de borde aplicadas en SolidWorks®, la carga es remota en relación a la rodilla protésica. Luego del análisis de convergencia se trabajó con una malla de 107180 elementos.

En la Fig. 3 se muestra la distribución de esfuerzos para la prótesis rediseñada, el esfuerzo máximo, 467.63 MPa, tiene lugar en el eslabón 'd', cerca del tope de extensión. En

la Tabla 2 se observa que el otro eslabón con mayor demanda es el ‘a’ con 392.92 MPa, y de los ejes, los más demandados son los ejes superiores. En la misma Tabla 2 se puede evidenciar que todos los componentes poseen un factor de seguridad superior a 1.

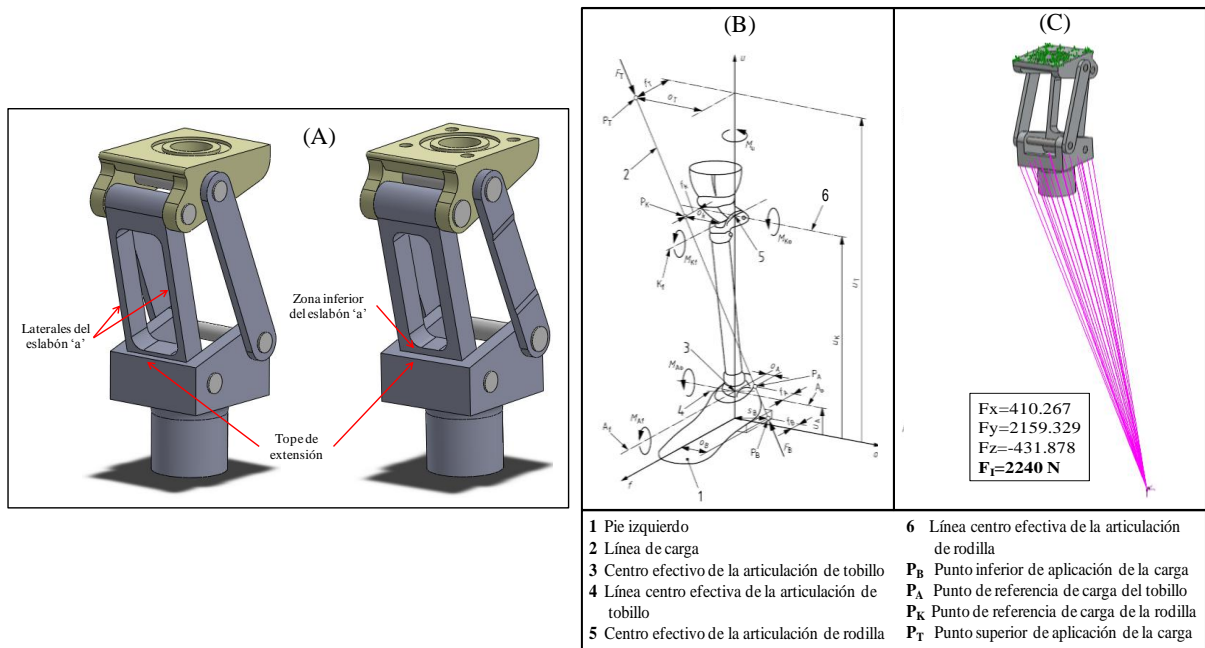


Figura 2. (A) Rediseño de la prótesis. (B) Condición I de máxima carga (adaptado de ISO 10328 (2006)). (C) Condiciones de borde en SolidWorks® Simulation, Condición I.

Tabla 2. Resultados de esfuerzo de von Mises para la prótesis rediseñada.

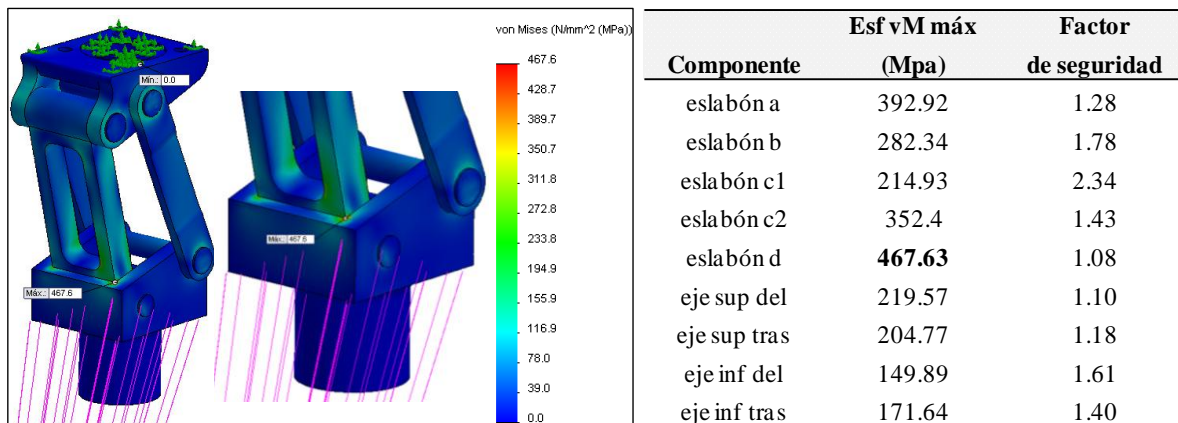


Figura 3. Distribución de esfuerzos de von Mises en la prótesis rediseñada para el estado de carga 1.

3. REDISEÑO DE LA PRÓTESIS PARA REDUCCIÓN DE MASA.

Considerando el compromiso resistencia-peso del dispositivo y con el objeto de disminuir masa de la prótesis, se procedió a rectificar la forma de algunos eslabones tomando en consideración los resultados del análisis de esfuerzos de la prótesis rediseñada para el estado de carga 1, específicamente interviniendo aquellas zonas donde los esfuerzos son menores. Se

realizaron cambios en los eslabones ‘b’, ‘c1’, ‘c2’ y ‘d’, tal como se detalla en la Fig. 4A. Partiendo del modelo rectificado se procedió a realizar el análisis de esfuerzos, incluyendo el análisis de convergencia, para los cuatro estados de carga. En la Fig. 5C se muestra el análisis para el estado de carga 1 (más crítico), para el cual se trabajó con una malla de 109019 elementos (Fig. 5B), los resultados mostrados en la Fig. 5C evidencian que el esfuerzo máximo ocurre en el eslabón ‘d’, en la zona cercana al tope de extensión. En la Tabla 3 se puede apreciar que todos los componentes poseen un factor de seguridad superior a 1.

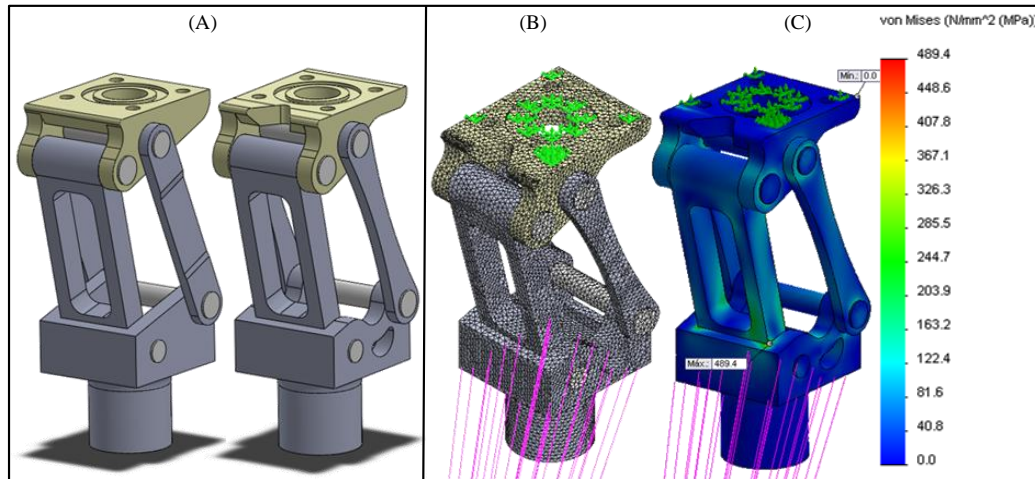


Figura 4. (A) Prótesis policéntrica de rodilla rectificada. (B) Malla de la prótesis para el estado de carga 1. (C) Distribución de esfuerzos de von Mises para el estado de carga 1.

Para el estado de carga 2, correspondiente a la condición II de carga máxima de la prueba estructural principal de la norma ISO 10328, se trabajó con una malla de 118049 elementos, el esfuerzo máximo tuvo lugar en el eslabón ‘c1’, justo donde hace contacto con el eslabón ‘b’ y posee una magnitud de 381.58 MPa. Los factores de seguridad, observados en la Tabla 3, son superiores a uno para todos los componentes, lo mismo ocurre para los estados de carga 3 y 4.

Tabla 3. Esfuerzos de von Mises máximo y factor de seguridad para cada componente de la prótesis luego de la reducción de masa, para los cuatro estados de carga estudiados.

Componente	Estado 1		Estado 2		Estado 3		Estado 4	
	Esf vM máx (MPa)	Factor de seg	Esf vM máx (MPa)	Factor de seg	Esf vM máx (MPa)	Factor de seg	Esf vM máx (MPa)	Factor de seg
eslabón a	413.92	1.22	223.01	2.26	82.24	6.12	46.93	10.72
eslabón b	365.09	1.38	276.34	1.82	69.64	7.22	40.49	12.42
eslabón c1	250.96	2.00	381.58	1.32	63.93	7.87	18.51	27.17
eslabón c2	395.58	1.27	365.52	1.38	65.00	7.74	18.29	27.50
eslabón d	489.4	1.03	363.57	1.38	106.81	4.71	37.75	13.32
eje sup del	220.91	1.09	220.72	1.09	41.63	5.79	12.87	18.73
eje sup tras	222.31	1.08	200.83	1.20	40.67	5.93	23.97	10.05
eje inf del	142.01	1.70	230.01	1.05	31.15	7.74	13.24	18.20
eje inf tras	174.92	1.38	167.1	1.44	36.29	6.64	29.20	8.25

Con el objeto de verificar el proceso de ensamblaje de la prótesis de rodilla y su característica modular, así como su cinemática en un paciente con amputación transfemoral

unilateral, se fabricó un prototipo en ABS (Fig. 5) empleando la técnica de prototipado rápido. Posteriormente se fabricó el prototipo metálico empleando los materiales definitivos, este prototipo se probó en dos pacientes masculinos con amputación transfemoral unilateral, el paciente 1, de 23 años de edad, 85 kg de peso, 173.5 cm de estatura y 6 años de experiencia en el uso de prótesis, y el paciente 2, de 21 años de edad, 79 kg de peso, 171 cm de estatura y 18 meses de experiencia en el uso de prótesis, obteniendo resultados favorables, tanto en las pruebas libres como en los análisis de marcha realizados.



Figura 5. Prototipos de la prótesis de rodilla y montaje en paciente con amputación transfemoral unilateral.

CONCLUSIONES

Empleando el MEF fue posible diseñar estructuralmente la prótesis policéntrica de rodilla, la cual debía soportar las severas condiciones de carga señaladas por la norma ISO 10328, la carga de compresión equivalente al peso de una persona de 100 kg y la carga máxima generada durante la marcha de una persona con amputación transfemoral unilateral de 52 kg de peso.

Considerando los resultados obtenidos se fabricó un prototipo rápido en ABS para luego fabricar el prototipo metálico, el cual fue probado en dos pacientes con amputación transfemoral unilateral, mostrando resultados favorables tanto en la estabilidad estructural como en la movilidad durante la marcha.

REFERENCIAS

- [1]. Amador, B., Torrealba, R., Rojas, M., Cappelletto, J. y Müller-Karger, C.M., Metodología para dimensionamiento de mecanismo policéntrico de rodilla utilizando análisis de marcha y algoritmos genéticos. *Revista Ingeniería Biomédica*, 6 [11], pp. 30-45, 2012.
- [2]. Radcliffe, C. W., Four-bar linkage prosthetic knee mechanisms: kinematics, alignment and prescription criteria. *Prosthetics and Orthotics*, vol.18, pp. 159-173, 1994.
- [3]. ISO 10328, *Prosthetics – Structural testing of lower-limb prostheses – Requirements and test methods*, 2006.

GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL: AVANCES EN BIOINGENIERÍA

Martín E. Durán-García

martinduran@usb.ve

Departamento de Tecnología Industrial, Universidad Simón Bolívar

Valle de Camurí, Carretera Nacional de Naiguatá, Camurí Grande, La Guaira-Venezuela

Resumen. *El proceso de gasificación de la biomasa permite la transformación de los desechos sólidos de índole agrícola, forestal, doméstica, comercial e industrial. Estos residuos están compuestos por carbono e hidrógeno debido a su carácter orgánico, lo cual constituyen una materia prima como biomaterial para la generación de energía. En la actualidad, la gasificación convencional presenta importantes limitaciones entre las más importantes son: alto compromiso en la rentabilidad del proceso debido a los elevados costos de pretratamiento de la biomasa, el balance energético de la reacción, almacenamiento del producto, producto no deseable de carácter contaminante, el porcentaje de gases combustibles producidos, y la conversión y pureza de los biocombustibles obtenidos. Adicionalmente, en la actualidad existen grandes volúmenes de desechos sólidos dispuestos en grandes estaciones de transferencia que principalmente se disponen para los rellenos sanitarios, pues esta biomasa es muy costosa procesarla a través de la gasificación convencional. La Gasificación en Agua Supercrítica (GASC) se lleva a cabo en condiciones de presión y temperatura superiores a las que definen el punto crítico del agua, por lo tanto sus condiciones de temperatura y presión son menores a las utilizadas en la gasificación convencional. En estas condiciones, la GASC es una prometedora tecnología para transformar la biomasa como biomaterial con un alto contenido en humedad. Una gran proporción de la biomasa residual (doméstica, comercial e industrial) es biomasa húmeda con un contenido superior al 95% de agua. El proceso GASC presenta ventajas gracias a las propiedades del agua supercrítica que actúa como disolvente de los materiales orgánicos y reactivo que genera hidrógeno con alto nivel de pureza idóneo para los procesos de conversión de energía.*

Palabras claves: Biomaterial, Biomasa residual, Gasificación en agua supercrítica, Energía, Hidrógeno.

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de la biomasa residual con fines energéticos es un tema de interés para la conservación del medio ambiente y el aprovechamiento de la energía. Esta biomasa genera uno de los problemas ambientales más importantes que va creciendo año tras año, pues el desarrollo económico de los países está relacionado de forma directa con la acumulación de pasivos ambientales y la gran necesidad de mayores requerimientos energéticos. Por tanto, se requieren soluciones específicas para este tipo de biomasa que abunda debido a la creciente actividad industrial, comercial y doméstica.

Dentro de las tecnologías avanzadas de depuración, los procesos hidrotérmicos han despertado un gran interés por su eficacia en la destrucción/eliminación de vertidos industriales y comerciales de alta carga orgánica. Entre ellos, el proceso de gasificación hidrotérmica, gasificación en fase acuosa a elevadas presiones y temperaturas, se presenta como una posible vía de aprovechamiento energético de residuos mediante su transformación en un gas combustible de gran poder calorífico por su alto contenido en hidrógeno e hidrocarburos ligeros. Mediante este proceso se pueden tratar residuos industriales, entre ellos biomasa residual, con un alto porcentaje de agua en su composición, generando la eliminación del residuo y su aprovechamiento energético. Específicamente el proceso de gasificación de la biomasa residual permite la transformación de los desechos sólidos de índole agrícola, forestal, doméstica, comercial e industrial. Estos desechos están compuestos por carbono e hidrógeno debido a su carácter orgánico, lo cual constituyen una materia prima para la generación de energía.

En la actualidad, la gasificación convencional presenta importantes limitaciones que garantice un proceso sustentable, entre las más importantes son: alto compromiso en la rentabilidad del proceso debido a los elevados costos de pretratamiento de la biomasa (secado de la materia prima, adecuación de la geometría y dimensiones de la biomasa, flujo de alimentación de una mezcla heterogénea, diseño de los equipos de alimentación a la zona de reacción, elevados costos de los materiales que resistan las condiciones de temperatura y presión, entre otros.), el balance energético de la reacción, almacenamiento del producto, producto no deseable de carácter contaminante, el porcentaje de gases combustibles producidos, y la conversión y pureza de los biocombustibles obtenidos. Adicionalmente, en la actualidad existen grandes volúmenes de desechos sólidos dispuestos en grandes estaciones de transferencia que principalmente se disponen principalmente para los rellenos sanitarios, pues esta biomasa es muy costosa procesarla a través de la gasificación convencional.

En esta investigación se realiza el análisis de la aplicación de la biomasa residual en la gasificación de biomasa en agua supercrítica, específicamente como biomateriales que son aprovechados por sus propiedades físico químicas en la generación de biocombustibles, y a su vez la contribución con el saneamiento ambiental al reutilizar los desechos residuales como medida de mitigación. De tal forma, se presentan algunas bases conceptuales, antecedentes, consideraciones del proceso de transformación de la biomasa residual con fines energéticos como avances significativos en la bioingeniería [1], [2], [3], [4] y [5].

2. BIOMASA RESIDUAL EN LA GASIFICACIÓN DE AGUA SUPERCRÍTICA

Los procesos en agua supercrítica básicamente operan en condiciones de presión y temperatura superiores a las que definen el punto crítico del agua (22,1 MPa y 374°C, respectivamente), donde a medida que aumentan la presión y la temperatura para las fases líquida y vapor en equilibrio, en el líquido disminuyen las interacciones intermoleculares debido a la

expansión térmica. En sentido contrario, para el vapor prevalece el efecto de la compresión frente al de expansión térmica, produciéndose un aumento de las interacciones. De este modo, las propiedades del líquido y del vapor se van acercando hasta que, llegados al punto crítico, coinciden. En ese punto, existe una sola fase (fase supercrítica) con propiedades intermedias entre las de los líquidos y los gases. En estos procesos se eliminan los principales inconvenientes propios de los procesos llevados a cabo en condiciones por debajo del punto crítico gracias a las especiales propiedades que presenta el agua como agente reactante en condiciones supercríticas [4] y [6]. Las propiedades del agua en condiciones supercríticas que sustentan el comportamiento de la misma son:

La densidad la cual es una función altamente dependiente de la presión, ya que el fluido es compresible. En dicho punto la compresibilidad se hace infinita por definición. Por lo tanto, las propiedades dependientes de la densidad, tales como el parámetro de solubilidad, la constante dieléctrica del disolvente y el volumen molar parcial del soluto sufren grandes cambios al producirse pequeñas variaciones en la presión y la temperatura. La densidad del agua supercrítica podrá controlarse desde valores cercanos a los del líquido hasta los próximos a los del estado gaseoso, simplemente variando las condiciones de presión y temperatura. En el punto crítico la densidad del agua, conocida como densidad crítica, es de 0,325 g/cm³. En la región crítica la densidad del agua es del orden de 0,1 g/cm³ [1], [2], [4] y [6].

El producto iónico, o la constante de disociación (K_w) del agua es hasta tres órdenes de magnitud mayores en la región líquida cercana al punto crítico que a temperatura ambiente. Esto significa que, en esas condiciones, pueden existir concentraciones mayores de los iones H⁺ y OH⁻, por lo que puede ser un medio efectivo para reacciones orgánicas catalizadas por ácidos y bases. Sin embargo, una vez que se supera el punto crítico, K_w disminuye drásticamente por lo que el agua se convierte en un medio pobre para las reacciones iónicas y se favorecen las reacciones de radicales libres [1], [2], [3], [4] y [5]. Por lo tanto, esta propiedad favorece en gran medida el proceso gasificación de la biomasa residual en agua supercrítica.

La constante dieléctrica del agua a 25°C y 101,325 KPa tiene un valor de 80 y es consecuencia de las uniones entre distintas moléculas por puentes de hidrógeno. Sin embargo, la constante dieléctrica del agua disminuye hasta un valor aproximadamente de 6 en el punto crítico (Weingartner y Franck, 2005) y hasta 1-2 a 450°C, por lo que el agua supercrítica tiene un comportamiento más parecido a un disolvente apolar que a uno polar. En general, la constante dieléctrica disminuye al aumentar la temperatura y aumenta con el aumento de la densidad. Las interacciones que predominan en estas condiciones son las del tipo dipolo-dipolo. Así, el agua como fluido supercrítico es un disolvente eficaz para los compuestos orgánicos y es completamente miscible con gran cantidad de gases, incluido el oxígeno. Por lo que en los procesos hidrotérmicos en condiciones supercríticas se forma una única fase desapareciendo las resistencias a la transferencia de materia. Por otro lado, el pequeño valor de la constante dieléctrica hace que las sales inorgánicas se hagan prácticamente insolubles en agua supercrítica. Concretamente, para el NaCl la solubilidad llega a ser menor de 100 ppm y para el CaCl₂ puede ser menor de 10 ppm [6], [7], [8] y [9].

El agua supercrítica presenta una viscosidad un orden de magnitud menor que el agua líquida y, por lo tanto, los coeficientes de difusión y movilidad iónica son un orden de magnitud mayor. Cuando la densidad del agua supercrítica es alta, su viscosidad es baja comparada con la que corresponde al líquido en condiciones normales. De este modo las moléculas de soluto difunden con facilidad a través del agua supercrítica, hecho que ayuda a que sea un medio muy favorable para que las reacciones tengan lugar a gran velocidad [4], [6], y [8].

El calor específico varía en un amplio rango de presión y temperatura, con valores que tienden a infinito en la cercanía del punto crítico. Esto se debe al aporte energético que se necesita para realizar la fuerte expansión térmica que sufre el agua en las cercanías del punto crítico [6], [9] y [10]. La conductividad térmica del agua aumenta, a presión constante, con la temperatura hasta alcanzar un máximo a los 250°C para disminuir levemente a temperaturas supercríticas como consecuencia de la ruptura de los puentes de hidrógeno [1] y [8].

El proceso GASC presenta ventajas gracias a las propiedades del agua supercrítica, la cual, no sólo actúa como disolvente de los materiales orgánicos sino también como reactivo, por lo cual no se requiere un proceso previo de secado siendo, precisamente el agua, en condiciones supercríticas, el medio de reacción. Por lo tanto, los compuestos orgánicos, lodos de las aguas residuales, residuos agrícolas y residuos del procesamiento de alimentos, se presentan como las mejores alimentaciones para el proceso GASC [1], [6] y [10].

Se han realizado experimentos en dos reactores de flujo tubular y dos reactores discontinuos empleando carbohidratos, compuestos aromáticos y glicina como compuesto modelo de las proteínas, y a su vez, estudian el comportamiento de biomasa residual real (paja, madera y lodos de aguas residuales). Se presentan los resultados obtenidos a diferentes tiempos de residencia (30, 60 y 120 s), temperaturas (400-600°C) y presiones (21-45MPa). Todas las alimentaciones estudiadas son completamente gasificadas a un producto rico en hidrógeno y presentando el CO₂ como principal producto carbonado [6] y [11].

Los mejores resultados obtenidos se producen en los casos en que se adiciona al sistema los catalizadores alcalinos, puesto que producen un descenso en la formación de CO y un aumento del CO₂ e hidrógeno en el producto gaseoso formado, llegando a porcentajes mayores del 60% de H₂ en alguno de los casos. [6] y [12] estudian mezclas de madera y lignina, las cuales son gasificadas con un catalizador de níquel a 400°C y 25MPa. En este caso la eficacia de gasificación es baja, pero se puede aumentar con la adición del catalizador de níquel al medio.

Por otro lado [4] presentan un modelado termodinámico de la gasificación de aserrín en condiciones supercríticas analizando la influencia de las principales variables de operación. La producción de equilibrio de hidrógeno y dióxido de carbono aumenta con la temperatura en un rango entre 400-800°C mientras que la producción de metano desciende claramente. El monóxido de carbono se produce en pequeñas cantidades aumentando hasta una temperatura de 550°C y a partir de esta temperatura comienza a disminuir. La producción de hidrógeno aumenta lentamente a elevadas temperaturas y llega a ser prácticamente constante a partir de 660°C aproximadamente.

En cuanto al efecto de la concentración de biomasa a 600°C y 25MPa, la producción de hidrógeno disminuye al aumentar la concentración. A su vez, la producción de equilibrio de hidrógeno y metano disminuye al aumentar la adición de oxidante a una misma temperatura y presión. Hay que tener en cuenta que la biomasa, al presentar una composición más compleja que los compuestos modelo, se pueden producir interacciones entre sus componentes, lo cual podría dar lugar a eficacias mayores o menores de las esperadas en su gasificación, con respecto a sus componentes por separado [8] y [12]. Luego es necesario continuar investigando para entender mejor el efecto de la gasificación y los mecanismos a través de los cuales se produce la conversión de la biomasa en gases combustibles.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL EN LA GASC

La principal aplicación de la biomasa residual está asociada a la formación de metano e hidrógeno, a partir de la mitigación de estos residuos como solución de saneamiento ambiental, donde se precisa la humedad de la biomasa como biomaterial libre de agua, además del

tratamiento que se aplica a la materia prima, y los subproductos no deseados como la ceniza, escoria y alquitrán, información que se presenta en la tabla 1, [1], [6], [8] y [11].

Tabla 1. Características de la Biomasa Residual

Tipo de residuo	Tratamiento	Densidad Aparente (Kg/m ³)	Humedad (%)	Alquitrán Producido (g/m ³)	Ceniza (%)	Formación de Escoria	Formación de Producto CH ₄ H ₂	
Cascarilla de Alfalfa	Cubitos	298	7,9	2,33	6	No	Si	No
Cascarilla de Frijol	Cubitos	440	13	1,97	10,2	Si	No	Si
Cascarilla de Cebada	Cubitos	299	4	0	10,3	Si	Si	No
Cáscara de Coco	Triturada	435	11,8	3	0,8	No	Si	Si
Cáscara de Coco	Piezas (2 a 5 cm)	65	-----	Insignificante	3,4	No	Si	Si
Mazorca de Maíz	Trozos	304	11	7,24	1,5	No	Si	Si
Forraje de Maíz	Cubitos	390	11,9	1,43	6,1	Si	Si	Si
Tallos de Algodón	Cubitos	259	5	5	17,2	Si	No	Si
Pepa de Durazno	Secado al Sol	474	1,1	1,1	0,9	No	Si	No

La caracterización de la biomasa residual y los biocombustibles generados está conformada por la prueba de análisis próximo que comprende la determinación de contenido de agua (según norma DIN 51718), cenizas (según norma DIN 51719) y materia volátil (según norma DIN 51720), a su vez la prueba de análisis último que se fundamenta en la determinación del contenido de carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno, se realiza por ejemplo a través de un analizador elemental con un cromatógrafo de gases acoplado a una microbalanza y el software correspondiente; y la prueba de poder calorífico a través de una bomba calorimétrica de acuerdo a la norma DIN 51900, DIN 51850 y DIN 51857 correspondiente a la mezcla de gases que se producen [13]. La caracterización microestructural se fundamenta en la determinación del área específica y volumen de los poros [13] con base a las normas DIN 66131 para determinar la superficie específica de materiales sólidos, DIN 66133 que permite determinar el volumen y la distribución de los macro y mesoporos; y la norma DIN 66135 que permite determinar el volumen de los microporos de carbones activados [1], [2] y [13].

4. CONCLUSIONES Y PREMISAS FINALES

Se concluye que la estructura, características y composición de la biomasa residual influyen en las propiedades del gas producido, el proceso de gasificación permite la producción de metano e hidrógeno a diferentes valores de P y T, las propiedades supercríticas del agua permiten la solvatación de la biomasa generando una reacción homogénea y su función como catalizador natural, el aprovechamiento energético se logra en el proceso de separación de CH₄ y H₂ donde el calor es aprovechado (disminuye el suministro energético), los reactores en la GASC son

principalmente de lecho fluidizado, flujo burbujeante y reactores multitubulares, la formación de productos no deseados (alquitrán, cenizas y escorias) se minimiza a través de la gasificación de la biomasa residual alimentada como biomaterial, la cual participa en las reacciones homogéneas que favorecen la transferencia de masa, el producto principal a partir de la biomasa residual es hidrógeno con alto nivel de pureza idóneo para los procesos de conversión de energía, constituyéndose en un significativo aporte de la bioingeniería.

REFERENCIAS

- [1]. Antal, M. J., Jr.; Allen, S. G.; Schulman, D.; Xu, X.; Divilio, R. J. Biomass gasification in supercritical water. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 39, pp. 4040-4053, 2000.
- [2]. Kumar, A.; Jones, D. D.; Hanna, M. A. Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology. *Energies*, vol. 2, pp. 556-581, 2009.
- [3]. Hao, X. H.; Guo, L. J.; Mao, X.; Zhang, X. M. and Chen, X.J. Hydrogen production from glucose used as a model compound of biomass gasified in supercritical water. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, pp. 55-64, 2003.
- [4]. Lu, Y. J.; Guo, L. J.; Ji, C. M.; Zhang, X. M.; Hao, X. H.; Yan, Q. H. Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water: A parametric study. *International Journal of Hydrogen Energy* vol. 31, pp. 822-831, 2006.
- [5]. Yanik, J.; Ebale, S.; Kruse, A.; Saglam, M.; Yueksel, M. Biomass gasification in supercritical water: Part 1. Effect of the nature of biomass. *Fuel*, vol. 86, n. 15, pp. 2410-2415, 2007.
- [6]. Guo, L. J.; Lu, Y. J.; Zhang, X. M.; Ji, C. M.; Guan, Y.; Pei, A. X. Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water: A systematic experimental and analytical study. *Catalysis Today*, vol. 129, pp. 275-286, 2007.
- [7]. Fang, Z.; Minowa, T.; Fang, C.; Smith, R. L., Jr.; Inomata, H.; Kozinski, J. A. Catalytic hydrothermal gasification of cellulose and glucose. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 981-990, 2008.
- [8]. Lee, I.; Kim, M.; Ihm, S.-K. Gasification of glucose in supercritical water. *In.Eng. Chem. Res.*, vol. 41, pp. 1182-1188, 2002.
- [9]. Lu, Y.; Guo, L.; Zhang, X.; Yan, Q. Thermodynamic modeling and analysis of biomass gasification for hydrogen production in supercritical water. *Chemical Engineering Journal*, vol. 131, pp. 233-244, 2007.
- [10]. Lu, Y.J.; Jin, H.; Guo, L. J.; Zhang, X. M.; Cao, C.Q.; Guo, X. Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water with a fluidized bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 6066–6075, 2008.
- [11]. Matsumura, Y.; Hara, S.; Minowa, T.; Noda, Y.; Shimizu, Y. Catalyst-slurry supercritical water gasification (CS-SCWG) as a new wet biomass gasification technology. *15th European Biomass Conference and Exhibition: From Research to Market Deployment. Berlin*, 2007.
- [12]. Yoshida, T.; Oshima, Y. Partial Oxidative and Catalytic Biomass Gasification in Supercritical Water: A Promising Flow Reactor System. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 43, pp. 4097-4104, 2004.
- [13]. Rincón, S; Gómez, A; Klose, W. *Gasificación de Biomasa Residual de Procesamiento Agroindustrial. Gasificación de Carbonizados*. Informe Técnico Universidad de Kassel y Universidad Nacional de Colombia, 2011.

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE UN SISTEMA DE IMPLANTE DENTAL SOMETIDO A UN ESTADO DINÁMICO DE CARGA

Yomar González

Gladys Uzcátegui

Jennire Vivas

yomar.gonzalez@inabio.edu.ve

gladys.uzcategui@inabio.edu.ve

jennire.vivas@inabio.edu.ve

Instituto Nacional de Bioingeniería

Av. Miguel Otero Silva, Urb. Sebucán, Caracas-Venezuela

Abstract. *When teeth are lost the patient's ability to comfortably smile, comfort, speaking and normal bone growth is compromise due to lack of stimulation. A dental implant treatment is usually used to restore the lost of functionality and the stimulation. The aim of this study is to simulate the mechanical response of a new implant design under dynamic loading condition.*

Recent simulations are mainly based on static loads and the influence of strength-variable loading on the implant system (abutment, implant and crown) remains unknown. A 3D masticatory forces were implemented into a FEM analysis to calculate the strain-stress response under elastic and poroelastic media.

From the strain-stress field, the Soderberg equation for estimation of fatigue resistance was applied. Following the ISO 14801:2007, the survival of the specimen to 5×10^6 load cycles (14 Hz) of progressive fatigue under physiological conditions was verified. The data was used to validate the new design.

According to previous studies, the mechanical strength and probability of failure were compared resulting in a good performance of stresses below yielding and longevity up to 5×10^6 load cycles.

Keywords: dental implant, elasticity, poroelasticity, fatigue, FEM.

Resumen.

La pérdida parcial o completa de los dientes, genera en las personas problemas estéticos, incomodidad, dificultad para hablar y masticar y la pérdida progresiva del hueso por falta de

estimulación. El siguiente trabajo de investigación tiene como finalidad simular, mediante el método de elementos finitos, un sistema de implante dental osteointegrado sometido a un estado dinámico de carga para analizar la respuesta mecánica del modelo.

La simulación numérica incluyó un sistema de cargas 3D sinusoidales, pulsadas e intermitentes, obteniendo así el estado de esfuerzos y deformaciones tanto para un medio elástico como para un medio poroso, en régimen lineal y en medio homogéneo.

Luego se analizó su comportamiento a fatiga por medio del criterio de Soderberg, dando como resultado que el nuevo dispositivo implantológico se encuentra en una zona segura de carga.

Los resultados de las simulaciones mostraron las concentraciones de esfuerzos presentes en el dispositivo bajo la acción de las cargas dinámicas impuestas. Los valores de los esfuerzos no alcanzaron el límite elástico ni el límite de fatiga del dispositivo.

Palabras claves: implante dental, elasticidad, poroelasticidad, fatiga, MEF

1. INTRODUCCIÓN

La pérdida parcial o completa de los dientes, genera en las personas problemas estéticos, incomodidad, dificultad para hablar, masticar y la pérdida progresiva del hueso por falta de estimulación. El reemplazo de dientes brinda bienestar a aquellos que padecen de pérdida dentaria, y una de las opciones más conservadoras y exitosas es el tratamiento con implantes dentales.

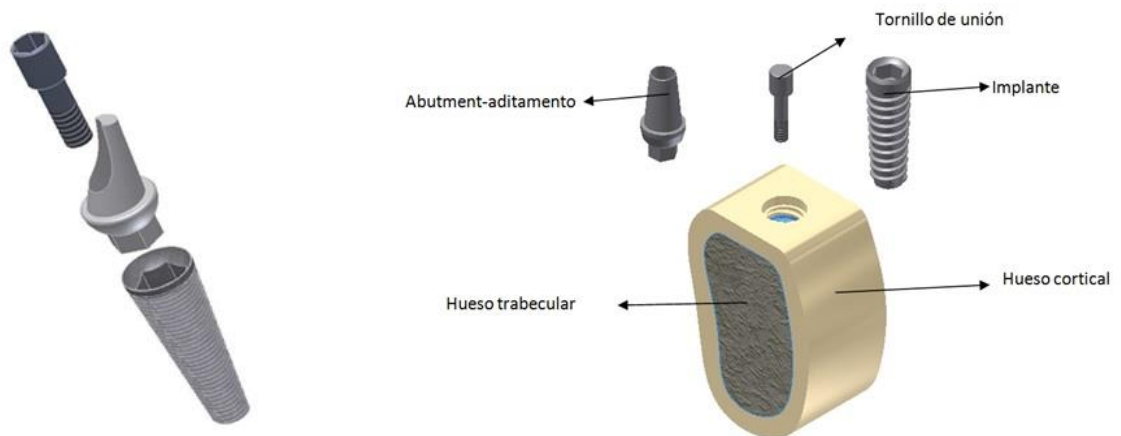


Figura 1- Sistema implantológico y el hueso mandibular (Uzcátegui et al [1]).

Un sistema implantológico es el sustituto artificial de un diente perdido. Este se compone de dos partes principales: el implante, siendo esta la pieza que estará en contacto con el hueso, y la parte emergente, que es el aditamento, abutment o pilar protésico, el cual estará unido al implante por medio de un tornillo de unión, como lo muestra la Fig. 1.

Los sistemas de implantes dentales pueden presentar fallas al ser sometidos a cargas estáticas o dinámicas, provocando pérdida de hueso y fracaso del tratamiento implantológico (Kayabasi et al [2]). La mayoría de los trabajos publicados considerando materiales en el rango elástico-lineal presentan un sistema de cargas estáticas en el eje axial y con inclinación oblicua a la prótesis (Uzcátegui et al [1], Kayabasi et al [2]; Steinebrunner et al [3]; Vílchez et al [4]; Danza et al [5]). Asimismo, diferentes investigaciones afirman que existen muy pocos estudios realizados que

asuman cargas dependientes del tiempo y su influencia en todo el conjunto prótesis (Abutment-Aditamento), implante y hueso.

2. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

2.1 Modelado y sensibilidad de la malla

Se realizó un análisis en tres puntos de las zonas críticas donde el sistema podría sufrir fracaso o fractura. se trazaron las gráficas de sensibilidad en los sólidos modelados (Fig. 2A-B), calculando los esfuerzo de Von Mises para distintos tamaños de elementos.

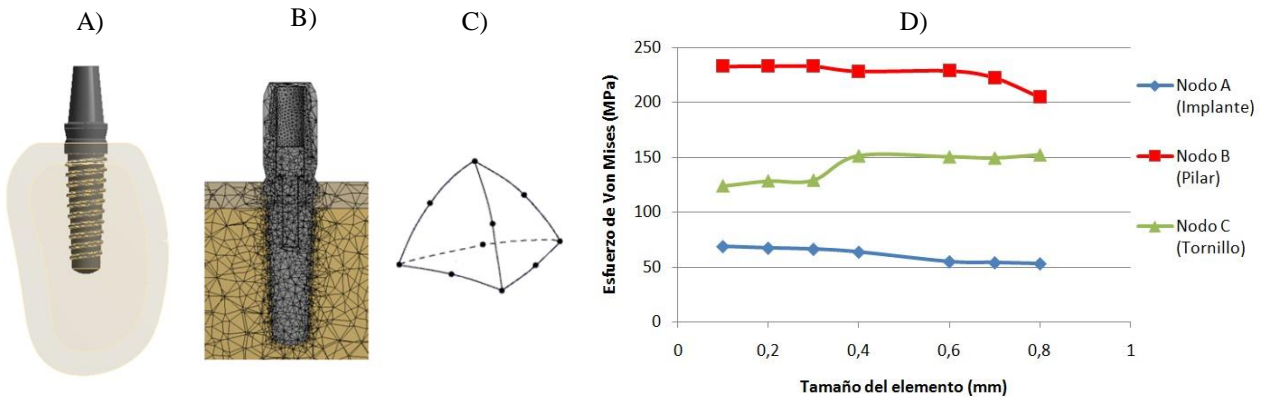


Figura 2 - A) Ensamblaje del sistema dental con el hueso mandibular B) Corte del modelo implantológico y hueso mandibular discretizados C) Geometría del tipo de elemento utilizado.

En base a la Figura 2D, el tamaño del elemento mínimo seleccionado para la discretización del modelo y para la convergencia de los resultados en el sistema implantológico, es de valor igual a 0,3 mm. Para el hueso mandibular, se utilizó un tamaño de elemento igual a 1.5 mm.

2.2 Materiales y condiciones de contorno

Un punto importante en el desarrollo del análisis modelo del sistema dental implantar, es lo relacionado con la asignación de propiedades mecánicas de los materiales involucrados. La Tabla 1 muestra las propiedades asignadas a los modelos.

Tabla 1 Propiedades de los materiales. (*)ASM, (**)Ao et al [6].

Propiedades	Ti-6Al-4V*	Hueso trabecular**	Hueso cortical**
Módulo de elasticidad (E)	113.800 MPa	1370 MPa	14000 MPa
Resistencia a la fluencia (Sy)	880 MPa	130 MPa	130 MPa
Coefficiente de Poisson(v)	0.35	0.3	0.3
Permeabilidad hidráulica (κ)	-	$1,47 \times 10^{-17}$	1×10^{-17}
Coefficiente de Skempton (B)	-	0,98	0,98

Una de las principales causa de pérdida ósea peri-implantar y posterior fracaso del tratamiento implantológico, después de lograda la osteointegración, son las tensiones transmitidas al hueso mandibular. Dichas fuerzas presentan magnitudes de 114,6 N, 23,4 N y 17,1 N en las direcciones axial (Y), mesiodistal (X) y lingual (Z) respectivamente (Fig. 3B). En la superficie de los cortes transversales de la mandíbula, se restringió su desplazamientos en los ejes X, Y y Z, semejante a un empotramiento en ambos lados.

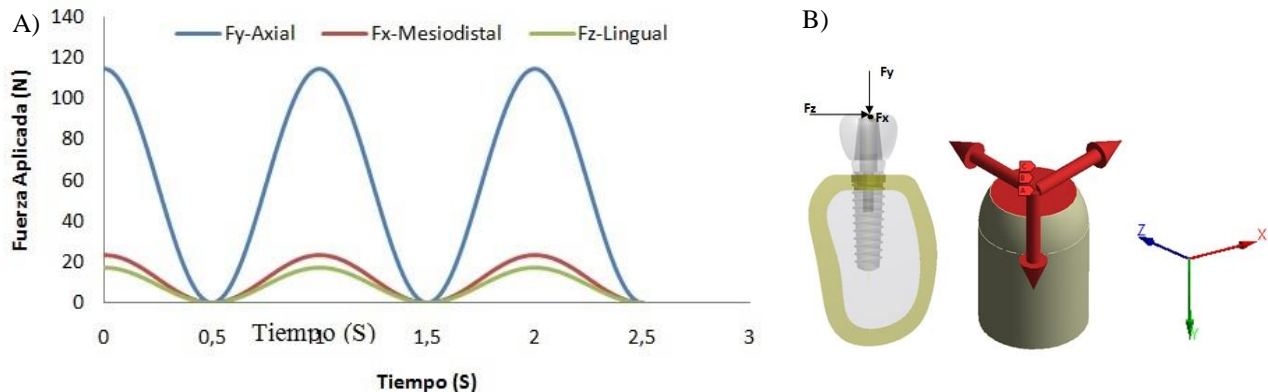


Figura 3 - Análisis dinámico. A) Carga cíclica de amplitud constante en dos periodos, idealizando el proceso de mordida del ser humano. (Kayabasi et al [2]),

B) Transmisión de cargas oclusales estáticas en la parte superior de la corona del implante dental (vista transversal).

2.3 Análisis elástico - lineal

En un primer paso, se realizó un nuevo análisis elástico en los puntos máximos de la carga masticatoria impuesta. Se pudo observar que los valores no excedieron el límite de la fluencia de los materiales involucrados (Uzcátegui et al [1]).

En base a lo anterior y a estudios previos en el INABIO se consideró que los sistemas de implantes dentales no fallan al someterlos a solicitaciones estática (Uzcátegui et al [1], Vílchez et al [4]), sin embargo los resultados obtenidos hacen concluir que con el tiempo esa misma carga crítica podría hacer fracasar el tratamiento. Como segundo paso, se realizaron simulaciones de fatiga (Fig. 4), según la norma ISO 14801:2007, llevadas a cabo hasta que los elementos del sistema alcanzaran el límite mínimo permisible para un alto número de ciclos (5×10^6 ciclos), con una carga unidireccional de 150 N, 300 N, 400 N y 500 N, y con una frecuencia igual a 14 Hz. La Tabla 2 muestra las condiciones y los resultados de la fatiga en el modelo propuesto en esta investigación, siguiendo el mismo patrón de análisis empleado por Hyung-Seop [7].

2.4 Análisis poroelástico - lineal

Como tercer paso se realizó un estudio del sistema implantológico considerando el tejido óseo como un medio poroso y saturado. El gradiente de presiones que genera el flujo de fluidos atravesando un material poroso como el hueso, ocasiona en el dispositivo cambios en el campo de esfuerzos y deformaciones obtenidos en el apartado anterior. Las condiciones de borde son las mismas utilizadas previamente (Fig. 3), imponiendo una presión de poro nula en la superficie ósea por restricción del periósteo.

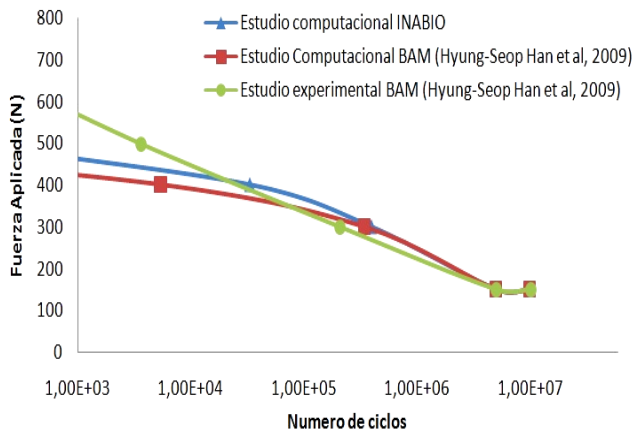
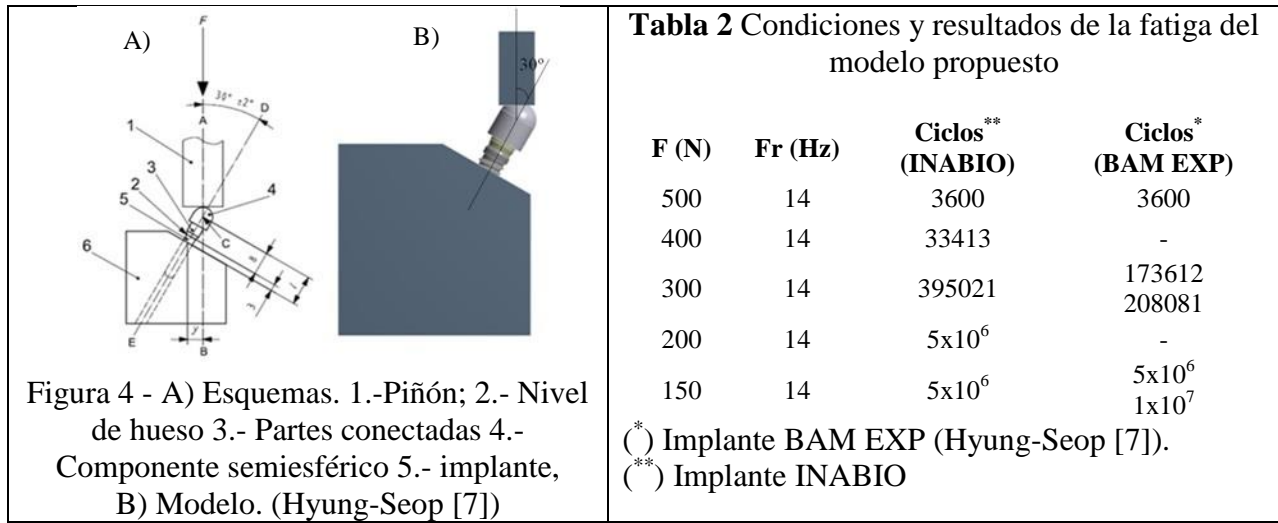


Figura 5 - Estudio a fatiga. Resultados y comparación entre el sistema propuesto en el INABIO y el dispositivo BAM, aproximando los datos a una curva de tendencia. (Kayabasi et al [2]).

Tabla 3 Comparación de los valores de esfuerzo de Von Mises, presentes en componentes críticos del sistema, en un entorno elástico lineal y en un medio poroso

Elemento del sistema	Esfuerzo Max. de Von Mises (MPa)
Aditamento (Medio elástico)	376,4
Aditamento (Medio Poroelástico)	457,68
Implante (Medio elástico)	66,66
Implante (Medio Poroelástico)	83,28
Tornillo de unión (elástico)	333,85
Tornillo de unión (poroelástico)	501,22

Luego se estima el factor de seguridad del sistema implantológico con el criterio de Soderberg para determinar la confiabilidad que posee el modelo propuesto.

Tabla 4 Estimación del factor de seguridad para el tornillo de unión

Tipo de análisis	Esfuerzo alternante (σ_a)	Factor de seguridad (N)
elástico	167,93 MPa.	1,52
poroelástico	250,61 MPa.	1,01

3 CONCLUSIONES PRINCIPALES

Se puede ver en la tabla 2 que para fuerzas mayores o iguales a 500 N y considerando una respuesta elástica, el dispositivo puede fallar por fractura, consecuencia desfavorable para el tratamiento implantológico; y para fuerzas menores a 200 N, tiene una vida útil para ciclos mayores e iguales a 5×10^6 . Afortunadamente, según los especialistas, la fuerza equivalente es inferior a 150 N a una frecuencia fisiológica menor o igual a 2Hz, por lo que el dispositivo puede considerarse exitoso.

En la figura 5 se encuentran expresados los resultados del dispositivo “BAM” y el sistema implantológico diseñado en el INABIO, destacando la similitud entre los datos experimentales y numéricos. Además se puede ver en el diagrama, que el sistema estudiado en esta investigación garantiza un mínimo de vida útil de 5×10^6 ciclos para cargas menores a 200 N. Asimismo se puede acotar que la curva del sistema implantológico propuesto, tiene un mejor desempeño que el reportado para el sistema BAM, respondiendo a los requerimientos clínicos y a los requisitos establecido por las normas internacionales.

Según los resultados, aumenta el campo de esfuerzo del dispositivo asumiendo un comportamiento poroelástico lineal en el hueso, tanto para el implante como para el aditamento protésico. Se constató que al asumir un medio poroso, aumenta las posibilidades de falla al momento de analizar el dispositivo en el tiempo, por lo que se requieren mayores estudios.

4 REFERENCIAS

- [1].Uzcategui G., Cedeño J., Cerrolaza M., *Distribución de esfuerzos en un modelo de implante dental por elementos finitos. Rev. Numerical Methods, Simulation and Design in Bioengineering*, Vol XXIX, N 67, pp. 6653-6663, 2010.
- [2].Kayabasi, O., Yuzbasioğlu, E and Erzincanl, F., Static, dynamic and fatigue behaviors of dental implant using finite element method. *Advances in Engineering Software*. Vol. 37: I-10, 2006.
- [3].Steinebrunner, L., Wolfart, S., Ludwig, K., Kern, M., Implant-abutment interface design affects fatigue and fracture strength of implant. *Clin. Oral Impl.*, pp. 1276-1284, 2008.
- [4].Vilchez S., *Estudio de la distribución de esfuerzos en el sistema implante dental cónico - maxilar mediante elementos finitos*. Tesis de pregrado, UCV, 2008.
- [5].Danza, M., Palmieri, A., Farinella, F., Brunelli, G., Carinci, F., Gerardi, A., Spinelli, G., Three Dimensional Finite element Analysis to Detect Stress Distribution in Spiral Implants and Surrounding Bone. *Dental Research Journal*, Vol. 6, N°. 2, 2009.
- [6].Ao J., Li T., Liu Y., Ding Y., Wu G., Hu K., Kong L., Optimal design of thread height and width on an immediately loaded cylinder implant: Finite element analysis, *Comput. Biol. Med.*, 2010.
- [7].Hyung-Seop Han, *Design of new root-form endosseous dental implant and evaluation of fatigue strength using finite element analysis*. PhD. Theses. University of Iowa, 2009.

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE CELDAS UNITARIAS PARA UN ANDAMIO BIOMIMÉTICO DE REGENERACIÓN DE TEJIDO ÓSEO USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Sofía Rodríguez

sofiacrm2007@hotmail.com

Departamento de Materiales, IUT Dr Federico Rivero Palacio.

Carretera panamericana, Km 8, Edo. Miranda, Caracas-Venezuela.

Jennire Vivas

Everling Dávila

jennire.vivas@inabio.edu.ve

everling.davila@inabio.edu.ve

Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela.

Ciudad Universitaria, Av. Los Estadios, Los Chaguaramos, Caracas-Venezuela.

Resumen. *Un andamio biomimético o scaffold, actúa como soporte provisional de la matriz extracelular, permitiendo un mejor control de los estímulos mecánicos que intervienen sobre las células, por lo que debe poseer propiedades mecánicas para soportar y simultáneamente promover la regeneración del tejido. En el presente trabajo, mediante el uso de herramientas CAD, se diseñaron tres tipos de celdas unitarias, estas son unidades repetitivas que conforman el andamio; dichas celdas son tridimensionales, de geometrías irregulares y distintos porcentajes de porosidad. Las mismas fueron evaluadas y comparadas como binomios y finalmente se seleccionó el conjunto con las propiedades más adecuadas para ser utilizadas como matriz o scaffold de regeneración de tejido óseo. Se evaluaron las propiedades mecánicas en compresión de cada celda y en conjunto, utilizando el Poli ácido L-láctico (PLLA) como material de ensayo; se usó el software de método de elementos finitos Autodesk Inventor®, para obtener los valores de esfuerzos máximos en base al criterio de Von Mises. En los resultados, se demuestra la importancia del volumen, tamaño y morfología de poros con respecto a la resistencia mecánica.*

Palabras clave: Celda, Andamio, Regeneración de tejido óseo, Porosidad, Resistencia a la compresión.

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería de tejidos, es una multidisciplina que aplica los principios de la ingeniería y la ciencia para desarrollar una extensa variedad de dispositivos artificiales que posteriormente mejoran las funciones biológicas. Uno de los dispositivos más estudiados han sido los andamios biomiméticos, los cuales son soportes capaces de inducir un microambiente favorable para restaurar, mantener y aumentar las funciones de algún tejido lesionado [1].

Un andamio correctamente diseñado, debe cumplir con los requerimientos biológicos y mecánicos para estimular la formación celular del tejido en aquellas zonas del cuerpo humano que estén deterioradas y su proceso de regeneración sea insuficiente y lento. Esto implica que el soporte debe simular un comportamiento semejante al tipo de tejido que se requiera [2].

La variable crítica o esencial en la elaboración de andamios es la arquitectura tridimensional del poro, debido a que no solo influye en sus propiedades mecánicas sino también en la habilidad de las células, nutrientes, oxígeno y productos de desecho para penetrarlo [3]. Del mismo modo, dichas propiedades mecánicas son un punto crítico, ya que el andamio debe ser capaz de soportar temporalmente el régimen de esfuerzos a los que se encuentra sometida la zona afectada, lo que implica la necesidad de proporcionarle una resistencia adecuada, la cual estará determinada por la combinación de porosidad, tamaño de poro, orientación, morfología e interconectividad [2].

El *scaffold* puede ser utilizado como soporte de varios tipos de tejido, tales como fibroblastos, condrocitos, osteoblastos, entre otros. Para la regeneración de cada uno de ellos, conforme al tamaño y morfología de célula, son necesarios distintos andamios con características y propiedades totalmente diferentes.

Uno de los andamios más estudiados en el área de la bioingeniería, son los utilizados para la regeneración de tejido óseo, en donde los osteoblastos son las células que intervienen en este proceso. Este tejido, posee a su vez dos tipos de hueso, uno cortical o compacto y trabecular o esponjoso. En todos los diseños realizados, se han enfocado en el tejido trabecular, debido a que presenta mayor porosidad e interconexiones que contribuyen con la formación del tejido cortical y además permite el paso de nutrientes y de células como los osteoclastos, las cuales son las que poseen mayor dimensión con respecto a las demás células óseas, por lo que es necesario un tamaño de poro que no impida el acceso de estas. La única problemática para la reproducibilidad del tejido esponjoso, ha sido su geometría irregular [4].

La mayoría de los materiales biológicos, presentan un comportamiento elástico no lineal y dado a la complejidad de las ecuaciones involucradas en el cálculo del esfuerzo y la deformación, no es posible describir su comportamiento mediante aproximaciones sencillas; por tal razón, se recurre al método numérico de elementos finitos. Este método es una aproximación computacional, que consiste en dividir un sólido de geometría compleja en un gran número de elementos, con nodos interconectados de geometrías más simples que la forma del sólido original de tal modo que pueda ser reproducida de una manera menos engorrosa [5].

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. Criterios

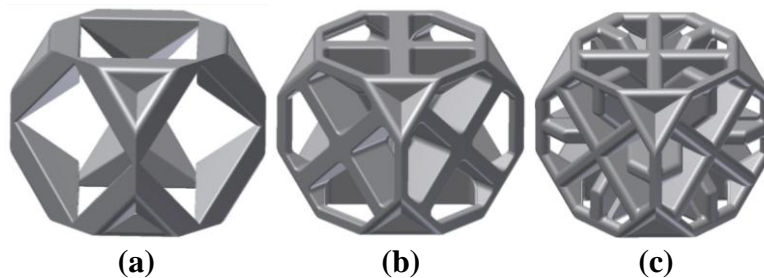
Antes del diseño de las geometrías tridimensionales, se tomaron en cuenta los parámetros mostrados en la Tabla 1, los cuales son específicos para regeneración de tejido óseo. Adicionalmente se precisaron los siguientes criterios:

Tabla 1. Parámetros para el diseño de andamios para regeneración ósea.

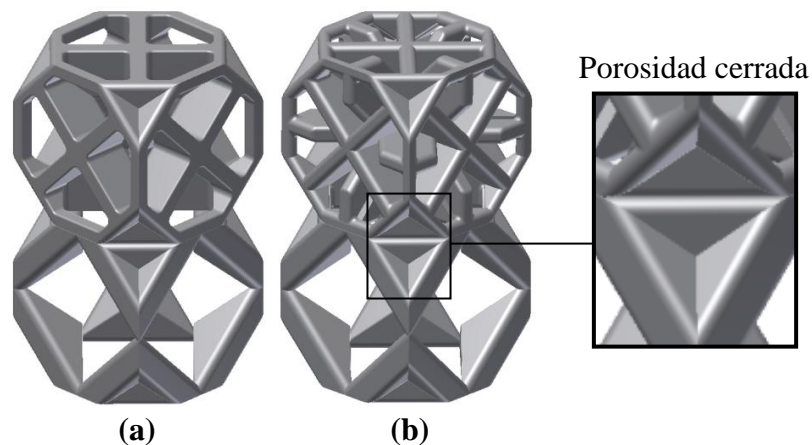
PROPIEDADES DEL TEJIDO ÓSEO TRABECULAR		REFERENCIAS
Tamaño de poro (μm)	100 - 350	[6]
Porosidad (%)	60 - 90	[6]
Ranuras (μm)	Ancho > 2 Profundidad > 0.5	[6]
Resistencia a la compresión (MPa)	4 -12	[7]

Definición de la geometría a analizar. Se estableció tomar en cuenta el enfoque *botton-up*, el cual consiste en diseñar el andamio desde la parte interna hasta la externa y así poder controlar la porosidad del soporte con precisión. Para esto, se definió el diseño de celdas unitarias, las mismas son pequeños modelos (microceldas) que al ser ensambladas conforman la macrogeometría del andamio.

Diseño y ensamble de las celdas unitarias. Se realizaron tres tipos de celdas unitarias conformadas por geometrías irregulares abiertas (Figura 1), es decir, con porosidad interna y externa que al ser ensambladas generan tanto porosidad abierta como cerrada (Fig. 2 b).

**Figura 1.** Celdas tipo I (a), II (b) y III (c) con 70%, 61% y 50% de porosidad, respectivamente.

Evaluación de propiedades mecánicas. Se realizaron ensayos de resistencia en compresión mediante *Autodesk Inventor*®, para observar su comportamiento y determinar si este será el adecuado ante la fuerza ejercida por las células osteoblásticas al adherirse a este tipo de estructura.

**Figura 2.** Sistema de celdas (a) I, II y (b) I, III.

2.2. Diseño computacional de los andamios

Se realizó el diseño computacional de celdas unitarias de acuerdo a lo establecido en el criterio anterior; como se describe a continuación:

Creación de bocetos 2D de las celdas. Se realizaron esbozos de las celdas unitarias, partiendo de un boceto en un plano de trabajo seleccionado. La relación entre ancho, largo y alto se mantuvo en un rango de 0.8 – 1 mm.

Creación de celdas 3D. Luego de verificar las medidas y finalizar el boceto bidimensional. A partir de la celda esbozada, se proyectaron determinadas áreas de la misma para conformar la arquitectura tridimensional; la altura de esta no fue superior a los 0.3 mm. Asimismo, se suavizaron aquellas aristas con ángulos rectos mediante técnicas de chaflán para simplificar el modelo, disminuir la capacidad computacional al ejecutar el análisis de compresión y reducir aquellas concentraciones de esfuerzos indeseadas.

2.3. Evaluación mecánica computacional

Material evaluado. En el ensayo computacional de compresión de los andamios, se hizo uso del polímero Poli ácido L-láctico (PLLA) como material de estudio, debido a que es un poliéster termoplástico y al ser un material semicristalino, posee una elevada resistencia mecánica. Además, es primordial determinar esta resistencia mecánica en la arquitectura diseñada, ya que en el proceso mecanobiológico son las señales mecánicas o bien llamadas biofísicas las que intervienen en la adhesión, regulación y remodelación del tejido óseo. A causa de ello y otras propiedades, el PLLA es muy utilizado en el campo de la bioingeniería y en muchas de las técnicas de prototipado rápido. Para el uso del mismo, se insertó como nuevo material en la biblioteca del *software* y se introdujeron todas las propiedades solicitadas, como densidad, límite elástico, resistencia máxima a la tracción, coeficiente de poisson, módulo de Young, entre otras.

Ensayo de resistencia mecánica computacional. Se aplicaron fuerzas uniformes de compresión de 0.008 N a 0.4 N, en el área superficial de las celdas y sus conjuntos; fijando la parte inferior y afinando el mallado para mejor exactitud de los resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Diseño

El diseño de cada celda, parte de un polígono de ocho vértices que actúa como tapa; al cual se le insertaron formas de tipo diamante entre 100 μm - 300 μm , con el objeto de representar las porosidades requeridas. El espesor de cada tapa es de 0.25 mm para crear una porosidad interna en la celda de 300 μm y de esta manera exista una mejor conexión entre las celdas y una mayor porosidad.

La porosidad es un factor que está estrechamente relacionado y es inversamente proporcional a la resistencia mecánica, propiedad esencial para la integridad del andamio durante su permanencia como soporte temporal a medida que los osteoblastos consolidan la matriz extracelular. Al medir la porosidad P de las celdas, mediante la diferencia de volúmenes, según

la Ec. 1, se obtuvo un valor de 70 % (Tabla 2) en la celda I, por lo que se decidió crear dos celdas adicionales con características similares y más cerradas que confiriesen mayor resistencia a la celda I, sin que esta dejase de poseer un alto porcentaje de poros al funcionar como binomio y a su vez, alcanzar mayor similitud a las características óseas.

$$p = \frac{\text{Vol}_{\text{sólido}} - \text{Vol}_{\text{hueco}}}{\text{Vol}_{\text{sólido}}} \times 100 \quad (1)$$

Por tal motivo, se realizaron tres clases de celdas unitarias porosas, una celda abierta para representar la capa trabecular (Fig. 1, a) y otras celdas “cerradas” que simulen al tejido cortical (Fig. 1 b, c). En ambas estructuras, se consideraron todas las propiedades que debe poseer el hueso trabecular, debido a que las células osteoblásticas requieren de estas para lograr una adecuada adherencia, proliferar, migrar y finalmente conformar la matriz extracelular.

Tabla 2.- Esfuerzos de compresión a 0.1 N y porosidades de cada celda.

Celdas	Esfuerzo de Von Mises (MPa)	Porosidad (%)
I	162.9	70
II	86.52	61
III	7.236	50
Sistema I, II	128.2	66
Sistema I, III	126.7	60

Cada una de las tres celdas presenta formas y tamaños de porosidad completamente distintos, lo que sugiere un comportamiento mecánico diferente. Al culminarlas, se procedió al ensamble por pares de las mismas, es decir, {I, II} y {I, III}, mostradas en la Fig. 2, para determinar si al unir un tipo de celda con una porosidad elevada junto con una de menor volumen de poros, fuese posible mejorar dos propiedades esenciales para la adhesión y proliferación celular ósea: el promedio de porcentaje de porosidad superior al 60% y la capacidad de soportar 12 MPa como mínimo de esfuerzo.

Seguido del ensamble y el reensamble, se determinó un análisis de compresión CAD para cada celda y sistemas de celdas a fin de comprobar lo mencionado y determinar su factibilidad como binomios en el andamio.

3.2. Análisis de compresión CAD

Celdas. En el ensayo mecánico de compresión efectuado en cada una de las celdas, se determinó que la más resistente fue la celda III con 50 % de porosidad. Para tener una idea de este resultado, se tomó como ejemplo el esfuerzo de cada una al ser sometida a la misma carga (Tabla 2), en este caso, tomando como referencia la carga de 0.1 N; mientras la celda III obtuvo un esfuerzo de 7.236 MPa, estando muy por debajo de la deformación elástica permanente del PLLA (60 MPa), las celdas I y II presentaron esfuerzos mayores de 162.9 MPa y 86.52 MPa, respectivamente. El comportamiento resultante en las dos últimas celdas era de esperarse, ya que estas presentan un volumen de porosidad mayor, la cual induce un cambio en el flujo de esfuerzos del diseño, reduciendo la resistencia de las celdas en aquellos poros con aristas angulosas y de mayor dimensión.

Sistema de celdas {I, II} y {I, III}. Al comparar los valores de esfuerzo de Von Mises de cada sistema con los de la celda I a una carga de 0.1 N, se observa que existe un decrecimiento en el esfuerzo de los mismos; esto implica que al unir dos tipos de celdas diferentes, se puede mantener un volumen de porosidad mayor al 60% y a su vez aumentar un 20% las propiedades de resistencia mecánica en compresión.

De acuerdo al análisis de tensión y a las características de las celdas II y III, y al estar ensambladas con la celda I, se determinó que el sistema I/II es el adecuado para conformar la macroestructura del andamio.

Los valores de carga permisible se encuentran por debajo de 0.01 N, a fin de que las estructuras posean un esfuerzo que se mantenga por debajo del límite de fluencia del PLLA, el cual es 60 MPa, y mantengan el diseño de la estructura antes de iniciarse el proceso de degradación del material y la proliferación y crecimiento de las células óseas.

4. CONCLUSIONES

- El sistema de celdas I/II obtuvo mejores resultados en cuanto a volumen de poro y resistencia mecánica. Por lo cual estas celdas serán utilizadas como la microarquitectura del andamio a realizarse. Las celdas tipo I, se concentrarán en la parte interna y las celdas tipo II, como una capa superficial externa.
- La carga permisible para este tipo de estructuras tridimensionales diseñadas, no debe superar los 0.01 N, debido a que la deformación elástica sería cada vez más elevada, causando distorsiones en el diseño que podrían llegar a ser plásticas, afectando el crecimiento de las células óseas a causa de la disminución en el tamaño de poros.

REFERENCIAS

- [1].Chen, Y., Zhou, S., Li, Q., Microstructure design of biodegradable scaffold and its effect on tissue regeneration. New South Wales, pp. 5003-5014, 2011.
- [2].Alvarez, J., Regeneración ósea a través de la ingeniería de tejidos: una introducción. Revista de Estudios Transdisciplinarios, vol. 1., pp. 98-10, 2009.
- [3].Ballini, A., Pappalettere, A., Tullo, C., Cantore, D., Desiate, S., Finite Element Method (FEM), Mechanobiology and Biomimetic Scaffolds in Bone Tissue Engineering. International Journal of Biological Sciences, Vol. 7., pp. 112-132, 2011.
- [4].Hollister, S. J., & Yu Lin, C., Computational design of tissue engineering scaffolds. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 196., pp. 2991–2998., 2007.
- [5].Zienkiewicz, O., The finite element method, third edition. England pp. 1-13, 2007.
- [6].Olivares, A., Evaluación computacional en andamios por prototipado rápido para la ingeniería de tejidos. España, pp. 6-72, 2011.
- [7].Stephen, C., & Stephen, B., Tissue Mechanics. New York: Springer Science, 2007.

MEASURING OCCLUSAL BITE FORCES WITH A FORCE SENSING RESISTOR

Bárbara Pérez

Augusto Vito

Iván Sánchez

barbmpg@gmail.com

augustovitof@gmail.com

ijsanche@ivic.gob.ve

Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Caracas 1020-A, Venezuela

Gladys Uzcátegui

Yomar González

gladys.uzcategui@inabio.edu.ve

yomar.gonzalez@inabio.edu.ve

Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela Av. Miguel Otero Silva, Sebucán, AP 1071, Caracas-Venezuela

Abstract. *Bite forces have been a subject of study for the last five decades, due to their relation with disfunctional habits that may cause dental and muscular pain, tooth wear, noise and limit the mouth opening span, with consequences on food ingest, face aesthetics and even the mood of people. Quantative determination of bite forces may help evaluate the effectiveness of dental treatments. In this work we show a device capable of measuring bite forces dynamically, based on a force sensing resistor jacketed with dental impression material.*

Keywords: occlusal forces, force sensor, dynamic measures

1. INTRODUCTION

Obtaining dynamical measurements of the bite force during human mastication is important because of the potential applications of the information obtained, which can be used to evaluate dental prosthetic treatments, and temporomandibular joint problems. Several approaches have been used to measure occlusal forces, with a wide range of cost, versatility and simplicity [1]–[5]. One of the key features of an occlusal force sensing device is a small size, so it can fit in

any of the different dentition zones, and minimizes the restriction to mandible motion. With the goal of having an economical, small sized transducer recent attempts have been done to use thin sheet force sensing resistors (FSR) to measure occlusal bite forces [6]–[8]. In this work we modify an initial proposal by Gutierrez et al. [9] who used a Flexiforce FSR embedded in a deformable casing of dental impression material as their sensing device. We change the hardware by introducing a power stage and including filters of higher order. We use a different calibration method and propose the introduction of an additional force concentrator on top of the sensing area of the FSR. We discuss on the practical issues observed during a pilot measurement session with five volunteers.

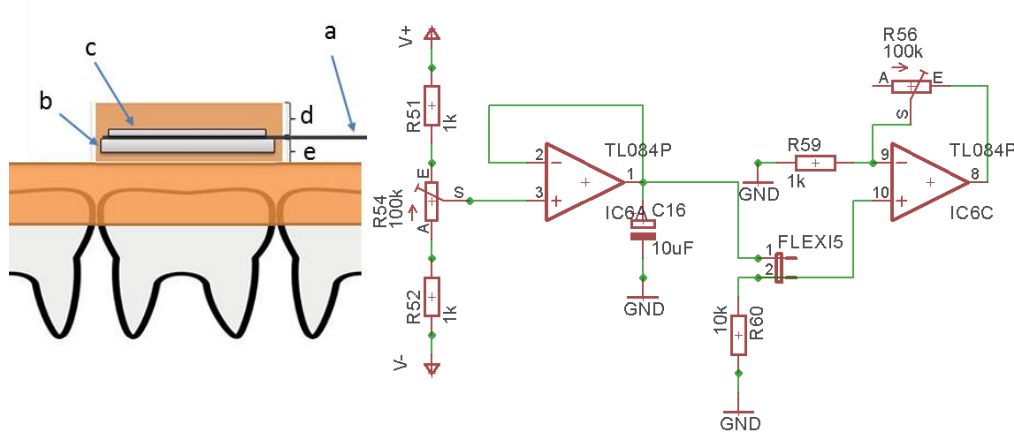


Figure 1 - *Left*: Sketch of the jacketed sensor configuration (see text for details).
Right: Transducing stage circuit diagram.

2. EXPERIMENTAL SETUP

We use a Flexiforce A201 sensor (by Tekscan). Our jacketed sensor configuration is depicted in Fig. 1 left: the FSR (a) rests on a rigid stainless steel plate (b) and has a stainless steel disc 9 mm in diameter (c) placed over its sensitive portion, to concentrate the load. The jacket is 3 mm thick above the sensor (d) and 2 mm thick below it (e). Calibration is performed using a custom built class 1 lever, using weights. In reference [9] calibration was done with instantaneous readings of the voltage for a given load. Instead, we calibrated using the average voltage measured during 90 seconds under a giving load, in order to evaluate the stability of the signal.

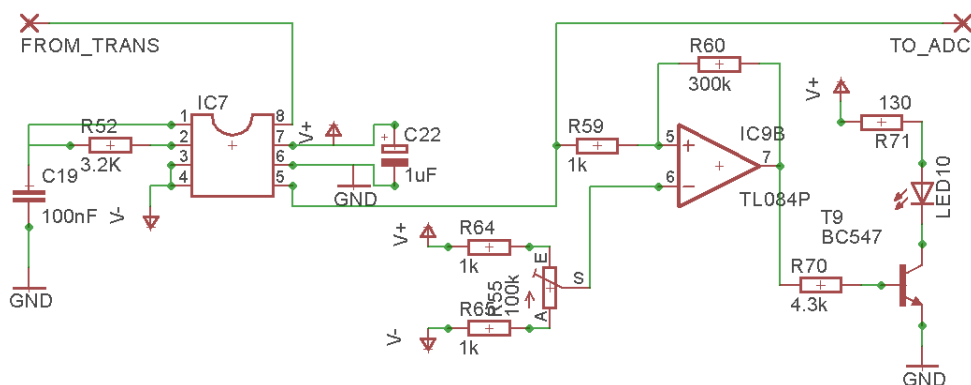


Figure 2 - Filtering stage circuit diagram.

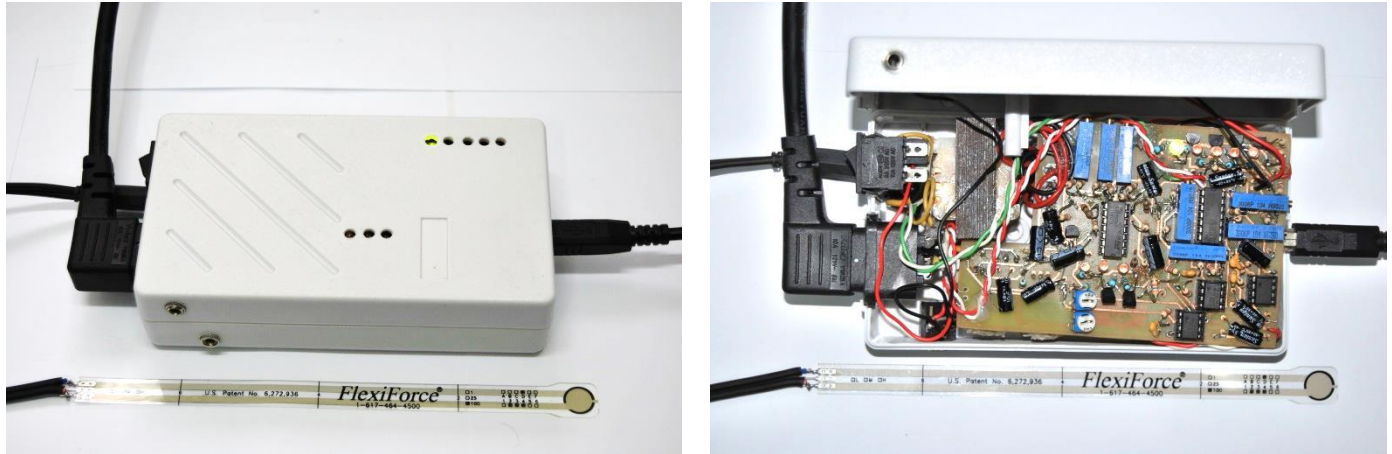


Figure 3 - Photographs of the box containing the circuitry, with the Flexiforce FSR as a size reference. *Left:* Closed box showing LED indicators, and input connectors used to connect the sensors. *Right:* opened box (the data acquisition board is placed below the circuit board shown).

Our measuring system consists of four blocks: power source, transducer stage, filtering stage and communications stage (this stage is performed by a NI USB-6009 acquisition board).

Power stage: Consists of a bridge rectifier, a pair of positive and negative voltage regulators and their associated passive components. The pair of voltage regulators creates a double supply from a single supply by means of two capacitors connected in series. The circuit contains a fuse as protection against overloads and a varistor to suppress high voltage transients that could come from the line, although it's recommended that for better performance the device is powered from a voltage regulator and kept away from nearby switching circuits.

Transducing stage: The buffer configuration opamp in Fig. 1 acts as voltage reference for the Flexiforce sensor, which varies its resistance according to the amount force applied to it. The Flexiforce is connected in a voltage divider configuration so when its resistance varies creates a voltage fluctuation at the non-inverting input of the IC6A opamp (see Fig. 1), which is used in a non-inverting amplifier configuration. The amount of gain is defined to get 4 V at peak force, and can be adjusted using the R56 potentiometer during the calibration process.

Filtering stage: This block consists of a TLC04 butterworth 4th order low pass filter with cutoff frequency at 37 Hz (IC7 in Fig. 2), and a led driver circuit which turns on a led (LED10 in Fig. 2) when a threshold voltage is detected by the opamp in Schmidt trigger configuration. This indicates the operator that the channel is operative and neither the filter nor the ADC fails.

All the circuitry of the above mentioned stages, together with the data acquisition board is contained inside a plastic case shown in Fig. 3.

Figure 4 illustrates the measurement process. In our particular case, the instruction given to each volunteer was to chew “as if they were chewing gum”, but trying to keep a mostly vertical motion, avoiding lateral motion that will induce shear stresses on the sensor. The main concern of the subjects was regarding the salivation induced by the presence of a foreign object. Obtaining the information of each volunteer took 10 minutes, performed by a single person. Of these 10 minutes, the actual time working with the volunteer is 2 minutes for impression taking and 1 minute to give instructions and take a reading.

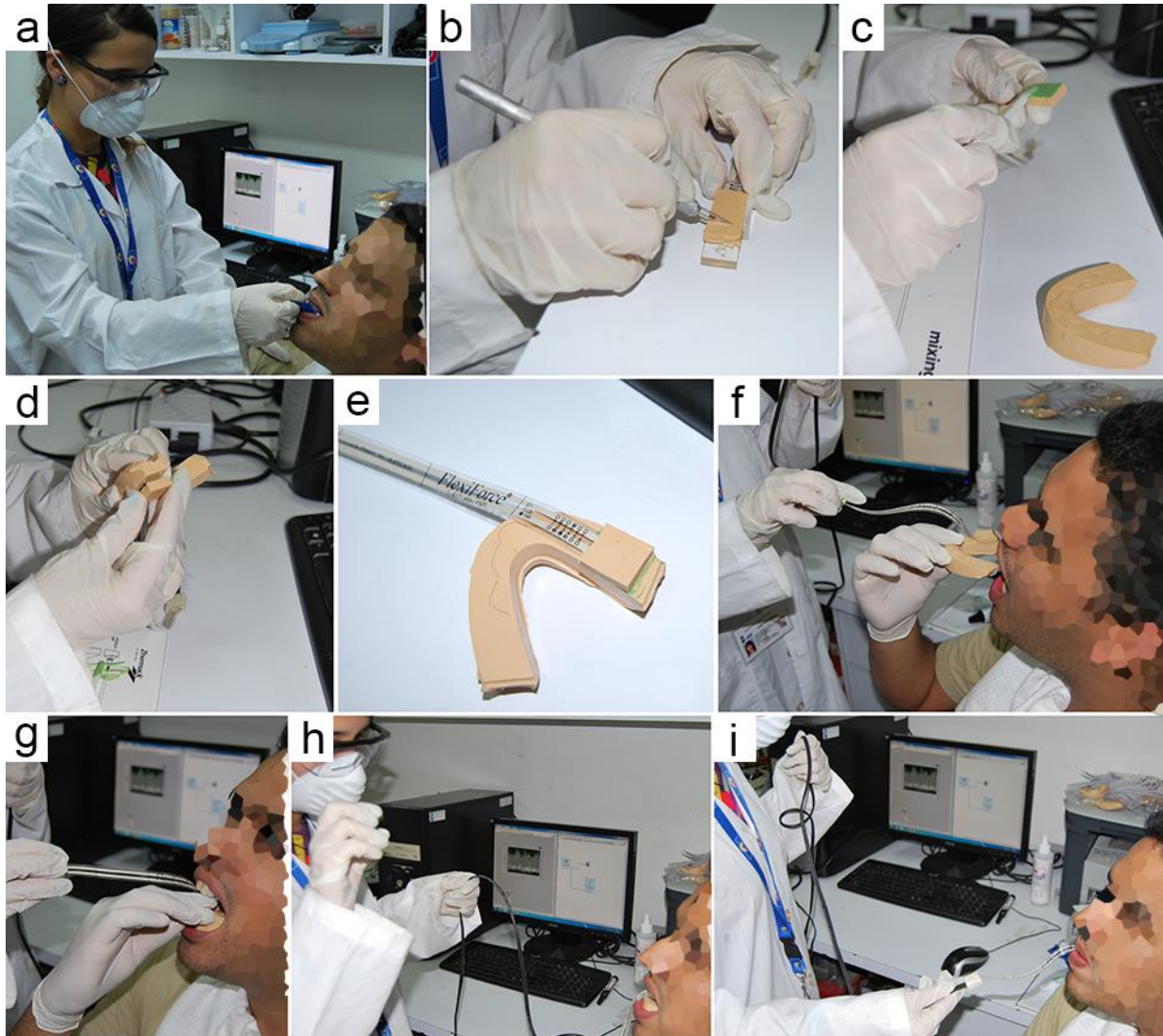


Figure 4 - Measurement sequence: a) an impression is taken of the subject's lower dentition. b) the sensor is covered with impression material, and cut to length c,d, e) the sensor jacket is glued to the impression f,g) the subject places the impression into his mouth h) final instructions are given before the actual recording i) during 30 s data is acquired.

3. RESULTS

Our first result is the lack of stability of the signal from the jacketed sensor observed for loads >100 N during calibration, when the original configuration of reference [9] was used. The plot at the left side of Fig. 5 shows how signals corresponding to loads > 100 N deviate from a plain horizontal behavior, an indication of a non-constant deformation of the FSR. Adding a second concentrator disc on top of the FSR was found to increase the stable zone at the cost of a small decrease of the sensibility. The plot at the right side of Fig. 5 shows how deviations from a plain horizontal behavior occur only for loads of 228 N and 280 N.

Our second result is the set of signals obtained from a pilot study on 5 volunteers, shown in figure 6. The magnitudes were below 500 N with a biting frequency between 1 and 2 Hz, both

within the ranges reported in the literature. It is worth noting that signal “d” is shifted vertically with respect to the rest, an effect associated with a residual deformation of the FSR. The latter indicates that the actual jacket configuration, still with 2 concentrator discs, may show residual deformations affecting the force readings.

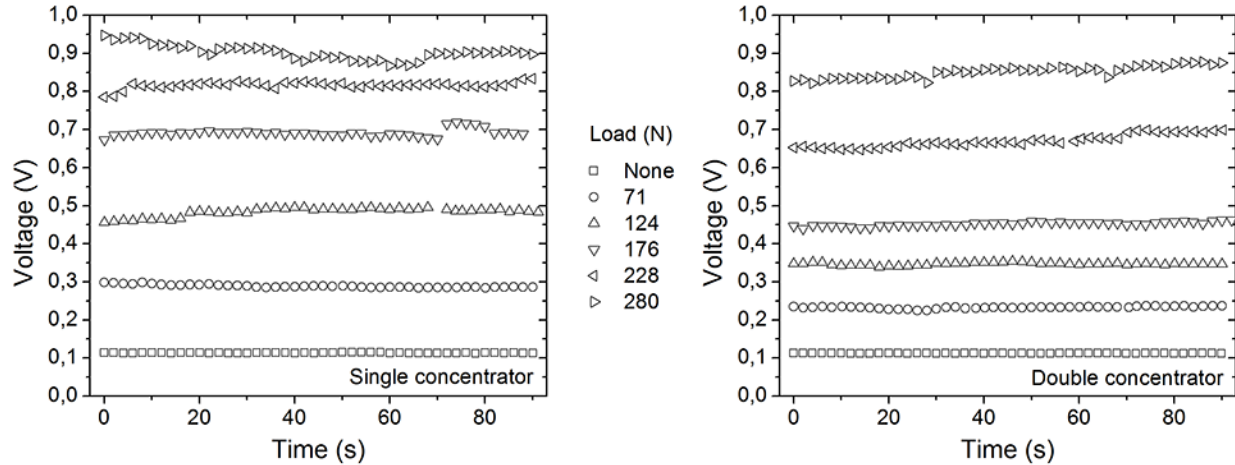


Figure 5 - Effect of the use of 1 or 2 concentrator discs (indicated an “a” in the diagram at the left side of Fig. 1) on the stability of the voltage signals for different loads during calibration.

4. CONCLUSIONS

We have presented an improved version of the measuring setup proposed in reference [9] to probe the temporal evolution of bite forces. With a different calibration method we were able to detect problems associated with plastic deformations of the jacket, and improved the design using a pair of concentrator discs on top of the FSR. A pilot test with 5 volunteers was performed in order to test the versatility of the system, and obtain feedback from the volunteers about their comfort during the measurement process. Measured force values were comparable to those reported previously, both in magnitude and frequency. The actual configuration is still vulnerable to plastic deformations of the jacket that may induce a shift in the response of the sensor. Future modifications should improve the mechanical properties of the jacket by using a more resistant material.

REFERENCES

- [1] C. N. J. Blamphin, T. R. Brafield, B. Jobbins, J. Fisher, C. J. Watson, and E. J. Redfern, “A simple instrument for the measurement of maximum occlusal force in human dentition,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, vol. 204, no. 2, pp. 129–131, 1990.
- [2] D. Tortopidis, M. F. Lyons, R. H. Baxendale, and W. H. Gilmour, “The variability of bite force measurement between sessions, in different positions within the dental arch.,” *J. Oral Rehabil.*, vol. 25, no. 9, pp. 681–6, Sep. 1998.
- [3] S. Braun, H. P. Bantleon, W. P. Hnat, J. W. Freudenthaler, M. R. Marcotte, and B. E. Johnson, “A study of bite force, part 1: Relationship to various physical characteristics.,” *The Angle orthodontist*, vol. 65, no. 5, pp. 367–72, Jan-1995.
- [4] D. Koc, A. Dogan, and B. Bek, “Bite force and influential factors on bite force measurements: a literature review.,” *Eur. J. Dent.*, vol. 4, no. 2, pp. 223–32, Apr. 2010.

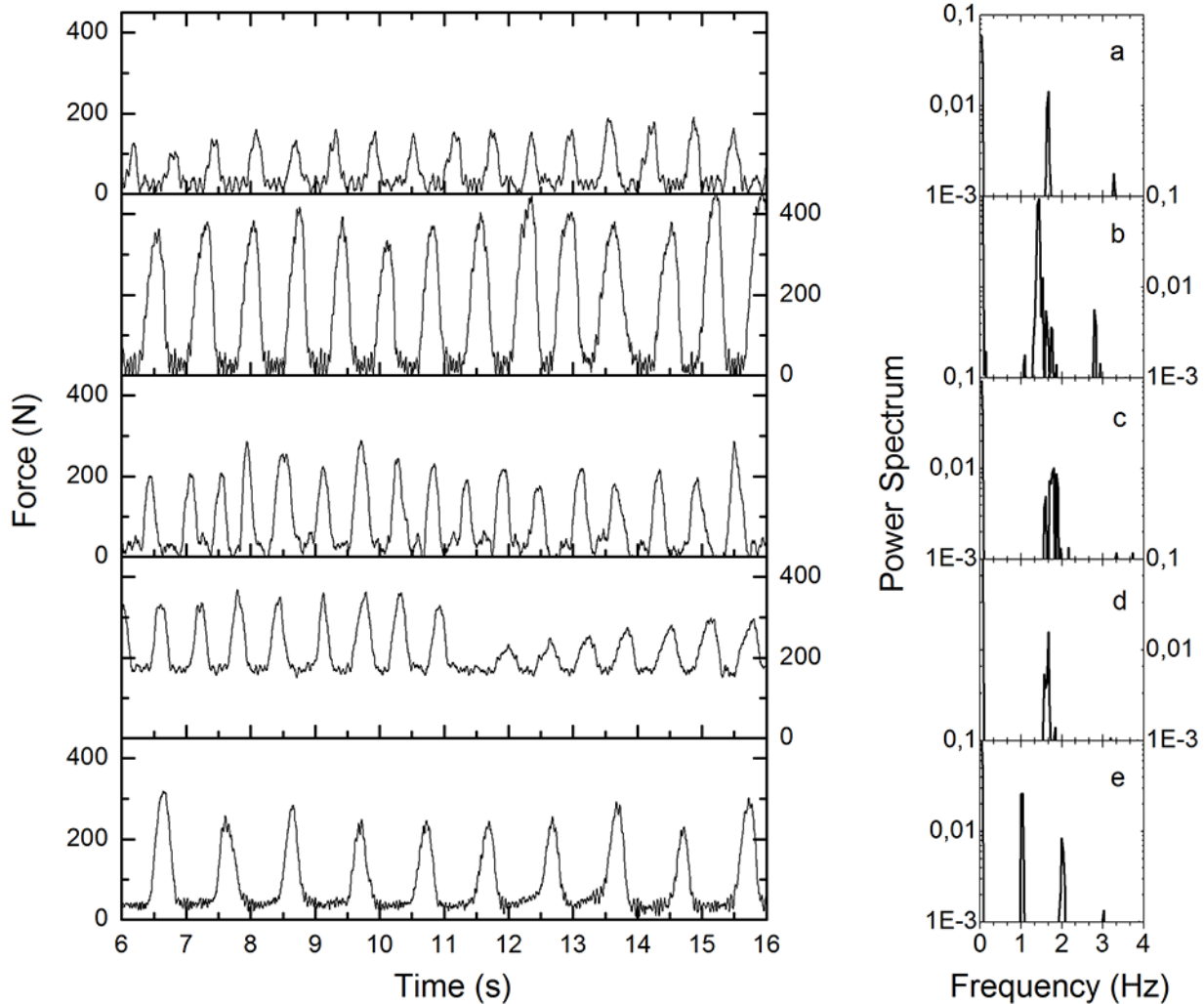


Figure 6 - *Left*: Example of five signals obtained from five volunteers. The total recording time was 30 s, only 10 s are shown for the sake of clarity. *Right*: Corresponding power spectrum of each signal showing first significant peaks.

- [5] E. M. Kogawa, P. S. Calderon, J. R. P. Lauris, C. R. P. Araujo, and P. C. R. Conti, "Evaluation of maximal bite force in temporomandibular disorders patients.," *J. Oral Rehabil.*, vol. 33, no. 8, pp. 559–65, Aug. 2006.
- [6] C. P. Fernandes, P. O. J. Glantz, S. a Svensson, and A. Bergmark, "A novel sensor for bite force determinations.," *Dent. Mater.*, vol. 19, no. 2, pp. 118–26, Mar. 2003.
- [7] P. W. Freeman and C. a. Lemen, "Measuring Bite Force in Small Mammals with a Piezo-resistive Sensor.," *J. Mammal.*, vol. 89, no. 2, pp. 513–517, Apr. 2008.
- [8] Y. Gonzalez, L. R. Iwasaki, W. D. McCall, R. Ohrbach, E. Lozier, and J. C. Nickel, "Reliability of electromyographic activity vs. bite-force from human masticatory muscles.," *Eur. J. Oral Sci.*, vol. 119, no. 3, pp. 219–24, Jun. 2011.
- [9] A. Gutierrez, I. Sánchez, G. Uzcátegui, and L. Fermín, "Diseño y construcción de dispositivo para medición dinámica de fuerzas oclusales dentales durante la masticación humana.," *Rev. la Fac. Ing. la UCV*, vol. In press, 2013.

COMPORTAMIENTO ELÁSTICO LINEAL DE UNA CAJA INTERSOMÁTICA TLIF ANTE LA APLICACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN POSTERIOR

Ana C. Vargas M.

Yomar González

ana.vargas@inabio.edu.ve

yomar.gonzalez@inabio.edu.ve

Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela

Sebucán, Caracas -Venezuela

Resumen: *La enfermedad degenerativa del disco intervertebral, es la principal causa del dolor lumbar crónico, el cual incapacita al paciente con dolor mecánico o recurrente teniendo este que requerir a una cirugía por artródesis en los discos afectados. El propósito principal de la colocación de cajas intersomáticas, es proporcionar un ambiente biomecánico adecuado para una artródesis exitosa, por lo tanto, se desarrollo un prototipo de caja de Fusión Intervertebral Lumbar Transforaminal (TLIF) que cumpla con los criterios médicos, resistencia mecánica y factibilidad de construcción. Se realizó el estudio del implante oseointegrado mediante simulaciones aplicando el método de elementos finitos, sometido a estados de carga estáticos, obteniendo así los valores de esfuerzos resultantes de la implantación de la caja intersomática, y la variación de dichos valores con la incorporación de un sistema de fijación posterior al segmento lumbar tratado, para un medio elástico en régimen lineal y homogéneo. Los resultados obtenidos indican que para las condiciones de contorno del modelo y las cargas establecidas, los esfuerzos no alcanzaron el límite elástico del material, por lo tanto el dispositivo no fallará; además con la incorporación de instrumentación posterior al segmento disminuyen los esfuerzos sobre la caja, hecho que proporciona una mayor estabilidad y soporte mecánico.*

Palabras Clave: Elementos Finitos, diseño concurrente, artrodesis, cajas intersomáticas.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de partes biomecánicas, contempla la sustitución total o parcial de algún componente corporal o función biológica, con el fin de conseguir una solución a los diferentes problemas que se presentan en el sistema óseo. La columna vertebral, puede verse afectada por la

Enfermedad Degenerativa del Disco (EDD), el tratamiento de la enfermedad discal por artrodesis intervertebral es la técnica con mayor aceptación, ya que permite una dicotomía con buenos resultados quirúrgicos.

Para el tratamiento por artrodesis intervertebral existen diversos modelos de implantes, con características variantes en cuanto a la geometría y material fabricado. Actualmente, se utilizan cajas intersomáticas de PEEK (Poli-Éter-Éter-Ketono), debido a sus excelentes propiedades mecánicas y biocompatibilidad. Por otra parte, las cajas intersomáticas deben condicionar un ambiente biomecánico óptimo para que se produzca la oseointegración, de este parámetro depende el éxito de la cirugía intersomática.

En este trabajo se plantea el estudio de la caja intersomática, a través de dos modelos biomecánicos con y sin instrumentación posterior.

2. OBJETIVO

Estimar los valores de tensiones bajo el efecto de cargas aplicadas, para analizar la respuesta mecánica del sistema, asumiendo un estudio estático lineal, considerando medio isotrópico y homogéneo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se modeló digitalmente dos cuerpos vertebrales (L4-5), la caja intersomática TLIF INABIO y el sistema de instrumentación posterior en la herramienta de diseño *Autodesk Inventor 2011*®. La representación vertebral se construyó con una capa de 1 mm de hueso cortical que contiene al hueso trabecular [1]. El sistema de instrumentación posterior representa un conjunto simplificado de tornillos y barras pediculares elaborados en Ti-6Al-4V. La geometría del implante intersomático simulado es semicircular, marcadores de titanio, tres agujeros para la colonización de células óseas y un sistema de retención acanalado ubicado en las caras superior e inferior del implante (Fig. 1)

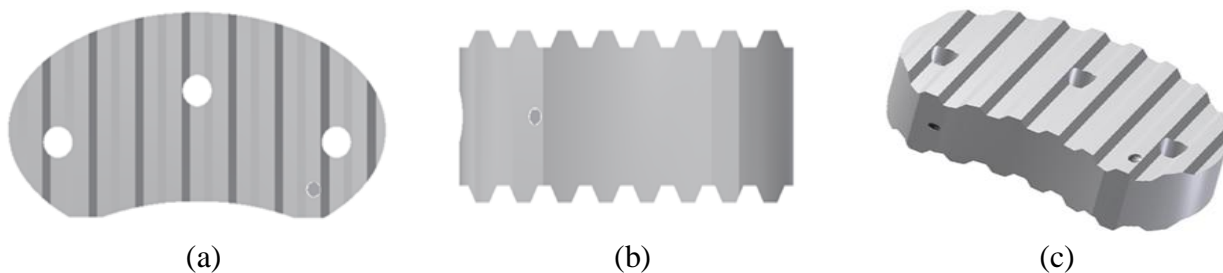


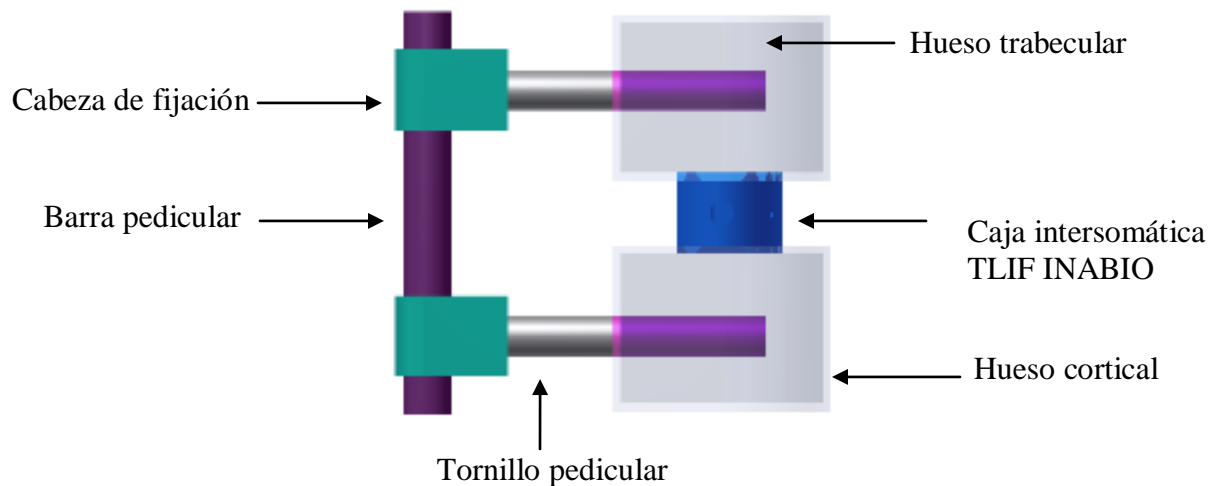
Figura 1- Caja intersomática TLIF INABIO. (a) Vista superior, (b) Vista frontal, (c) Vista isométrica

Se analizó la caja intersomática a través de dos modelos biomecánicos que se diferencian solo por la aplicación del sistema de instrumentación posterior. El ensamble de los modelos también fue elaborado en *Autodesk Inventor 2011*®. Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en los modelos biomecánicos se presentan en la Tabla 1. Todos los materiales en el modelo se consideraron isotrópicos, homogéneos y linealmente elásticos.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales a utilizar.

Materiales	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Referencias
PEEK	8000	0,3	Ensinger [2]
Hueso cortical	12000	0,3	Tsuang et al. [3]
Hueso trabecular	100	0,2	Tsuang et al. [3]
Ti-6Al-4V	113800	0,342	ASTM [4]

La instrumentación posterior con los cuerpos vertebrales se consideró completamente oseointegrada, sus componentes se consideraron enlazados. Además se consideró oseointegrada la caja intersomática con los cuerpos vertebrales. Se estableció la vértebra L5 como segmento fijo, restringiendo el desplazamiento en X, Y y Z. En la Figura 2, se muestran la disposición de las piezas en el modelo biomecánico con instrumentación posterior.

**Figura 2-** Ensamble de la caja intersomática, vértebras (L4-5), e instrumentación posterior

El método de elementos finitos, se utilizó para determinar y comparar la distribución de tensiones en la caja intersomática ante cinco estados de carga en simulaciones independientes asociadas al torso de un adulto normal. Las cargas que se aplicaron en la parte superior de la vértebra L4 para distribuir la fuerza en todo el sistema, estas se muestran en la (Tabla 2).

Tabla 2. Condiciones de carga para las simulaciones.

Casos	Composición de cargas	Referencias	
1	Compresión axial	400 N	
2	Compresión axial con rotación axial	400 N + 10 Nm	
3	Compresión axial con flexión lateral	400 N + 10 Nm	Tsuang et al. [3]
4	Compresión axial con flexión anterior	400 N + 10 Nm	
5	Compresión axial con flexión posterior	400 N + 10 Nm	

Se utilizó la herramienta Static Structural del programa *Ansys Workbench 2012®*, para el mallado y análisis de los modelos. Se obtuvo una gráfica de convergencia de malla a través del

estudio de sensibilidad ante tres puntos de control sobre la caja intersomática, ello indicó el mallado del modelo con un tamaño mínimo de elemento de 0,4 mm para la caja. Para el resto de los componentes se utilizó un tamaño de elemento de 1 mm ya que el objeto de estudio es la caja intersomática.

La caja intersomática, los marcadores de titanio, la representación vertebral y el sistema de fijación posterior, fueron discretizados con elementos finitos tetraédricos de diez nodos con tres grados de libertad.

4. RESULTADOS

Gracias al análisis de sensibilidad de malla, se obtuvo el mallado de los modelos con la cantidad de nodos y elementos presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Número total de nodos y elementos para los modelos de estudio

	Número total de nodos	Número total de elementos
Modelo sin instrumentación posterior	520526	358233
Modelo con instrumentación posterior	584687	393142

Los resultados de las simulaciones muestran las concentraciones de esfuerzos ante los estados de carga estudiados comparativamente con Tsuang et al [3], estos valores constituyen la Tabla 4, donde se puede apreciar la notable disminución de tensiones sobre la caja ante la incorporación de la instrumentación posterior al modelo, que a su vez muestra valores similares a los reportados por Tsuang et al [3].

Las tensiones se distribuyen a través del conjunto acanalado de la caja intersomática para ambos modelos siendo máximos sobre la caja sin instrumentación posterior. En el modelo con instrumentación posterior, las tensiones son máximas en los tornillos pediculares y cabezas de fijación.

Tabla 4. Tensiones registradas sobre la caja intersomática TLIF INABIO de modelos, en comparación a los registros de Tsuang et al., [3] sobre la caja de inserción oblicua con instrumentación posterior.

[*]	Tsuang et al., [4]	Modelo sin instrumentación posterior (MPa)	Modelo con instrumentación posterior (MPa)
CA	-----	108,45	75,1
RA	46,7	157,79	31,8
FL	52,5	270,86	50,2
FP	25,6	169,53	18,9
FA	66,7	330,01	52,9

[*] Estados de carga. CA: Compresión axial, RA: rotación axial, FL: flexión lateral, FP: flexión posterior, FA: flexión anterior.

Las Figuras 3 y 4, ilustran la distribución de tensiones de Von Mises sobre la caja intersomática TLIF INABIO.



Figura 3- Concentración de tensiones en la caja intersomática TLIF INABIO, del modelo sin instrumentación posterior ante compresión axial con flexión anterior

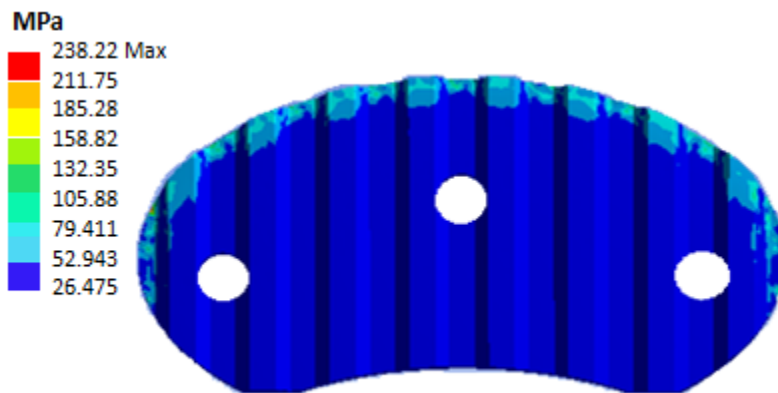


Figura 4- Concentración de tensiones en la caja intersomática TLIF INABIO, del modelo con instrumentación posterior ante compresión axial con flexión anterior

En el tejido óseo las tensiones registradas son bajas, estas, se concentran en la cortical ósea, en las regiones de contacto con la caja intersomática, lo cual coincide con lo publicado por Fantigrossi et al. [5-6], quienes refieren que la disipación de estos esfuerzos en la cortical, se restringe al área inmediata que rodea el implante debido a su resistencia a la deformación.

5. CONCLUSIONES

El método de elementos finitos, es una herramienta indispensable para determinar los campos de tensiones y desplazamientos y es ampliamente adoptado para el estudio de la biomecánica de la fusión espinal, porque este tipo de análisis, es capaz de proporcionar información que no se podía medir en los estudios experimentales, tales como el estrés local y los valores de tensión. El análisis de modelos de elementos finitos, evitan la fabricación de prototipos que puedan terminar en fracaso durante ensayos *in vitro* o *in vivo*.

Para las condiciones establecidas y los estados de carga estudiados en los modelos, las tensiones registradas no alcanzaron el límite elástico de los materiales, lo cual contribuye a inferir que la caja intersomática no fallará ni tendrá deformaciones permanentes. Por otra parte, dada la notoria disminución de tensiones sobre la caja ante la implementación de la instrumentación posterior, se considera fundamental en la estabilización y distribución de tensiones en el rasquis; sin embargo, es preciso desarrollar estudios computacionales para evaluar el comportamiento del tejido óseo ante la inserción de la caja.

REFERENCIAS

- [1]. Adam, C., Pearcy, M., y McCombe, P. Strees analysis of interbody fusion – finite element modeling of intervertebral implant and vertebral body. *Clinical Biomechanics*, 18:265-272, 2003.
- [2]. Ensinger. TECAPEEK GF30. Alemania, 2013.
- [3]. Tsuang, Y.H., Chiang, Y. F., Hung, C.Y., Wei, H. W., Huang, C. H., Cheng, C. K.,. Comparison of cage application modality in posterior lumbar interbody fusion with posterior instrumentation- a finite element study. *Medical Engineering & Physics*. 31:565-570,2009.
- [4]. ASTM F67-00. Standard Specification for Unalloyed Titanium for Surgical Implant Applications (UNS R50250, UNS R50400, UNS R50550, UNS R50700). *ASTM International*, 2013.
- [5]. Fantigrossi, A., Galbusera, F., Raimondi, M. T., Sassi, M., Fornari, M., Biomechanical analysis of cages for posterior lumbar interbody fusion. *Medical Engineering & Physics*. (29):101-109, 2007.
- [6]. Chen, S., Tai, C., Lin, P., Chen, W. Biomechanical comparison of a new stand-alone anterior interbody fusion cage with established fixation techniques – a three-dimensional finite element analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 9-88:1471-2474, 2008.

EVALUACIÓN NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS DE LA REDISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PLANTARES EN PLANTILLAS PARA CALZADO DE PACIENTES CON PIE DIABÉTICO

Mariangel Berroterán

Orlando Pelliccioni

marivbe@gmail.com

orlandop@usb.ve

Grupo de Biomecánica. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar.

Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela

María Virginia Candal

mcandal@usb.ve

Grupo de Polímeros. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar.

Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela

Resumen. *La diabetes mellitus (DM) comprende un grupo de trastornos metabólicos que provocan alteraciones fisiopatológicas secundarias, entre las que se cuentan pérdida de sensibilidad o aparición de úlceras en las extremidades inferiores. Esta aparición está estrechamente relacionada con una distribución anormal o deficiente de la carga y presión generada por el peso del individuo. Se sugiere que estas afectaciones del pie pueden aliviarse mediante el ajuste adecuado de una plantilla, logrando aliviar la presión plantar máxima. De allí que el objetivo principal de este trabajo fue realizar un análisis estático para dos modelos de plantillas, una plana y otra con espesor variable a lo largo de toda la superficie plantar, usando espumas de polímeros de Etilén-vinil-acetato (EVA), Poliuretano (PU) y Polietileno (PE) con el fin de comparar estos resultados y analizar el alivio de las presiones plantares obtenidas con cada uno de ellos. De acuerdo a los resultados, se observó que los parámetros del material como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, así como el espesor de la plantilla, influyen significativamente en la respuesta de la misma, pudiendo manipularse para lograr disminuir los esfuerzos. Cualquiera de las espumas planteadas podría, en principio, utilizarse para esta aplicación; sin embargo, se deben profundizar los estudios del comportamiento del material considerando la no linealidad de los polímeros y la respuesta ante cargas dinámicas.*

Keywords: plantilla para calzado, pie diabético, presión plantar, espumas.

1. INTRODUCCIÓN

Alrededor del 50% de los pacientes que sufren DM, pierden la sensibilidad plantar, lo que conlleva a lesiones en estas zonas ocasionando úlceras que, según Paton *et al.* [1], en altos porcentajes de la población diabética, culmina en la necesidad de amputar la extremidad. Por ello es necesario disminuir las presiones sobre la superficie plantar. Actualmente, muchas de las órtesis comúnmente usadas por pacientes diabéticos están fabricadas con materiales suaves y que sólo ofrecen acolchonar la planta del pie, dejando atrás otras necesidades. Trabajos como los de Kato *et al.* [2]] y Bus *et al.* [[3] refieren que las plantillas hechas a la medida exacta del pie buscan redistribuir la carga y a su vez la presión causada por esta en áreas como el talón y las cabezas metatarsianas. Lemmon *et al.* [4] presentan en sus revisiones que las plantillas terapéuticas han mejorado sus diseños gracias a investigaciones desarrolladas sobre el uso de materiales y a la posibilidad de medir las presiones que se generan en la planta de los pies, con lo cual es posible, incluso, personalizar los diseños de plantillas para cada paciente. Chen *et al.* [5], por su parte, reportan estudios utilizando diversos materiales, donde la flexibilidad es uno de los parámetros que más se toma en cuenta. Asimismo, se ha evaluado la variación de espesores de las plantillas para determinar la influencia que tiene sobre la distribución de las presiones plantares.

En el presente trabajo, se evalúan tres materiales, particularmente espumas poliméricas de EVA, PU y PE, para una plantilla plana y otra con espesor variable a lo largo de toda la superficie plantar, enfocándose en la zona de talón, arco plantar interno y la bóveda plantar. Se busca comparar los materiales y la forma de la plantilla en la redistribución de las cargas plantares mediante el método de elementos finitos (MEF) utilizando la herramienta comercial *SolidWorks*[®] *Simulation 2012-2013*.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Construcción de la geometría

Los modelos de plantillas fueron realizados utilizando el módulo de CAD de *SolidWorks*[®] siguiendo como patrón el modelo planteado por Bus *et al.* [3]:

- a) Primer modelo de estudio (GEOM1): se construyó a partir de un plano extruido con 3 mm de espesor. Su contorno geométrico fue tomado a partir de una horma comercial de almohadillas de descanso para calzado cerrado que se ajusta a la horma de pie reportada por Cheung & Zhang [6].
- b) Segundo modelo de estudio (GEOM2): se generó a partir de la plantilla plana y fue modificado con espesor variable (Fig. 1c), aumentando específicamente en el talón, arco plantar interno y bóveda plantar hasta niveles similares a los de algunas plantillas ortopédicas comerciales.

Posteriormente, en ambos modelos se dividió su extensión superficial en las regiones reportadas por Bus *et al.* [3] (Fig. 1a), con la finalidad de distribuir los valores de la presión plantar conocidas sobre los modelos en estudio (Fig. 1b).

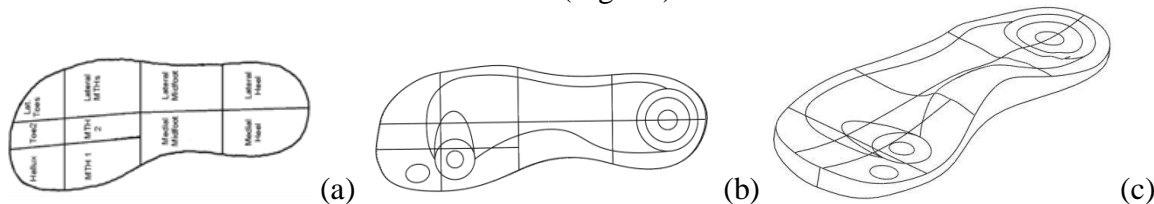


Figura 1- (a) Regiones definidas por Bus *et al.* [3] sobre la plantilla, (b) Zonas delimitadas en los modelos CAD en estudio y c) Modelo en estudio con espesores variables (GEOM2).

2.2 Modelo numérico

Las simulaciones realizadas para cada plantilla se basaron en la teoría de elasticidad, regida por la Ley de Hook, para materiales homogéneos, isotrópicos y lineales. Estas suposiciones representan simplificaciones notables comparadas con los escenarios reales, como por ejemplo, la viscoelasticidad que caracteriza a los polímeros, y en especial a las resinas espumadas. Sin embargo, el presente estudio se limitará a la región lineal del rango elástico del material como una fase preliminar de evaluación. En este sentido, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson fueron los parámetros más importantes considerados.

Materiales: La investigación realizada sobre los distintos tipos de materiales que pueden ser usados para esta aplicación, conllevaron a la selección de tres espumas poliméricas: EVA, PU y PE. En la Tabla 1 se listan las propiedades de las resinas seleccionadas.

También se realizaron estudios de diseño (optimización) donde se evaluaron diferentes valores de módulo de Young (E) y de coeficiente de Poisson (ν) para los distintos materiales, con la finalidad de determinar la influencia de estos parámetros en el comportamiento final de la plantilla. Igualmente, se realizó un estudio de la influencia del espesor de la geometría con espesor constante (GEOM1), sobre los esfuerzos y los desplazamientos máximos, evaluando valores de 3,8 hasta 7,8 mm.

Cargas y restricciones: La distribución de cargas a las cuales se sometieron las plantillas, fueron las presiones definidas por Cheung & Zhang [6], basadas en una persona de 174 cm de altura y 75 Kg, siendo las mayores presiones las ubicadas en el talón y la zona metatarsiana. Las plantillas se restringieron completamente en la parte inferior dando apoyo fijo.

Detalles del modelo numérico: Como refiere la guía técnica de la herramienta comercial Solidworks [9], cada geometría fue mallada con elementos sólidos, tetraédricos parabólicos, con cuatro puntos jacobianos, favoreciendo su adaptación a la curvatura de los modelos. El estudio de convergencia ajustó la malla para la plantilla plana (GEOM1) a 5389 elementos, mientras que el modelo de espesor variable (GEOM2) terminó con 15177 elementos.

Tabla 1. Propiedades de las espumas poliméricas utilizadas en las plantillas.

Material	E (MPa)	Sy (MPa)	ν	ρ (Kg/m ³)
EVA [3],[4]	0,65	1,20	0,10	100
PU [7]	4,53	0,22	0,32	62
PE [8]	200,00	8,00	0,20	450

3. RESULTADOS

Las primeras simulaciones realizadas, utilizando las propiedades de los materiales listadas en la Tabla 1, arrojaron como resultado que, para ambos casos de plantillas, cualquiera de las tres espumas puede ser utilizada, ya que el límite de fluencia no se sobrepasa en ningún caso. Además, se cumple también que en la plantilla plana los esfuerzos resultantes (σ_{\max}) debido a las presiones sobre la superficie son mayores que los obtenidos en las plantillas de espesor variable, lo cual corrobora los resultados experimentales observados por Cheung & Zhang [6]. Esto puede observarse en la Tabla 2. Por otro lado, se cumple también que las deformaciones (d_{\max})

Tabla 2. Esfuerzos y desplazamientos máximos obtenidos con las tres espumas estudiadas.

Material	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)		$d_{\text{máx}}$ (mm)	
	GEOM1	GEOM2	GEOM1	GEOM2
EVA	0,195	0,164	0,737	1,986
PU	0,122	0,111	0,086	0,279
PE	0,166	0,145	0,002	0,006

disminuyen notablemente a medida que aumenta el módulo de elasticidad del material, correspondiendo con las bases teóricas de la elasticidad lineal. De esta manera, se evidencia que a medida que aumenta la superficie de contacto en la plantilla, tal como sucede con el modelo GEOM2, las presiones se distribuyen más equitativamente logrando que los esfuerzos sobre la planta del pie se reduzcan.

En la Figura 2 se observan las zonas donde se encontraron los mayores valores de esfuerzos, y dichos resultados concuerdan con los obtenidos en investigaciones previas por Kato *et al.* [2]] y Cheung & Zhang [[6], siendo el talón y la región metatarsal las zonas más afectadas. Además, se observa que la distribución de los esfuerzos es mucho mejor en la plantilla GEOM2 (Fig. 2b), contribuyendo con un comportamiento más beneficioso para el paciente y disminuyendo el riesgo de formación de úlceras en la zona metatarsal.

En cuanto a los desplazamientos, se observa que la plantilla GEOM2 presenta los máximos valores en la región del arco plantar interno, lo que viene dado por la posibilidad de distribuir las cargas plantares en toda el área (Fig. 3b); mientras que en la plantilla GEOM1 el máximo se ubica en istmo (Fig. 3a), lo cual puede ocasionar deformaciones indeseadas en la plantilla que, con el tiempo, pueden afectar las distribuciones de las presiones plantares y aumentar aún más los esfuerzos.

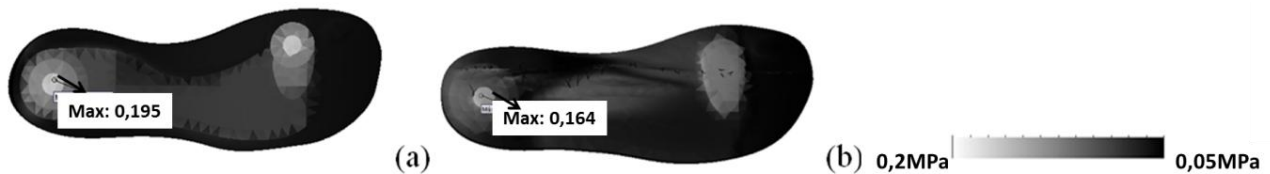


Figura 2- Distribución de esfuerzo de Von Mises en las plantillas (a) GEOM1 y (b) GEOM2.

3.1 Estudios de diseño

Para cada una de las espumas se consideró modificar las variables del módulo de Young y del coeficiente de Poisson, debido a que para el mismo tipo de espuma se pueden obtener diferentes comportamientos en cuanto a flexibilidad, y para ello se empleó un estudio de diseño/optimización con la herramienta que brinda *SolidWorks Simulation*[®]. Como restricción, se evaluaron los esfuerzos y los desplazamientos máximos por ser los resultados de mayor interés en esta aplicación. Dichos estudios reflejaron que, al mantener constante el coeficiente de Poisson y variar el módulo de Young, los esfuerzos en las plantillas permanecen constantes mientras que el desplazamiento disminuye en la medida que el módulo de Young aumenta, debido a la mayor rigidez de la espuma de la plantilla. Este comportamiento se repite para los tres materiales estudiados. En la Figura 4a se grafican dichos resultados. Por el contrario, cuando el coeficiente

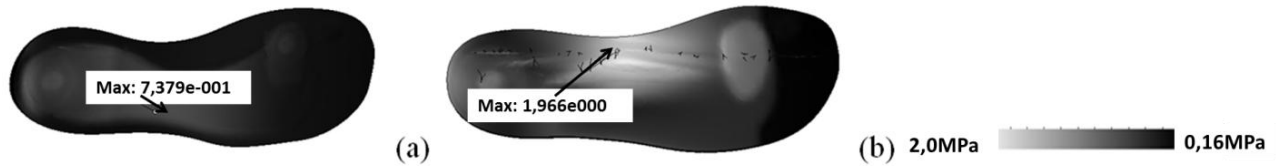


Figura 3- Distribución de desplazamientos (u_{res}) en las plantillas (a) GEOM1 y (b) GEOM2.

de Poisson se incrementa y se mantiene el módulo de Young constante, los esfuerzos se reducen debido a que el material permite menos deformación. Esto se refleja en las gráficas mostradas en la Figura 4b. Tanto para las plantillas planas como para las de espesor variable, el comportamiento es el mismo. Sin embargo, siempre se mantiene que las de espesor variable brindan una mejor respuesta.

En cuanto al estudio de diseño correspondiente a la variación del espesor de la plantilla plana, se obtuvo que los esfuerzos máximos disminuyen a medida que el espesor aumenta. Esto concuerda con las observaciones experimentales que obtuvieron Goske *et al.* [10] al medir los picos de presiones plantares en diferentes tipos de plantillas. En la Figura 4c se muestra la gráfica obtenida con dicho comportamiento, el cual fue estudiado utilizando la espuma de EVA como material para la plantilla. Este resultado debe ser analizado con mayor profundidad ya que, de acuerdo a los valores obtenidos para los esfuerzos, el cambio no parece ser significativo, siendo aproximadamente 1 % la disminución del esfuerzo máximo al variar el espesor; mientras que al cambiar el material y considerar propiedades físicas como el módulo de Young o el coeficiente de Poisson, esta disminución puede alcanzar hasta un 40 %, de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación.

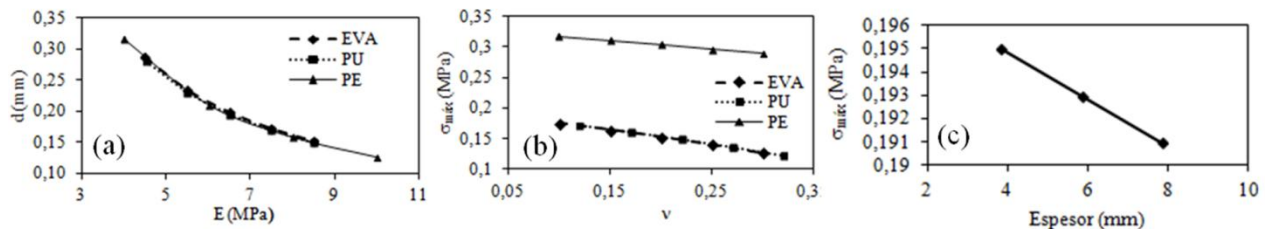


Figura 4- Resultados en plantillas personalizadas de (a) desplazamientos en función al módulo de Young, utilizando espumas de EVA ($E \cdot 10^{-1}$, $d \cdot 10^1$), PU ($E \cdot 10^0$, $d \cdot 10^0$) y PE ($E \cdot 10^2$, $d \cdot 10^{-3}$); y variación del esfuerzo máximo en función de (b) el coeficiente de Poisson y (c) el espesor (EVA).

4. CONCLUSIONES

El uso de plantillas con espesor variable contribuye significativamente a la reducción de los esfuerzos en el pie debido a las presiones plantares, respecto a las plantillas planas. Las espumas poliméricas se consideran buenas opciones para esta aplicación, pero es necesario saber que ciertos parámetros del material, como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, influyen en la respuesta final de la pieza. De los tres materiales estudiados, la espuma de PU podría considerarse como la mejor opción debido a que muestra los menores esfuerzos y su rigidez permite que los desplazamientos sean muy pequeños. Sin embargo, se recomienda ampliar este estudio a casos dinámicos donde se evalúe la respuesta a fatiga de dichos materiales bajo esta aplicación. Por otro lado, el espesor de la plantilla puede influir en la respuesta del material ante

las presiones, pero de manera menos significativa que la influencia ejercida por los parámetros del material utilizado.

Cabe destacar que, debido a la herramienta computacional utilizada, los resultados obtenidos se limitan a mostrar sólo una aproximación del comportamiento del material, por lo que en posteriores investigaciones se buscará incluir el estudio del rango no lineal que experimentan cada uno de estos materiales y determinar su influencia en la respuesta ante las cargas aplicadas.

REFERENCIAS

- [1]. Paton, J., Bruce, G., Jones, R. & Stenhouse, E., Effectiveness of insoles used for the prevention of ulceration in the neuropathic diabetic foot: a systematic review, *Journal of Diabetes and its Complications*, vol. 25 no.1, pp. 52-62, 2011.
- [2]. Kato, H., Takada, T., Kawamura, T., Hotta, N. & Torii, S., The reduction and redistribution of plantar pressures using foot orthoses in diabetic patients, *Diabetes Research and Clinical Practice*, vol. 31 no.1-3, pp. 115-118, 1996.
- [3]. Bus, S.A., Ulbrecht, J.S. & Cavanagh, P.R., Pressure relief and load redistribution by custom-made insoles in diabetic patients with neuropathy and foot deformity, *Clinical Biomechanics*, vol. 19 no.6, pp. 629-638, 2004.
- [4]. Lemmon, D., Shiang, T.Y., Hashmi, A., Ulbrecht, J.S. & Cavanagh, P.R., The effect of insoles in therapeutic footwear-a finite element approach, *Journal of Biomechanics*, vol. 30 no.6, pp. 615-620, 1997.
- [5]. Chen, W.P., Ju, C.W. & Tang, F.T., Effects of total contact insoles on the plantar stress redistribution: a finite element analysis. *Clinical Biomechanics*, vol.18 no.6, S17-S24, 2003.
- [6]. Cheung, J.T. & Zhang, M. A 3-dimensional finite element model of the human foot and ankle for insole design. *Archives of Physics Medicine and Rehabilitation*, vol. 86 no.2, p.353-358, 2005.
- [7]. Witkiewicz, W. & Zielinski, A., Properties of the polyurethane light foams, *Advances in Materials Science*, vol. 6, n. 2, pp. 35-51, 2006.
- [8]. Zhang, Y., Rodriguez, D. & Ait-Kadi, A., High Density Polyethylene Foams. III. Tensile Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 90 no. 8, pp. 2130-2138, 2003.
- [9]. *Ayuda de SolidWorks*. Disponible en: help.solidworks.com. Fecha de consulta: Noviembre 2013.
- [10]. Goske, S., Erdemir, A., Petre, M., Budhbhatti, S. & Cavanagh, P., Reduction of plantar heel pressures: insole design using finite element analysis, *Journal of Biomechanics*, vol. 39 no. 13, pp. 2363-2370, 2006.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ DEL TÍMPANO SOBRE LA GANANCIA DE PRESIÓN EN EL OÍDO MEDIO HUMANO

Caminos Luis

lcaminos@unet.edu.ve

Departamento de Ing. Mecánica, Universidad Nacional Experimental del Táchira. Avenida Universidad, Sector Paramillo. San Cristóbal, Venezuela.

Garcia-Gonzalez Antonio

tolino@gmail.com

Gonzalez-Herrera Antonio

agonzalezh@uma.es

Departamento de Ing. Civil, Materiales y Fabricación, Universidad de Málaga. Escuela de Ingenierías. C/ Doctor Ortiz Ramos, s/n. Campus de Teatinos. CP: 29071, Málaga, España.

Resumen. *La ganancia de presión del oído medio (GME siglas en ingles), se define como la relación entre la presión del líquido contenido en la escala vestibular de la cóclea (P_V), cerca de la ventana oval y la presión del aire en el canal externo (P_{EC}), medida sobre la superficie de la membrana timpánica. Este parámetro medido en dB, es un indicativo de la eficiencia del oído medio para reducir las diferencias de impedancias entre el aire del canal auditivo y el líquido de la cóclea. En esta investigación se calcula la ganancia de presión de oído medio humano, a través de un modelo numérico, que incluye la membrana timpánica, cadena osicular, ligamentos y tendones que sirven de soporte a la cadena. Un análisis armónico es hecho sobre la base del método de los elementos finitos, considerando el efecto de una onda de presión de 80 dB_{SPL} actuando sobre la cara externa del tímpano. La presión en la entrada de la cóclea se calculó para un rango de frecuencias entre 100 y 10000 Hz. Los resultados indican que los efectos del incremento de la rigidez de la membrana timpánica, sobre la ganancia de presión son dependientes de la frecuencia y estos pueden ser causa de hipoacusia en baja frecuencia, como consecuencia de cambios en las características del tejido del tímpano relacionados con la edad y otras patologías.*

Palabras claves: Oído medio, Ganancia de presión, Elementos finitos, hipoacusia

1. INTRODUCCIÓN

La mecánica del oído medio humano se centra en los principios de la transmisión de sonido desde el tímpano hasta la ventana oval, que es la puerta de entrada a la cóclea (oído interno). Este estudio abarca lo relacionado a la transformación de la energía sonora implícita en las ondas de sonido, en energía mecánica vibratoria que genera el movimiento del tímpano y la posterior transmisión de la vibración a la cadena osicular hasta la ventana oval.

El estudio y comprensión del comportamiento del oído medio, contribuye al diseño y mejoramiento de prótesis auditivas, así como a la actualización de protocolos quirúrgicos para ayudar a pacientes con algún tipo de patología que les genera deficiencia auditiva (hipoacusia).

La ganancia de presión del oído medio (*GME* siglas en inglés), según [1] se define como la relación entre la presión del líquido contenido en la escala vestibular de la cóclea (P_V), cerca de la ventana oval y la presión del aire en el canal externo (P_{EC}), medida sobre la superficie de la membrana timpánica. Este parámetro cuantificado en dB, es un indicativo de la eficiencia del oído medio para reducir las diferencias de impedancias entre el aire del canal auditivo y el líquido de la cóclea.

En la actualidad el uso del método de los elementos finitos (MEF), representa una poderosa herramienta en la simulación del comportamiento del sistema auditivo humano, sin embargo uno de las mayores inconvenientes que se presentan en estos modelos es la incertidumbre que existe con los valores de las propiedades mecánicas de los materiales biológicos que componen estos sistemas.

La no unificación de técnicas y procedimientos en las mediciones experimentales de las propiedades mecánicas así como la posible variabilidad de estos valores debido a factores como la edad, raza, sexo entre otras, hace difícil la estimación adecuada en los modelos.

Algunos autores señalan importantes cambios de la rigidez de la membrana timpánica con la edad [2], con lo cual la *GME* se afecta directamente por el predominio del tímpano sobre la respuesta dinámica del sistema.

Esta investigación tiene como objetivo, estudiar la influencia del incremento de la rigidez del tímpano, sobre la *GME* y su posible relación con alguna patología. Para tal fin se emplea un modelo 3D del oído medio humano, realizado por [3], al cual se le hace un análisis armónico sobre la base del MEF, con una onda de presión de sonido de amplitud fija equivalente a 80 dB_{SPL}, en un rango de frecuencias entre 100 Hz y 10000 Hz.

2. METODOLOGÍA

La Figura 1a muestra el modelo en elementos finitos que se usa en esta investigación señalando sus partes componentes. La disposición espacial corresponde a un oído derecho humano cuyas dimensiones y formas se encuentran dentro de los rangos normales según [4]. La geometría se construyó usando herramientas CAD, a partir de información anatómica tomada de la literatura. Los detalles acerca de la elaboración del modelo y propiedades mecánicas de los materiales componentes se muestran en [5].

La carga del líquido de la cóclea (Figura 1b), se consideró como un modelo mecánico-acústico equivalente (masa-amortiguador) [6], considerando una impedancia acústica media de 20 GΩ en la entrada de la cóclea, de acuerdo a las mediciones hechas por [1].

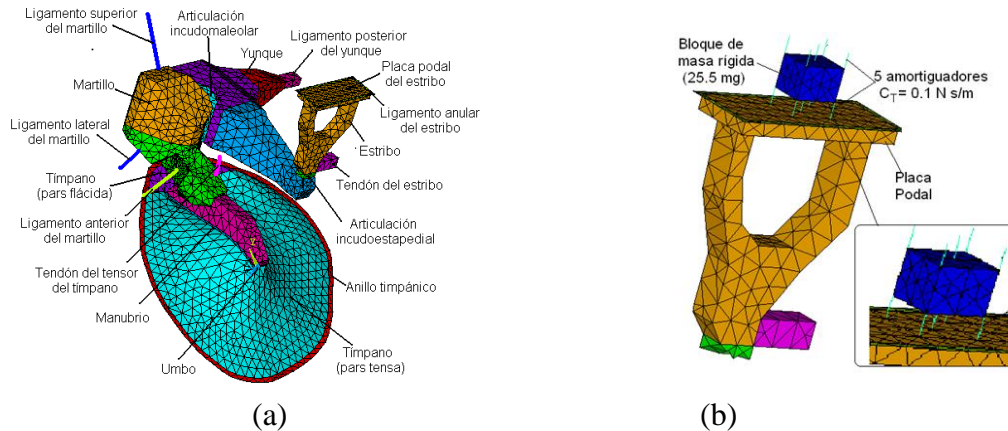


Figura 1. Modelo 3D en elementos finitos. (a) Oído medio. (b) Carga del líquido de la cóclea.

Se parte de la hipótesis de un comportamiento elástico lineal e isótropo para todos los materiales componentes. El modelo matemático que rige la dinámica estructural de los elementos del sistema tímpano osicular, se establece en la siguiente ecuación matricial [7]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son las matrices globales de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente, el vector $\{F\}$ es el vector de carga aplicada. Los vectores $\{u\}$, $\{\dot{u}\}$ y $\{\ddot{u}\}$ están referidos al desplazamiento, velocidad y aceleración de los nodos de los elementos estructurales. Para el análisis dinámico se considera una presión armónica de 80 dB_{SPL} (0.2 Pa) de amplitud, aplicada sobre la cara externa del tímpano (P_{EC}). Se calcula la velocidad (V_S) correspondiente al nodo central de la placa podal del estribo de acuerdo a (1), para un rango de frecuencias entre 100 Hz y 10000 Hz.

En el cálculo de la presión a la entrada de la cóclea (P_V), se supone que la placa podal se desplaza como un sólido rígido con movimiento de pistón. En tal sentido el volumen desplazado de líquido (U) se considera como el producto $V_S A_P$, donde A_P es el área de la placa podal del estribo en el modelo (2.825 mm²). La impedancia acústica del líquido coclear (Z_C) se determina de acuerdo a (2):

$$Z_C = \frac{P_V}{U} \quad (2)$$

Para Z_C se toma un valor medio de 20 GΩ y un ángulo de fase de cero grados para todo el rango de frecuencias estudiado. Esta suposición se hace en función de que estos valores fueron obtenidos experimentalmente por [1] entre 100 y 5000 Hz. Por lo tanto la presión P_V se calcula como el producto $Z_C V_S A_P$ y la GME como la relación P_V/P_{EC} .

El efecto de la rigidez del tímpano se cuantifica a través de dos parámetros: el módulo de Young (MY) de la pars tensa y el espesor de la membrana (t). En cada caso se fija como valor de referencia los valores medios establecidos por [5].

3. RESULTADOS

La Figura 2 muestra las curvas de $|GME|$ y ángulo de fase en función de la frecuencia obtenida con el modelo y las obtenidas experimentalmente en otros trabajos. Para el modelo se toma como valores de referencia $MY = 32$ MPa de la pars tensa y un espesor de la membrana de $t = 0.05$ mm. Se puede observar como la curva conseguida en la presente investigación, se encuentra dentro \pm DE (desviación estándar) de las mediciones experimentales de [1]. El valor pico calculado es 26 dB a 900 Hz, resultando muy cercanos a los valores medios medidos por [1] y [8] de 23 dB a 1050 Hz y 20 dB a 900 Hz respectivamente.

Entre 100 a 1000 Hz la ganancia calculada es superior a las mediciones medias experimentales de referencia, con una diferencia máxima de 8 dB a 400 Hz. Este comportamiento puede estar asociado al hecho de no considerar el efecto del aire dentro de la cavidad timpánica como es señalado por [9].

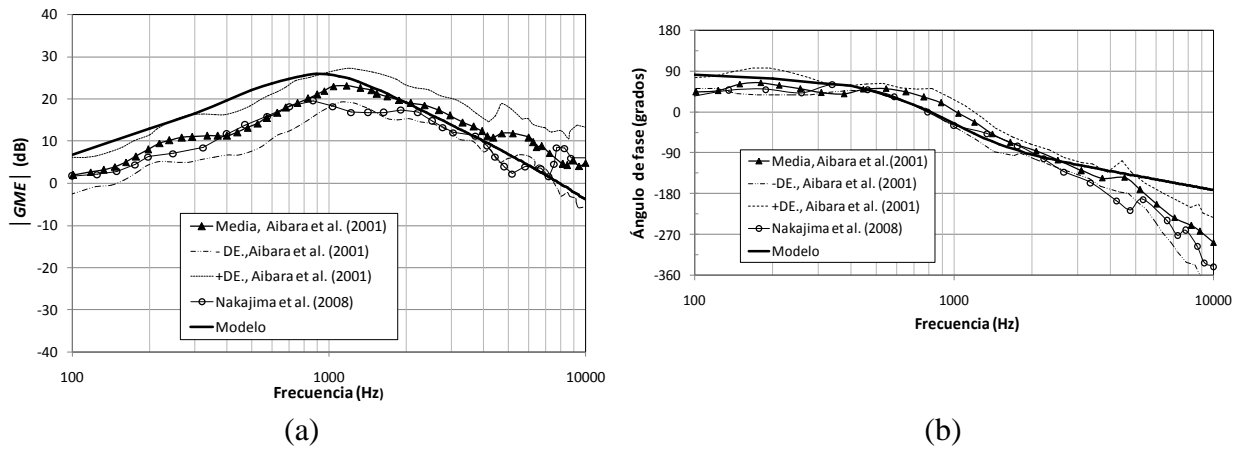


Figura 2. GME en función de la frecuencia. (a) $|GME|$. (b) ángulo de fase.

Entre 5000 Hz y 10000 Hz los valores del ángulo de fase de la GME son superiores a los valores medios de los trabajos experimentales. Esto se debe a la suposición de impedancia constante considerada en esta investigación. De acuerdo con los registros de [1], la impedancia sufre una variación después de los 5000 Hz, al mismo tiempo el ángulo de fase se incrementa negativamente.

A pesar de las ligeras diferencias encontradas entre el modelo y las curvas experimentales, se puede decir que el modelo es válido para las condiciones de contorno consideradas dentro del rango de frecuencias estudiado.

3.1 Efecto del MY:

La Figura 3(a) muestra la diferencia en ganancia de presión para tres MY (10E, 20E y 50E) respecto a la ganancia obtenida con MY de referencia. Se puede observar como las curvas presentan dos tipos de comportamiento en función de la frecuencia. Entre 100 y 900 Hz se presentan pérdidas constantes de hasta 11 dB cuando el MY se incrementa 50 veces. Luego de 1000 Hz las diferencias comienzan a ser menores hasta alcanzar los 0 dB en el caso del MY = 10E. Por encima de 2000 Hz se registran ligeros incrementos hasta un máximo de 3.5 dB a 10000 Hz para un MY = 50E.

Las pérdidas de $|GME|$ con el incremento del MY, indican una posible causa de hipoacusia en la zona de baja frecuencia (< 2000 Hz). Esta patología puede estar relacionada con la edad de acuerdo a [2].

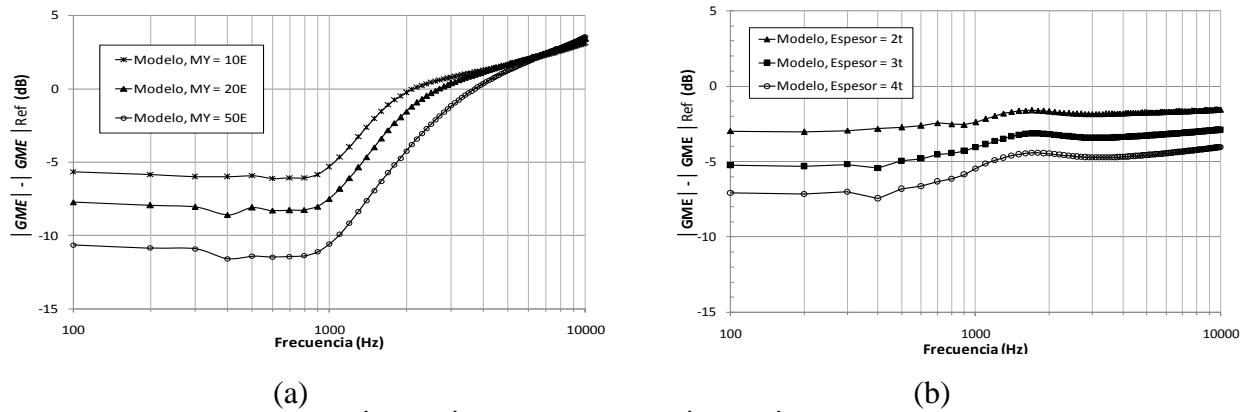


Figura 3. Diferencias de $|GME|$ respecto a la $|GME|$ de referencia (a) Efecto del MY. (referencia $E=32$ MPa). (b) Efecto del espesor. (referencia $t= 0.05$ mm).

Por otra parte el incremento de la ganancia en alta frecuencia, se encontró que está relacionado con la forma de vibración del tímpano. A mayor rigidez, la membrana presenta un movimiento más uniforme en toda la superficie (ver Figura 4), aproximándose mejor al de tipo pistón, con lo cual se incrementa la velocidad del estribo y por tanto la ganancia de presión. Esto último puede explicar los resultados encontrados por [10] relacionados con la disminución de impedancia del oído medio en un grupo de ancianos para frecuencias entre 3000 y 5000 Hz.

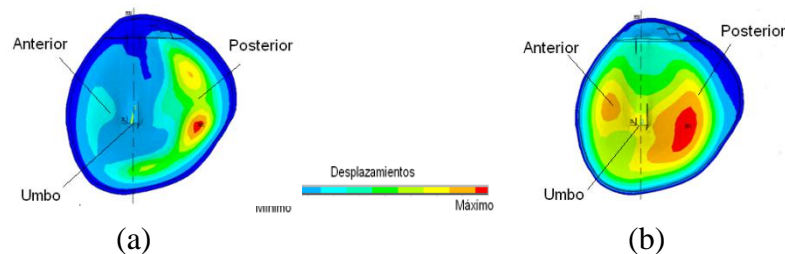


Figura 4. Desplazamientos del tímpano a 4000 Hz. (a) $MY = E$. (b) $MY = 10E$. ($E = 32$ MPa).

3.2 Efecto del espesor:

A diferencia del MY, el espesor del tímpano genera una disminución de la ganancia de presión en todo el rango de frecuencias estudiado, tal como se observa en la Figura 3(b). Esta pérdida de presión es ligeramente superior en la zona de baja frecuencia. Según estos resultados un incremento del espesor medio del tímpano puede generar hipoacusia en todo el rango de frecuencias estudiado. Esto se puede relacionar con patologías del oído medio como la otitis media, la cual puede generar un engrosamiento de la membrana [11].

La razón en las diferencias en el comportamiento de las curvas del efecto del MY y espesor del tímpano obedece al hecho de que éste último lleva implícito un incremento de la componente de inercia del sistema.

4. CONCLUSIONES

A través de un modelo virtual del oído medio humano usando el MEF, se pudo calcular la *GME* en un amplio rango de frecuencias audibles. Al mismo tiempo se analizaron los efectos del incremento de la rigidez del tímpano, encontrándose una relación entre la hipoacusia en baja y alta frecuencia así como una posible relación de estos efectos con la edad.

De acuerdo al análisis de los resultados se hace necesario generar un modelo de cóclea que incluya el acoplamiento entre el líquido de la escala vestibular y la estructura de la placa podal del estribo, con el fin de estimar directamente la presión en la zona cercana a la ventana oval y evitar los posibles errores que se cometen al suponer una impedancia constante en la entrada de la cóclea.

Es importante considerar el efecto del aire dentro de la cavidad del oído medio y estudiar su influencia sobre la *GME*. Por otra se debe seguir investigando acerca de las propiedades mecánicas del tímpano y considerar nuevos modelos de comportamiento bajo cargas dinámicas.

REFERENCIAS

- [1].Aibara, R., Welsh, J., Puria, S., Goode, R. Human middle ear sound transfer function and cochlear input impedance. *Hearing Research*, Vol. 152, No.1-2, pp. 100-109, 2001
- [2].Ruah, C., Schachern, P., Zelterman, D., Paparella, M., Yoon, T. Age related morphologic changes in the human tympanic membrane. *Archives of Otolaryngology- Head & Neck Surgery*, Vol. 117, No. 6, pp. 627–634, 1991.
- [3].Caminos, L. Estudio de la influencia de parámetros en el modelado numérico del comportamiento del oído medio y externo humano. Tesis Doctoral, Universidad de Málaga-España, 2011.
- [4].Chia, L., Peir, C., Wen, L., Jyh, C., Tien, L. Computer aided three-dimensional reconstruction and modeling of middle ear biomechanics by high-resolution computed tomography and finite element analysis. *Biomedical Engineering-Applications, Basis & Communications*, Vol. 18, No. 5, pp. 214-221, 2006
- [5].Caminos, L., Garcia-Gonzalez, A., Gonzalez-Herrera, A. Numerical Analysis of the Influence of the Auditory External Canal Geometry on the Human Hearing Response. *Proceedings of the 11th International Mechanics of Hearing Workshop*, Williamstown, Massachusetts, 16-22 July 2011.
- [6].Feng, B., Gan, R. Lumped parametric model of the human ear for sound transmission. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, Vol. 3, No. 1, pp. 33-47, 2004.
- [7].Zienkiewicz, O., Taylor, R. El método de los elementos finitos. Volumen 1. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona 2004.
- [8].Nakajima, H., Dong, W., Olson, E., Merchant, S., Ravicz, M., Rosowski, J. Differential intracochlear sound pressure measurements in normal human temporal bones. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, Vol. 10, No. 1, pp. 23-26, 2008
- [9].Voss, S., Rosowski, J., Merchant, S., Peake, W. Acoustic responses of the human middle ear. *Hearing Research*, Vol. 150, No. 1-2, pp. 43-69, 2000.
- [10].Feeney M. and Sanford C. Age effects in the human middle ear: wideband acoustical measures. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 116 No. 6, pp. 3546-3558, 2004.
- [11].Sano S., Kamide Y., Schachern P., Paparella M. Microphatology changes of pars tensa in children with otitis media with effusion. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*, Vol. 120, No 8, pp. 815-819, 1994.

EVALUACIÓN NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS DE MATERIALES PROPUESTOS PARA LA FABRICACIÓN DE UNA PRÓTESIS DE PIE USANDO MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICO

Orlando Pelliccioni

Carmen Müller-Karger

orlandop@usb.ve

cmuller@usb.ve

Grupo de Biomecánica. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar.

Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela

María Virginia Candal

mcandal@usb.ve

Grupo de Polímeros. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar.

Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela

Resumen. *Este trabajo presenta un estudio numérico simulando el comportamiento mecánico de una componente protésica de pie dinámico fabricada de material polimérico por moldeo por inyección. La pieza propuesta, desarrollada en el Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar (Venezuela), conforma un bloque sólido de aproximadamente 400 cm^3 , algo poco común en piezas plásticas inyectadas y que exige requerimientos particulares fuera de las normas convencionales para el diseño de un molde de inyección. Con los resultados obtenidos de simular el proceso de fabricación por inyección empleando un molde, bajo la herramienta CAE comercial Autodesk Moldflow Insight 11, tanto geometría como esfuerzos residuales provenientes del proceso de solidificación del material fueron trasladados a la herramienta CAE ANSYS y se evaluaron utilizando el método de elementos finitos diferentes estados de carga correspondientes al ciclo de marcha. Para el estudio fueron comparados tres materiales poliméricos propuestos en la etapa de diseño: Polióxido de Metileno (POM), Poliamida (PA) y Polipropileno (PP), utilizando un modelo sugerido para materiales viscoelásticos conocido como elástico multilineal isotrópico (MISO). Finalmente, para evaluar el impacto en la simulación de considerar en el diseño su proceso de fabricación, los resultados fueron comparados con modelos de comportamiento isotrópico elástico lineal, sin esfuerzos residuales acumulados y sin cambios geométricos por efecto de alabeo y contracción volumétrica de la pieza inyectada.*

Palabras claves: prótesis de pie dinámico, análisis estático, elástico no lineal, MISO, modelo multilineal isotrópico.

1. INTRODUCCIÓN

El término prótesis se refiere al dispositivo que sustituye o compensa la amputación de un miembro, total o parcialmente, con independencia de la causa que haya motivado esta pérdida. Una prótesis de pie puede ser altamente efectiva en la recuperación de una persona con discapacidad o puede convertirse en un obstáculo; la clave de esta efectividad se centra en la selección apropiada de los materiales a partir de los cuales se diseña la prótesis. De allí el objetivo del presente trabajo.

El antecedente más importante para este estudio es el trabajo realizado por Figueroa & Müller-Karger [1], que consistió en el diseño de una prótesis para amputaciones transtibiales. Para obtener un prototipo ideal se generó con la ayuda del computador un modelo tridimensional de una componente de pie tipo SAFE (acrónimo de *Stationary Attachment Flexible Endoskeletal*). A través de un estudio basado en análisis de esfuerzos y diseño de experimentos, se estimó la capacidad del componente para almacenar y liberar energía, con la finalidad de calificarlo o no como prótesis de comportamiento dinámico. Además, con los resultados obtenidos de los valores de esfuerzo máximo, peso, desplazamiento máximo y resistencia a la fatiga Figueroa & Müller-Karger [2] realizaron las optimizaciones necesarias para obtener el modelo final. Posteriormente Candal *et al.* [3] presentaron una metodología para el diseño de moldes de inyección para piezas plásticas sólidas y gruesas apoyándose en la simulación numérica por elementos finitos del proceso de inyección, y ajustándola específicamente a la geometría del pie protésico. Con los resultados presentados, surgieron nuevas interrogantes enfocadas desde el punto de vista de su fabricación: ¿podría reducirse el tiempo de fabricación por inyección utilizando otras resinas poliméricas?, ¿cuál es el efecto sobre el desempeño de la componente protésica al expulsarla del molde con un núcleo de material en estado fundido?, ¿la geometría de la pieza obtenida mediante moldeo por inyección presenta un acabado aceptable para el diseño?, y ¿afectaría en la distribución de esfuerzos originalmente calculada?.

Trabajos más recientes del Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar fueron presentados por Candal *et al.* [4]. El estudio consistió en el modelado numérico por elemento finitos de la componente protésica inyectándola en versiones de: Polióxido de Metileno (POM), Poliamida (PA6), Polipropileno PP-J705 (homopolímero) y la mezcla de polipropilenos PP-J705 con PP-J744 (copolímero), analizando los cambios del porcentaje de volumen solidificado en función de las variables de proceso más influyentes durante el moldeo. Sus conclusiones, revisadas exclusivamente para garantizar un buen acabado de la pieza con el menor tiempo de fabricación de la pieza, sugieren a la PA6 como mejor opción entre los polímeros revisados.

De esta manera, el estudio que se presenta a continuación extiende la revisión del grupo de materiales también a su desempeño mecánico durante el ciclo de marcha de la prótesis en uso. Las siguientes secciones describirán cada uno de los puntos considerados en el estudio referidos a la selección de los distintos materiales posibles para su fabricación, la cual no presenta antecedentes previos de fabricación mediante esta técnica.

2. MODELO NUMÉRICO

Para la simulación de los de los materiales propuestos para un pie protésico, se implementó un análisis no lineal aproximado por la técnica del elemento finito utilizando la herramienta comercial *ANSYS Mechanical APDL 14.0*. Organizando una serie de casos de estudio simulados (17 en total), se revisó el efecto de la geometría, el modelo aproximado de comportamiento de la

resina en su rango elástico, cambios por la presencia de posibles esfuerzos residuales y respuesta mecánica ante las solicitaciones de carga para los polímeros evaluados.

2.1 Componente protésica

Un primer modelo (Geometría CAD), se dibujó utilizando la herramienta *Solidworks 2012-2013* [1]. Por otra parte, la geometría resultante de la pieza inyectada se obtuvo mediante cómputo numérico utilizando la herramienta comercial *Autodesk Moldflow Insight 11.0* [3]. Tanto la geometría CAD como la pieza inyectada se importaron al programa *ANSYS* y fueron malladas con elementos tetraédricos de su base de datos, tipo SOLID 187, comúnmente utilizados en la discretización de elementos tridimensionales y considerados también como elementos cuadráticos de segundo orden. El resultado del análisis de convergencia ajustó el modelo a una malla de 44561 elementos.

2.2 Modelado de los materiales estudiados

El estudio se enfocó a la evaluación de polímeros con valores de fluencia admisibles por debajo de 40 MPa del grupo revisado por Candal *et al.* [4]. Sus propiedades mecánicas y reológicas utilizadas para la simulación se agrupan en la Tabla 1. En lo que se refiere al comportamiento del material, se simuló su naturaleza viscoelástica a través de un ajuste multilíneal de dureza isotrópica. En *ANSYS*, este comportamiento se reproduce como una curva multilíneal de esfuerzo efectivo versus deformación total o plástica dentro de un ajuste bilíneal. La Fig. 1 presenta un esquema representativo del comportamiento del modelo. Los puntos de esfuerzo/deformación requeridos para el ajuste matemático se obtuvieron de ensayos de probetas a tensión para cada material en el Laboratorio E de la Universidad Simón Bolívar.

2.3 Cargas y restricciones

Casos de carga: Se evaluaron tres de los estados principales del ciclo de marcha con prótesis de miembro inferior, los cuales son considerados críticos: El contacto inicial (CI), la posición horizontal del pie en la respuesta de carga (RC) y la fase estática terminal (ET). La Fig. 2 presenta el ciclo de marcha completo. Las magnitudes y el grado de aplicación de la fuerza en cada fase fueron escogidas de acuerdo a estudios de fatiga realizados sobre modelos físicos de prótesis de pie por Chaitow & Walker [9]. Para cada uno, se asignan las restricciones sobre la superficie superior del tobillo y los vectores de fuerza para cada escenario de estudio (Fig. 3).

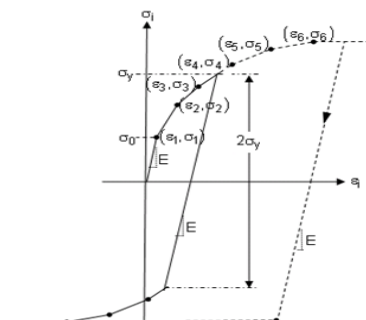


Figura 1 – Esfuerzo vs. Deformación Total para un ajuste multilíneal de dureza isotrópica.

Tabla 1. Propiedades mecánicas y reológicas para la evaluación de la Poliamida (PA6) [5,6], el Polióxido de Metileno (POM) [5,6], el Polipropileno J705 (PP) [7] y la mezcla de Polipropilenos J744 y J705 (PP_m) [7].

Propiedad	Valores			
	PA6	POM	PP	PP _m
Nombre comercial	Zitel HTN	Delrin	J744	J744 + J705
	FE8200 NC010	100 N010		
Casa comercial	Dupont Europa	Dupont Europa	Propilven	Propilven
MFI (g/10min)	30 (275/5.0)	2.30 (190/2.16)	18 (190/2.16)	17 (190/2.16)
Densidad (g/cm ³)	1.13	1.42	0.91	0.91
Módulo de Poisson	0.38	0.39	0.38	0.38
Módulo tensil (MPa)	2190	2900	1852	1374

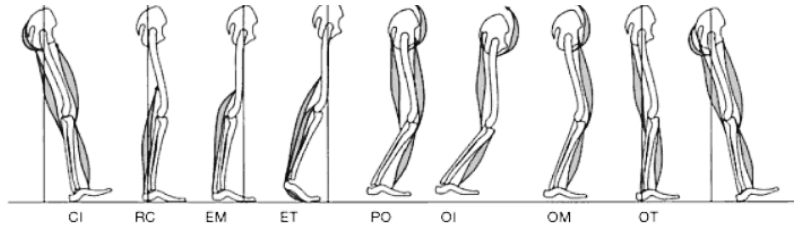


Figura 2 – Fases principales del ciclo de marcha. CI: contacto inicial (contacto talón); RC: respuesta de carga (contacto talón puntera); EM: fase estática media; ET: fase estática terminal (despegue, contacto puntera); PO, OI, OM y OT: fase oscilatoria según Rihs & Polizzi [8].

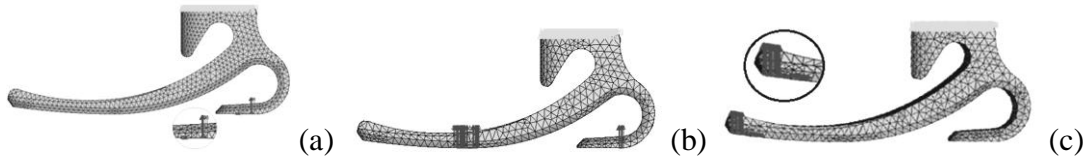


Figura 3 – Definición de las cargas del peso del paciente y restricciones sobre el modelo de análisis en ANSYS: a) Fase CI, b) Fase RC, y c) Fase ET.

Respetando los criterios de Figueroa & Müller-Karger [2], durante la fase de CI se aplica una fuerza (700 N) con una inclinación de 15° , y la carga se distribuyó a lo largo de una línea ubicada en la zona del talón. Esta fuerza representa el peso del paciente, y lo soporta un solo pie cuando camina. Luego, la fase RC sucede cuando los dos pies se encuentran en contacto con el piso: 350N aplicados a 90° respecto a la vertical. Para seleccionar los nodos se buscaron aquellos que tuvieran la componente más pequeña en el eje vertical, y así asegurar que todos tocaran la base inferior del pie. Finalmente para la fase ET, se aplicó la fuerza de 700 N a 45° de inclinación.

Esfuerzos residuales: En general, cuando la pieza inyectada permanece en el interior del molde se inhiben mecánicamente por las paredes de la cavidad ciertas contracciones y alabeos, pero a su vez también está propensa a la formación de tensiones residuales internas que pueden ocasionar deformaciones posteriores. Para *Autodesk Moldflow*, el modelo se ha elaborado asumiendo un comportamiento lineal del material termo-viscoelástico. Esta tensión va desarrollándose mientras el material se enfría bajo presión en el molde. En particular, el modelo representa la tensión inducida térmicamente que surge de la solidificación y la subsiguiente contracción del material, así como la tensión inducida por la presión. Este último esfuerzo sucede por la acción de la presión de fusión en el material solidificado formando la capa sólida. En el presente trabajo, los resultados estimados por la inyección de la componente protésica con cada material, son transferidos al programa *ANSYS* como una carga adicional a las sollicitaciones propias del ciclo de marcha utilizando la prótesis.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Comparando modelos geométricos, las diferencias generadas en los resultados se deben exclusivamente al fenómeno de alabeo o deformación, producido en la pieza después del proceso de inyección. Utilizando la geometría CAD como patrón de referencia, se reportaron diferencias máximas de 2.7% y 8.1% en los esfuerzos y desplazamientos respectivamente, que están dentro del margen aceptable. Esta deformación en la pieza inyectada se debe, por lo general, a variaciones en el espesor de la misma o a una temperatura del molde desigual, pero reafirman la buena estabilidad dimensional de la pieza obtenida por el molde diseñado.

Los resultados que reportó implementar un modelo elástico multilinear de dureza isotrópica, mostraron diferencias entre los materiales estudiados con respecto a las simulaciones suponiendo un comportamiento elástico lineal del material. Como puede observarse en las curvas de laboratorio presentadas en la Fig. 4, dentro del margen de esfuerzos soportados por las piezas inyectadas en los escenarios críticos de carga (<30.0 MPa, fase ET), para los materiales de menor rigidez estudiados (PP y PP_m) las curvas de esfuerzo versus deformación son explícitamente no lineales mientras que para el caso de la PA6 y el POM los valores experimentales del ensayo a tensión sí logran ajustarse a un comportamiento elástico rectilíneo. Utilizar un modelo numérico multilinear incrementa el tiempo de cómputo de la simulación, pero se justifica para escenarios de diseño donde la no linealidad del comportamiento mecánico del material reduce el rango admisible de resistencia, como es el caso del PP para el presente estudio.

Cuando se reportaron los valores calculados de esfuerzos residuales en la pieza inyectada ya desmoldeada (Fig. 5a), los resultados no superaron los 11 MPa. Luego, al combinarlos con las cargas máximas encontradas durante la marcha (Fig. 5b), las zonas sometidas a los máximos esfuerzos no se vieron afectadas de forma sensible, ya que no coincidieron con las zonas de mayores tensiones residuales. No obstante, sí se observa cierto incremento localizado de las tensiones en las zonas donde la pieza presenta cambios bruscos en su geometría; posiblemente por contracciones y alabeo que sufre la pieza al fabricarse por inyección. Finalmente, la tabla 2 reporta los valores obtenidos para la PA6, el POM y PP. Ninguno de los casos superó los límites de fluencia de los materiales, y tanto en los escenarios críticos de máximo desplazamiento (fase ET) como de máximas solicitaciones (fase CI) el mejor desempeño lo alcanzan el POM y la PA6. Debe destacarse también que de estos dos, la PA6 cuenta con una ventaja adicional si se compara su peso con la pieza fabricada en POM.

En todo caso, debe recordarse que estos resultados son referenciales como consecuencia de todas las simplificaciones asumidas en la simulación, y que existe una amplia gama de variantes de la PA6, el POM y el PP. Además, en la realidad estas piezas están expuestas a cargas cíclicas y no únicamente a condiciones estáticas, por lo que se sugiere una evaluación de la componente

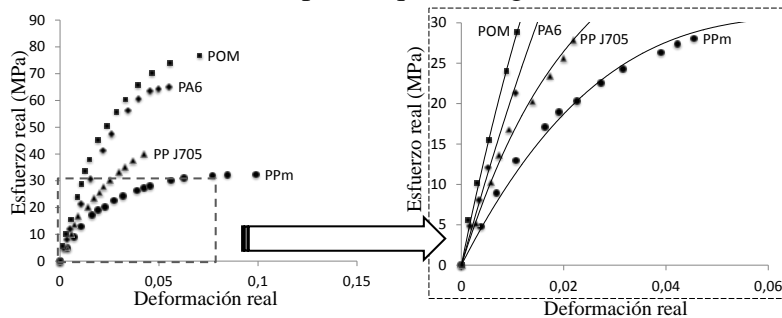


Figura 4 –Ensayos experimentales a tensión de los materiales.

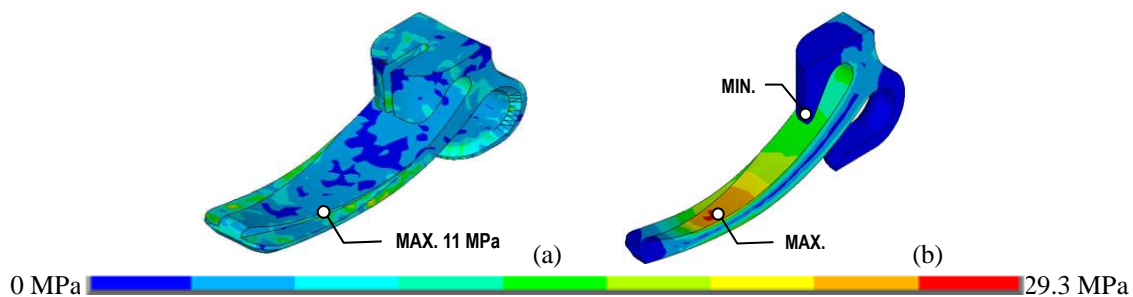


Figura 5 – Distribuciones de esfuerzo de von Mises en componente de PA6 inyectada: a) Esfuerzos residuales de la pieza post moldeo y b) Fase ET + residuales para el comportamiento elástico multilinear.

protésica a fatiga. Richardson & Lokensgard [10] reportan una menor resistencia a cargas cíclicas por parte de las PA con respecto al POM.

Tabla 2. Masa, esfuerzos máximos de von Mises y desplazamiento para los materiales estudiados.

Materiales	Masa (g)	S _y (MPa)	Esfuerzos máximos (MPa)			Desplazamiento (mm)		
			CI	RC	ET	CI	RC	ET
PA6	399.0	56.0	29.3	9.0	26.6	7.6	5.9	27.8
POM	480.3	73.8	30.9	11.5	28.6	5.4	4.4	27.0
PP	347.8	40.0	26.7	12.2	38.2	9.5	8.4	49.6
PP _m	326.9	33.2	32.3	11.2	31.2	12.2	10.2	60.2

4. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares por aproximación numérica para la inyección de la prótesis de pie con PA6, continúan favoreciéndolo como material sugerido en la fabricación de la prótesis, seguido del POM, y desfavoreciendo la elección del PP. Plantearse un comportamiento del material elástico lineal, funciona cómodamente mientras la simulación numérica busque resultados preliminares y las sollicitaciones de carga sobre la prótesis se mantengan dentro del rango lineal de la curva del polímero. Esta recomendación también se mantiene para los detalles geométricos, siempre que la contracción y alabeo final de la pieza solidificada se mantengan en porcentajes aceptables. Los valores calculados con la geometría CAD en el presente estudio resultaron más conservadores. Para el diseño de la componente protésica de pie dinámico, se recomienda suavizar los entalles en todas las aristas de la pieza agregando redondeos que reduzcan la formación de posibles tensiones residuales localizadas durante el proceso de fabricación por inyección.

REFERENCIAS

- [1]. Figueroa, R. & Müller-Karger, C., Análisis de esfuerzo por el Método de Elementos Finitos en el Proceso de Diseño de Pie Artificial, *IFMBE Proc. IV Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, CLAIB*, pp. 732–735, 2007.
- [2]. Figueroa, R. & Müller-Karger, C. Using FE for Dynamic Energy Return Analysis of Prosthetic Feet during Design Process, *IFMBE Proc. 25th Southern Biomedical Engineering Conference*, pp. 289–292, 2009.
- [3]. Candal, M., Romero, J., Müller-Karger, C. & Pelliccioni, O., Análisis numérico en el diseño de un molde para prótesis de pie empleando herramientas de diseño (CAD) e Ingeniería (CAE) asistidas por computador, *Mecánica Computacional Vol. XXIX, AMCA*, pp. 6441–6454, 2010.
- [4]. Candal, M., Pelliccioni, O., Bermeo, M. & Müller-Karger, C., Comparative analysis of materials during design process of prosthetic foot by using plastic injection molding simulation FE tool, *Health Care Exchanges (PAHCE), 2013 Pan American*, Vol. 2327-8161, pp. 1 – 6, 2013.
- [5]. Portal oficial de *Autodesk Moldflow* (<http://www.autodesk.com>)
- [6]. Brandrup, J. (Editor), Immergut E. H. (Editor) & Grulke, E. A., *Polymer Handbook*. John Wiley & Sons, Estados Unidos, 2005.
- [7]. Corporación Americana de Resinas CORAMER. (<http://www.coramer.com>)
- [8]. Rihs, D. & Polizzi, I., *Prosthetic Foot Design*, Victorian U. of Tech., Estados Unidos, 2001.
- [9]. Chaitow, L. & Walker, J. *Aplicación clínica de las técnicas neuromusculares. Extremidades*, Editorial Paidotribo, España, 2006.
- [10]. Richardson, T. & Lokensgard, E., *Industria del plástico. Plástico industrial*. Editorial Paraninfo, España, pp. 17, 469-471, 1999.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA MEDICIONES DE FUERZA MUSCULAR EN UN DISTRACTOR ALVEOLAR

José Adolfo Cedeño

cedenomartinez@gmail.com

Postgrado de Cirugía Bucal. Facultad de Odontología. Universidad Central de Venezuela. Los Chaguaramos, AP 1050, Caracas-Venezuela.

Wilmer Carrero

Miguel Cerrolaza

wilmer.carrero@inabio.edu.ve

miguel.cerrolaza@inabio.edu.ve

Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela

Av. Miguel Otero Silva, Sebucán, AP 1071, Caracas-Venezuela

Resumen. *El proceso de generación de nuevo hueso por estiramiento del callo óseo se denomina osteogénesis por distracción o distracción ósea. Se ha aplicado en el hueso mandibular para ayudar a corregir defectos causados por ausencia dental, algunos síndromes o accidentes. Un factor de vital importancia para el diseño mecánico de distractor osteogénico alveolar es el conocimiento de las cargas fisiológicas para estudiar el comportamiento del dispositivo y validar el diseño a través de simulaciones computacionales. Para obtener las cargas que podrían actuar sobre el distractor, se ha construido una celda de carga constituida por una lámina de acero inoxidable en voladizo instrumentada con galgas extensométricas, que ha sido empotrada en una férula como la indicada en tratamientos de ortodoncia. Luego de calibrar la celda de cargas fisiológicas, se realizó un ensayo in vivo sobre un paciente parcialmente edéntulo, obteniéndose registros digitales de cargas para diferentes condiciones de protrusión de la lengua, retracción del labio inferior y la combinación de ambas.*

Palabras claves: distractor alveolar, galgas extensométricas, cargas biológicas, celda de cargas.

1. INTRODUCCIÓN

La distracción osteogénica es una técnica quirúrgica acreditada a Ilizarov y es aplicada en diversas partes del cuerpo para regenerar estructura ósea. La distracción osteogénica es un

proceso de alargamiento de hueso por estiramiento donde las tensiones estimulan la histogénesis. Esta técnica es aplicada frecuentemente en cirugía bucal y cirugía maxilofacial generando lentos alargamientos de cualquier parte de la mandíbula o maxilar. Para el caso específico en estudio, se ha enfocado la atención en la distracción alveolar, diseñándose un dispositivo denominado: distractor alveolar. Este distractor debe ser estudiado ante las cargas fisiológicas a las que estará sometido cuando esté en funcionamiento, pudiéndose analizar su comportamiento y estabilidad a través de simulaciones. Su funcionamiento tendrá una incidencia directa en la calidad del hueso a regenerar. Para nuestro registro se desarrolló un sensor basado en galgas extensométricas ó "strain gauge", las cuales son resistencias variables, cuyo parámetro característico varía con la deformación producida sobre ella. El acondicionamiento de la señal obtenida del puente, generalmente se realiza mediante amplificadores operacionales y de instrumentación. Comercialmente se encuentran integradas en transductores completos, aunque también se puede disponer de ellas individualmente.

2. MATERIALES Y MÉTODO

Se diseñó un dispositivo para la evaluación de las cargas biológicas funcionales, producidas por las tensiones que ejerce el labio al retraerse (músculo orbicular de los labios) sobre los dientes o la cabeza de un tornillo distractor y para evaluar las cargas ejercidas por los movimientos involuntarios y voluntarios del grupo muscular de la lengua en dirección opuesta a la del labio.

Sobre los modelos de la boca del paciente obtenidos en yeso piedra, se procedió a diseñar una férula de acrílico que se adaptó anatómicamente a la arcada del paciente y se colocaron unos ganchos que vincularan a los dientes circundantes para brindar estabilidad a la férula, similares a los utilizados en la fabricación de retenedores en ortodoncia. Sobre dicha férula se colocó una lámina de acero inoxidable donde se fijaron galgas extensométricas (Figura 1).



Figura 1- Colocación de la férula en el modelo de yeso.

La lámina de acero inoxidable cuya área efectiva es de $10 \times 11 \text{ mm}^2$, trata se semejar el área de los dientes antero-inferiores y tiene 0,8 mm de espesor, empotrada y dispuesta con la inclinación que proyecta el cirujano en la colocación del distractor alveolar (Figura 2).

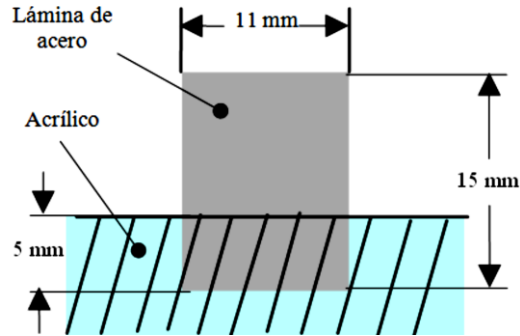


Figura 2 - Dimensiones de la lámina de acero empotrada en el acrílico (férula).

Se instalaron dos pares de galgas extensométricas sobre esta lámina de acero inoxidable, uno en la cara posterior (lingual) y el otro en la cara anterior (vestibular), de manera de obtener un balance en la lectura del cambio de resistencia eléctrica en las galgas extensométricas.

Se evaluaron los movimientos voluntarios e involuntarios del paciente sobre el dispositivo para obtener la información necesaria para realizar posteriormente simulaciones computacionales con los datos obtenidos en el distractor osteogénico alveolar. Se registraron cargas menores y situaciones extremas en la cual el paciente trató de violentar por movimientos musculares la posición o el vector del distractor.

La galga extensométrica de resistencia que se utilizó, consiste en una matriz de bobinas o cable muy fino que varía su resistencia linealmente dependiendo de la deformación aplicada al dispositivo en cierto rango. La deformación (ϵ) del material se define como un cambio en su longitud debido a una fuerza o esfuerzo aplicado externamente. Si la temperatura es constante, y el sensor (galga extensométrica) experimenta la misma deformación que la superficie sobre la cual está adherida, se concluye que los cambios de resistencia son producto de la deformación del material.

La resistencia eléctrica es una propiedad que es afectada no sólo por cambios geométricos del elemento resistivo, sino además por los cambios en la temperatura del ambiente donde éste se encuentra. Si todas las galgas que conforman el transductor son de características similares y están sometidas a la misma temperatura, experimentarán cambios similares en su resistencia. Para compensar este efecto las galgas se conectan formando una configuración conocida como Puente de Wheatstone.

Para instrumentar el voladizo se emplearon cuatro galgas empaquetadas en pares y se dispusieron en ambas caras de la lámina. Para adherirlas sobre la superficie de la lámina de acero se consideró el procedimiento sugerido por el fabricante. La ubicación y orientación de las galgas se planeó de manera que quedaran dispuestas lo más cerca al empotramiento, en la dirección en la cual la lámina en voladizo experimenta la mayor deformación (Figura 3).

Adicionalmente, esta disposición permite tener un instrumento con alta sensibilidad que puede detectar la dirección en la cual se aplica la carga, ya que siempre al cargar la celda, un par de galgas estará en tracción y el otro en compresión. Si se invierte el sentido de la fuerza aplicada, la condición de deformación se invierte, lo cual permite diferenciar el sentido de la fuerza aplicada.

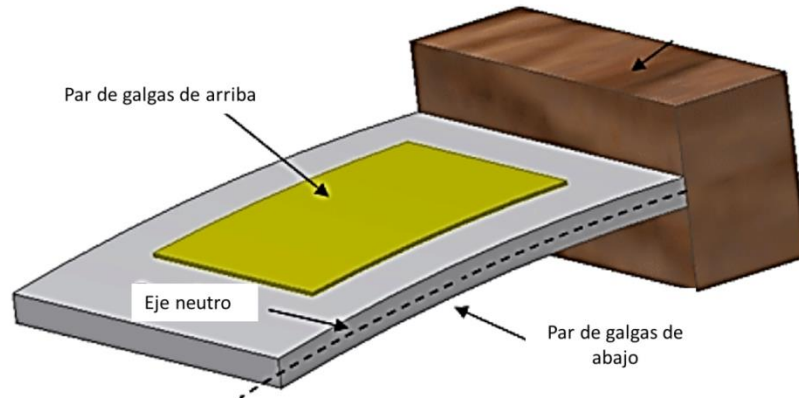


Figura 3 - Disposición en cantilever para la realización de la calibración del sensor de carga.

Una vez colocadas las galgas, se ubicó una bornera justo debajo del empotramiento para fijar a la férula, las uniones entre los conductores que vienen de las galgas, de la fuente de poder y el circuito acondicionador de señales. El voltaje de excitación del puente de Wheatstone fué de 5 Voltios. El sistema de adquisición de datos se implementó con una tarjeta de acondicionamiento SC-2043-SG de National Instruments. Luego se transfirieron los datos a un computador portátil equipado con una tarjeta de adquisición de datos DAQCard-AI-16XE-50 de 16 entradas analógicas con 16 bits de resolución y un programa de adquisición y procesamiento de datos realizado en la plataforma LABVIEW 6.i el cual permite visualizar en un gráfico en tiempo real, la carga registrada por el transductor desarrollado.

El factor de temperatura debido a la diferencia de temperatura del ambiente y de la boca ventilada, se consideró despreciable para los fines de esta investigación.

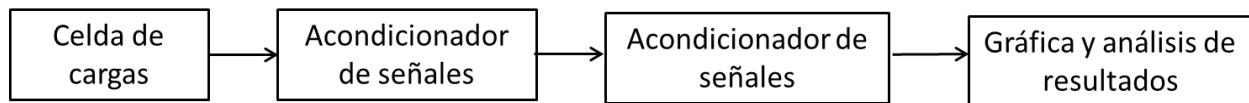


Figura 4 - Flujograma de los pasos del protocolo para la obtención de los resultados reportados.

3. RESULTADOS

Para determinar las cargas fisiológicas in vivo, se realizó la esterilización del dispositivo y se colocó en boca del paciente parcialmente edéntulo del maxilar inferior en la zona anterior. Para comenzar el ensayo, se dispuso la colocación de los cables del sensor de manera tal que no perturbaran la movilidad natural del músculo orbicular de los labios.

En el primer grupo de fuerzas musculares, se registraron lecturas negativas de fuerza inducidas por la retracción del músculo orbicular del labio. Se registraron una serie de picos negativos de los estados de cargas a las que el sensor fue sometido. El registro de fuerzas fue muestreado con una frecuencia de 10 Hz, lo que permitió reproducir detalladamente la fuerza tanto dinámica como estática. En el segundo grupo de fuerzas musculares se observaron picos positivos, producidos por la lengua sobre la cara lingual (interior) del sensor. Y el tercer grupo que se registró en este ensayo con el sensor de cargas, fue el estado combinado de cargas como resultado de la vocalización del paciente. Se registraron cargas combinadas sobre el sensor de

cargas generadas por el músculo orbicular de los labios y la lengua. Las cargas generadas en este ensayo son considerablemente menores en magnitud, al compararlas con los otros dos grupos enunciados anteriormente por tratarse de movimientos leves de gesticulación y dicción que demandan típicamente gastos muy bajos de energía motora.

La protrusión produce los movimientos que registran un estado positivo de carga ejercidos por la lengua, mientras que la retracción del labio produce valores negativos.

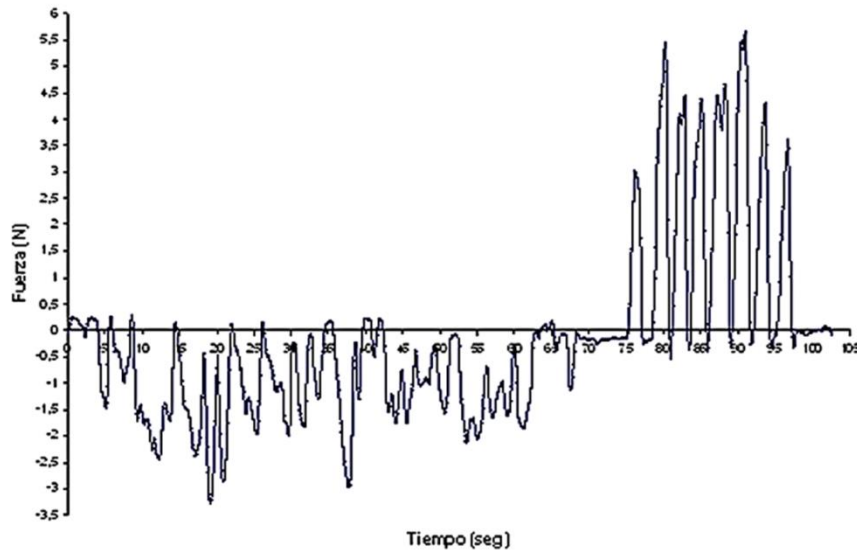


Figura 6 – Ensayo con cargas voluntarias. Fases de activación del sensor por cargas inducidas en boca voluntariamente. Las cargas negativas representan la retracción de los músculos orbiculares y las cargas positivas representan la protrusión voluntaria mediante los músculos linguales.

Tomando el promedio de los picos máximos y mínimos del registro del ensayo se obtuvo que la fuerza debido a la protrusión de la lengua es de $5,654 \pm 0,057 \text{ N}$ y la del labio es de $-1,359 \pm 0,033 \text{ N}$. La precisión viene dada por la sensibilidad del instrumento. El tiempo total para cada uno de estos ensayos de movimientos focalizados fue de 100 seg. aproximadamente.

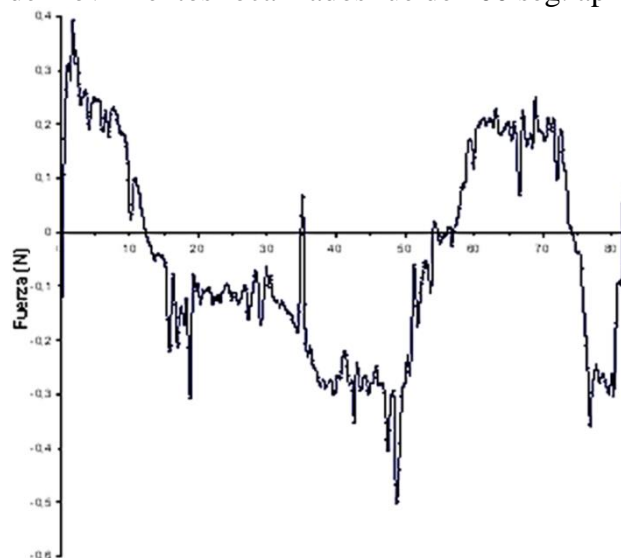


Figura 7 – Curvas de cargas de vocalización.

La Fig. 7 representa las fases de activación del dispositivo ante cargas inducidas por efecto combinado de protrusión de la lengua y retracción de los músculos orbiculares como consecuencia de los movimientos generados para la vocalización. Para estos ensayos de vocalización el tiempo total de registro fue 190 segundos aproximadamente, de los cuales en un 34,6% predomina la protrusión de la lengua y un 65,4% de la retracción del labio. Este es un valor ideal para evaluar el dispositivo a un ciclo de fatiga; simulando este período correspondiente al tiempo en que el dispositivo estará implantado en el paciente durante el protocolo de distracción (3 meses aproximadamente). Éste sería el tiempo máximo de utilización del distractor alveolar en la boca del paciente.

4. CONCLUSIONES

Este ensayo se presenta como un primer paso para el monitoreo de cargas inducidas sobre el distractor alveolar colocado en el maxilar inferior, donde se han registrado las cargas predominantes que podrían causar efectos no deseados durante el proceso de distracción osteogénica alveolar. El diseño de una celda de cargas resulta efectivo para aproximar las fuerzas que pueden ser inducidas sobre un distractor alveolar implantado en el maxilar inferior en la zona anterior. Con los registros obtenidos es posible interpretar cuantitativamente las proporciones de cargas por movimientos fisiológicos de la lengua y los labios. Se ha desarrollado una metodología y un protocolo para la fabricación de sensores de cargas para pacientes con deficiencia ósea intraoral. Este protocolo podría ser aplicado también en maxilares superiores para realizar un estudio estadístico completo de las cargas fisiológicas en estudio.

REFERENCIAS

- [1].Chin, M. and Toth, B. A. Distraction Osteogenesis in maxillofacial surgery using internal devices: review of five cases. *J Oral Maxillofacial Surgery*. 54:45-53, 1996.
- [2].Bell, W.H., Harper, R.P., Gonzalez, M., Cherkashin, A. M., and Samchukov M. L. Distraction osteogenesis to widen the mandible, *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 35:11-19, 1997.
- [3].Uckan, S., Dolanmaz, D., Kalayci, A., and Cilasun, U. Distraction osteogenesis of basal mandibular bone for reconstruction of the alveolar ridge. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 40:393-396, 2002.
- [4].Keßler, P., Wiltfang, J., Schultze-Mosgau, S., Hirschfelder, U., and Neukam F. W. Distraction osteogenesis of the maxilla and midface using a subcutaneous device: report of four cases. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 39:13-21, 2001.
- [5].Riedrich, D., Rosarius, N., Rau, G., and Diedrich, P. Measuring system for in vivo recording of force systems in orthodontic treatment-concept and analysis of accuracy. *J. Biomech*. 32:81-85, 1999.

MODELO NUMÉRICO DE UNA UNIDAD FUNCIONAL VERTEBRAL CON PROPIEDADES ANISOTRÓPICAS DEL DISCO INTERVERTEBRAL

Lammardo, Adriana

adrianalow006@gmail.com

Grupo de Biomecánica de la USB, Universidad Simón Bolívar Valle de Sartenejas, Caracas-Venezuela

Zambrano, Lilibeth

lzambrano@usb.ve; lzambrano@unimet.edu.ve

Grupo de Biomecánica, Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas, Caracas-Venezuela

Departamento de Ciencias y Técnicas de la Construcción, Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela

Müller-Karger, Carmen

cmuller@usb.ve

Grupo de Biomecánica, Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas, Caracas-Venezuela

Resumen. *Se plantea realizar un modelo numérico de una unidad funcional vertebral (UFV) con propiedades isotrópicas heterogéneas en las vértebras y anisotrópicas en el disco, empleando simulación computarizada mediante el método del elemento finito. Para ello, se segmentó a partir de tomografías axiales computarizadas la UFV fisiológica L4-L5 utilizando el programa Mimics®, el cálculo de las propiedades mecánicas para las vértebras se obtiene a partir de la relación de la densidad aparente con el módulo de elasticidad; se asignan propiedades anisotrópicas e hiperelásticas al disco intervertebral utilizando la formulación de energía de deformación (FED) a partir de modelos encontrados en la literatura, el análisis de elementos finitos se realizó empleando Ansys®. Se analizan tres modelos, dos variando las propiedades de las vértebras (isotrópicas homogéneas e isotrópicas heterogéneas), y un modelo considerando las fibras del anillo fibroso. Entre las conclusiones se puede decir que el uso de las propiedades heterogéneas, a pesar de las numerosas variables que contienen, es importante porque aporta mayor semejanza al modelo numérico con la fisionomía vertebral, además de influir positivamente en el parámetro de la deformación, y de representar un aporte en el modelado de*

la UFV, ya que en la literatura numerosos trabajos consideran a las vértebras con propiedades homogéneas isotrópicas. El uso de FED para las propiedades del anillo fibroso, permite la consideración de las fibras del anillo para geometrías irregulares, independizando las fibras de la malla. Además, se validaron los resultados obtenidos del modelo con modelos experimentales, apreciándose diferencias menores al 10%.

Keywords: Unidad funcional vertebral, Anillo Fibroso, Núcleo pulposo, Elementos Finitos.

1. INTRODUCCIÓN

Las vértebras son elementos óseos que representan la parte estructural de la columna y sus propiedades mecánicas varían en distintas direcciones. El disco intervertebral y los ligamentos son estructuras viscoelásticas, lo cual les da la capacidad de recuperarse lentamente ante las deformaciones y su comportamiento depende de la velocidad con la cual es recibida la carga a la que están sometidos. El disco realiza la función de un sistema amortiguador colocado entre dos vértebras; los ligamentos proporcionan estabilidad a la columna permitiendo el movimiento. Con la pérdida de humedad, las tensiones repetidas en el anillo hacen que las fibras en el mismo se deformen o desgarren liberando el núcleo pulposo, que al ejercer presión sobre los nervios produce dolor y lesiones discales (hernias discales). Estos efectos pueden ser reproducidos en modelos computacionales que facilitan su estudio; con el desarrollo de modelos virtuales de sistemas óseos, se intenta replicar la anatomía real, generando estructuras tridimensionales a partir de tomografías computarizadas tomadas a humanos vivos, permitiendo así obtener las propiedades geométricas y mecánicas particulares del sistema óseo de cada persona, y así crear modelos personalizados para someterlos a las pruebas necesarias.

2. METODOLOGÍA

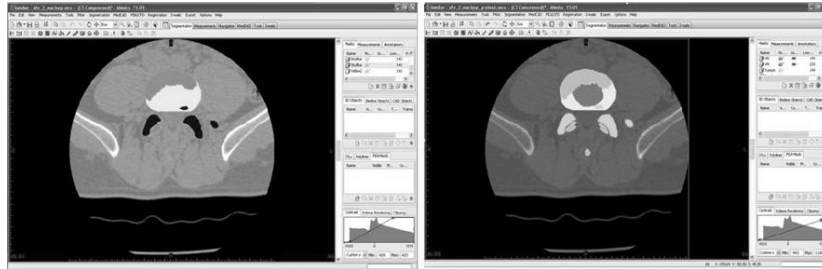
2.1 Segmentación del modelo

Se utilizaron las imágenes del segmento lumbo-sacral tomadas a un paciente masculino de 30 años de edad, libre de antecedentes de patologías en la columna vertebral. Las imágenes fueron adquiridas y trabajadas en formato Dicom, el cual es el formato estándar para el manejo de imágenes médicas. El tamaño del pixel de las imágenes es de 0,38x0,38 mm y espacio entre imágenes de 1 mm. Para la segmentación ósea se empleó el paquete comercial Mimics®, con el que se generó una representación 3D a partir del conjunto de imágenes, (ver figura 1a). El disco intervertebral está compuesto por el anillo fibroso y el núcleo pulposo, por lo que con la máscara resultante del disco intervertebral, se delimitó la superficie para el núcleo pulposo, (figura 1b).

2.2 Asignación de propiedades mecánicas

Para la UFV creada se consideran propiedades isotrópicas heterogéneas para las vértebras y propiedades anisotrópicas para el disco intervertebral. El anillo fibroso se simula con propiedades hiperelásticas con fibra reforzada y el núcleo pulposo se considera isotrópico e incompresible. La asignación de las propiedades heterogéneas a las vértebras, se realizó utilizando el programa GrayValues desarrollado en el Grupo de Biomecánica de la USB.

Para conocer la densidad aparente, se leen los valores máximos y mínimos de las UH, posteriormente, utilizando los resultados del estudio realizado por Andresen et al. (1998) se asigna un valor de densidad mineral al hueso cortical vertebral, con base en la edad de la persona, con los valores de densidad aparente calculados y utilizando la expresión de Morgan et al. (2003) de la tabla 1, se calcula el valor de módulo de elasticidad.



a

b

Figura 1- Segmentación de la UFV, a) superficie disco intervertebral; b) Anillo fibroso y núcleo pulposo.

Tabla 1: Relaciones entre módulo de elasticidad y densidad aparente dependiendo del sitio anatómico, tomado de Morgan et al. (2003)

Sitio anatómico	Densidad aparente (g/cm ³)	E=Ap ^B	
		A	B
Vertebra (T10-L5)	0,18 (0,11-0,35)	4730(3050-7320)	1,56 (1,31-1,81)
Tibia proximal	0,23 (0,09-0,41)	15520 (10830-22230)	1,93 (1,70 -2,16)
Trocánter superior	0,22 (0,14-0,28)	15010(7590-29690)	2,18 (1,74-2,62)
Cuello femoral	0,56 (0,26-0,75)	6850(5440-8630)	1,49 (1,14-1,84)

En la figura 2, muestra la distribución de la densidad calculada para las vértebras de la UFV, se observa la sección transversal de la UFV con la densidad obtenida, y la imagen TAC correspondiente con esa sección. Comparando la escala de gris con la imagen de la sección transversal de la vértebra se observa una correcta distribución de la densidad.

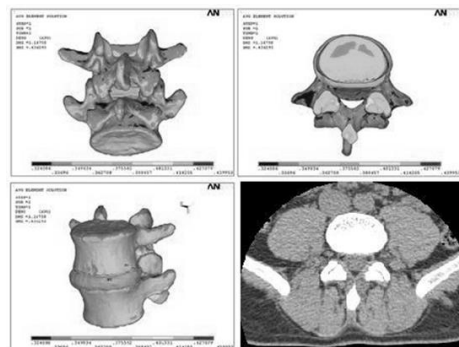


Figura 2- Distribución de densidad en las Vértebras.

La asignación de las propiedades anisotrópicas para el anillo fibroso se realizó con la función de energía de deformación (FED) utilizada en los trabajos de Pérez del Palomar (2008)

y Moramarco et al. (2010), que son una modificación de la FED propuesta por Holzapfel (2000); en la ecuación (1). C_{ij} representa las constantes del material obtenidas a partir de los ensayos experimentales, es el parámetro que representa el comportamiento exponencial de las fibras de colágeno, J es el gradiente de la deformación y D representa el módulo de incompresibilidad, el ángulo de inclinación de la fibra se supone de $\pm 30^\circ$.

$$\Psi = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + \frac{K_1}{2K_2} \{ \exp[K_2(\bar{I}_4 - 1)^2] - 1 \} + \frac{K_1}{2K_2} \{ \exp[K_2(\bar{I}_6 - 1)^2] - 1 \} + \frac{1}{D} (J - 1)^2 \quad (1)$$

2.3 Modelo fisiológico de la UFV utilizando el método de elementos finitos

Se analiza la influencia de las consideraciones de las propiedades de los materiales de la UFV, lo que quiere decir, analizar cómo influye suponer propiedades isotrópicas homogéneas o heterogéneas en las vértebras, cómo influye la incompresibilidad en el núcleo pulposo, y cómo influye la consideración de las fibras de colágeno en el anillo fibroso. Las solicitaciones consideradas en todos los modelos son cargas de compresión, sobre la carilla superior de la vértebra L4; las condiciones de desplazamiento se suponen sobre la superficie inferior de la vértebra L5, restringiendo el desplazamiento en el eje z para todos los nodos de esa superficie, en un nodo central donde se restringen los movimientos y rotaciones para los ejes x, y, z , y dos nodos laterales separados entre sí en el eje y ; estas restricciones del desplazamiento se plantean para evitar que se genere concentración de esfuerzos en los nodos si se restringen todos los grados de libertad (superficie empotrada). El elemento seleccionado en Ansys® para este trabajo fue Solid187, compuesto por 10 nodos 3 grados de libertad por cada nodo, funciona tanto para propiedades lineales como para las no lineales.

3. RESULTADOS

En la Figura 3, se presentan los resultados obtenidos para el esfuerzo y la deformación tanto de las vértebras como del disco intervertebral. El uso de propiedades heterogéneas en las vértebras disminuye la deformación que sufren axialmente, y el esfuerzo aumenta, comparando con el modelo más básico (modelo 1); la principal diferencia entre los modelos con respecto al disco intervertebral es la consideración del anillo fibroso, en él disminuye la deformación gracias a la rigidez ganada por el uso de las fibras en el anillo.

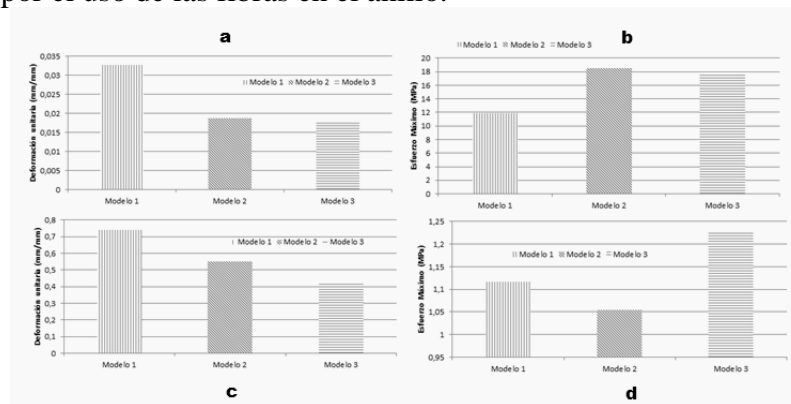


Figura 3: a) Deformación máxima de las vértebras, b) Esfuerzo máximo de las vértebras, c) Deformación máxima del disco intervertebral, d) Esfuerzo máximo del disco intervertebral.

El modelo más completo y parecido al modelo fisiológico, es el modelo número 3, basado en la comparación con el modelo experimental de Coombs et al. (2012). Comparando los valores de desplazamiento máximo, se aprecian diferencias menores de 1% (Figura 4).

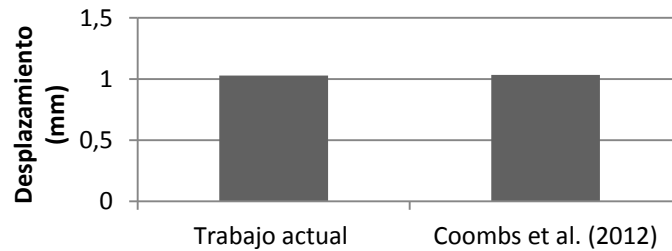


Figura 4: Comparación de desplazamiento máximo de la UFV con la literatura

En este modelo, la distribución del esfuerzo, corresponde a la figura 5a, en este caso los mayores esfuerzos se obtienen en los pedículos posteriores de las vértebras, siendo el valor máximo 17,814 MPa, correspondiendo a la zona más vulnerable de las vértebras. En la figura 5b se muestra el desplazamiento máximo, obtenido sobre la superficie de la vértebra L4.

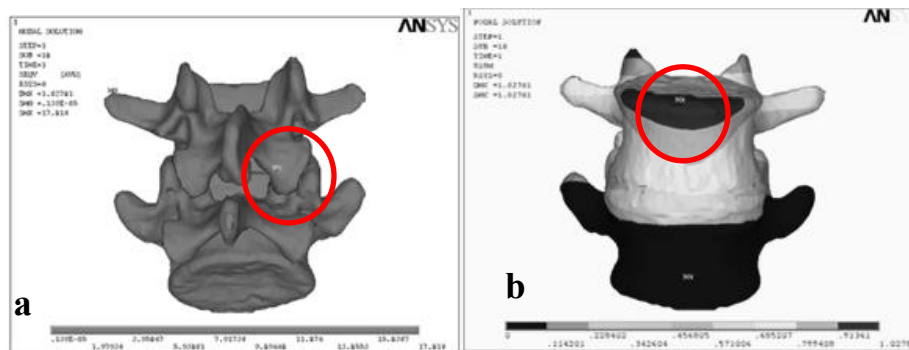


Figura 5: a) Esfuerzo de la UFV, (MPa); b) Desplazamiento de la UFV, (mm)

4. CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como finalidad, realizar un modelo numérico de una UFV con propiedades isotrópicas heterogéneas en las vértebras, anisotrópicas hiperelásticas para el anillo fibroso y para el núcleo pulposo propiedades isotrópicas homogéneas.

Mediante el uso de un programa de segmentación ósea se logró obtener una UFV L4-L5, a partir de imágenes tomográficas de una persona, de igual forma el disco intervertebral fue generado intentando asemejar la fisionomía real. La inclusión de las fibras del anillo fibroso se obtiene utilizando una formulación de la energía de deformación, consideración importante para lograr resultados más cercanos a los reportados en la literatura. La asignación de propiedades para las vértebras, se logra a partir de una correlación en función de la densidad aparente leída de la tomografía. El uso de las propiedades heterogéneas en las vértebras, a pesar de las numerosas variables que contenga, es importante porque aporta mayor semejanza al modelo numérico con la fisionomía vertebral, además de influir positivamente en el parámetro de la deformación, y de representar un aporte, ya que en la literatura numerosos trabajos consideran a las vértebras con

propiedades homogéneas isotrópicas. El uso de FED para las propiedades del anillo fibroso, permite la consideración de las fibras del anillo para geometrías irregulares, independizando las fibras de la malla a diferencia de si se utiliza las fibras como elementos tipo barra, disminuyendo los tiempos de mallado, ya que las mismas se obtienen a partir de la malla de elementos finitos del disco intervertebral.

3 REFERENCIAS

- [1]. Andresen, R., Werner, H., Schober, C., *Contribution of the cortical shell of vertebrae to mechanical behavior of the lumbar vertebrae with implications for predicting fracture risk*. The british journal of radiology, 71, 759-765, 1998.
- [2]. Morgan, E., Bayraktar, H., Keaveny, T., *Trabecular bone modulus-density relationship depend on anatomic site*. Journal of biomechanics, 36, 897-904, 2003.
- [3]. Perez, A., Calvo, B., Doblaré, M., *An accurate finite elements model of the cervical spine under quasi-static loading*. Journal of Biomechanics, 41, 523–531, 2008.
- [4]. Moramarco V., Perez A., Pappaletterea, P., Doblaré, M., *An accurate validation of a computational model of human lumbosacral segment*. Journal of biomechanics, 43,334–342, 2010.
- [5]. Holzapfel, G. A. *Biomechanics of soft tissue*. Computational biomechanics, 7, 1–12, 2012.
- [6]. Lammardo, A., Müller-Karger, Zambrano, L., *Análisis de la sensibilidad de las propiedades del material aplicadas a un modelo de disco intervertebral*. Pan american health care exchanges procedings, 2013.
- [7]. Coombs, D. J, Laz P.J, Rao, M., Smith S.D., Bushelow M., Rullkoetter P J. Stepwise validated finite element model of the human lumbar spine. Simulia Customer Conference, 1-15, 2012.
- [8]. Ansys (versión 14.0). [software]. (2012), www.ansys.com.
- [9]. Mimics (version 15.0). [software]. (2012), www.materialise.com.
- [10]. Image j, Image processing and Analysis in Java, [*Open source*], rsb.info.nih.gov

COMMUNITIES DETECTION IN DIFFERENT PROTEIN-PROTEIN INTERACTION NETWORKS USING LOUVAIN METHOD

C.E. Sanz-Rodríguez

sanzce@gmail.com

Coordinación de posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Simón Bolívar (U.S.B.)
Caracas-Venezuela, 1081-A.

Laboratorio de Dinámica Estocástica, Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (I.V.I.C.). Caracas-Venezuela. 1020-A.

A. J. Alvarez

alvarez.ciencia@gmail.com

Laboratorio de Dinámica Estocástica, Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (I.V.I.C.). Caracas-Venezuela. 1020-A.

J.L. Cabrera

juluisca@gmail.com

Laboratorio de Dinámica Estocástica, Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (I.V.I.C.). Caracas-Venezuela. 1020-A.

Abstract. *Biological networks show modular organization reflecting the complexity of their configuration and robustness. Here we analyze the network structure of protein-protein interaction from three different organism: C. elegans, S. cerevisiae, A. thaliana. An efficient method with relative low computer cost to detect networks communities is the Louvain method. This method was applied to the protein-protein interaction networks and the localization of essential genes (EG) was determined. Our results reveals a particular distribution of EG's emphasizing the relative importance of particular communities.*

Keywords: Complex network, community detection, essential genes, protein-protein interaction.

1. INTRODUCTION

Robustness of complex networks is an important current topic of research. So far, there are many approaches to study robustness, and between those them the centrality indexes are of particular use, this is the case of Grade centrality[1] and betweenness [2,3].

A remarkable characteristic of natural networks is their modularity [4]. One of the most popular algorithm used for community detection is known as the “Lovain method” [5]. In this work, we focused on the distribution of Essential Genes (EG) (which are to be removed genes that cause the collapse of the organism) in three organism. The EG’s were extracted from experimental data of organisms used generally like organisms models: *Caenorhabditis elegans* (worm) [6], *Saccharomyces cerevisiae* (yeast) [7] and *Arabidopsis thaliana* (plant) [8].

2. COMMUNITY DETECTION IMPLEMENTATION

The original file of each used network was cast in a .net file using NetworkX package for Python. Then, the networks were processed to estimated the community structure using the Louvain method [5] of Pajek package [9].

The Louvain method is an heuristic method based on the optimization of a modularity function [10] defined in Equation 1 by:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum \left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta_{ci,cj} \quad (1)$$

Here, $A_{i,j}$ is the network adjacency matrix, k_i , k_j are the connectivity of nodes i, j connectivity, m is the number of edges in the graph and $\delta_{ci,cj}$ is the kronecker delta for community i and comunidad j . In this study, each simulation was performed 100 times for each network. EG’s for each organism was obtained from Database for Essential Genes (DEG 10) [11].

For each community the average number of edges per node or grade $\langle k \rangle$ was estimated additionally the average betweenness $\langle B \rangle$ [12], defined in Eq. 2 by:

$$B(i) = \sum_{j,k} \frac{b_{jik}}{b_{jk}}$$

Here, b_{ij} is the total number of shortest paths from node i to node j (2) and b_{ijk} is the number of those paths that pass through k .

Figure 1, shows the community structure of the protein-protein interaction and the localization of EG's (highlighted in black) for *A. thaliana* network as a representative



system in this study is visualized,.

For *A. thaliana*, the original network has 4868 nodes and 11375 edges. The Louvain method classified 210 communities with 0.767380 of modularity, being this a very high value of modularity. It is important to note that any value of modularity larger than 0.3 is considered as a real partition [13]. From fig. 1, a non-homogeneity distribution of essential nodes is observed, just 36 out of 210 communities contains EG's, and 9 communities contained 60% of all 105 essential genes. A similar behavior can be obtained for *C. elegans* and *S. cerevisiae*. For *C. elegans*, the network is constituted for 4633 nodes and 65536 edges. The Louvain method classified 103 communities with 0.371508 of modularity value. Unlike *A. thaliana* where the essential nodes are contained in 36 communities, *C. elegans* has all 202 EG's in just 10 communities. In the case of *S. cerevisiae* the network has 2108 nodes and 2930 edges. The classification results in 215 communities and 0.782702 modularity. All 348 EG's reported for *S. cerevisiae* are distributed in 83 communities, but more than 60% (205) are in just 14 communities (Fig. 2).

To see if there are some clues to explain this distribution of EG's, next, using Pajek we calculated the average of grade, $\langle k \rangle$, and average betweenness, $\langle B \rangle$, for each

community. In fig. 3 we describe the distribution of essential genes depending on $\langle k \rangle$ and $\langle B \rangle$ in *A. thaliana*.

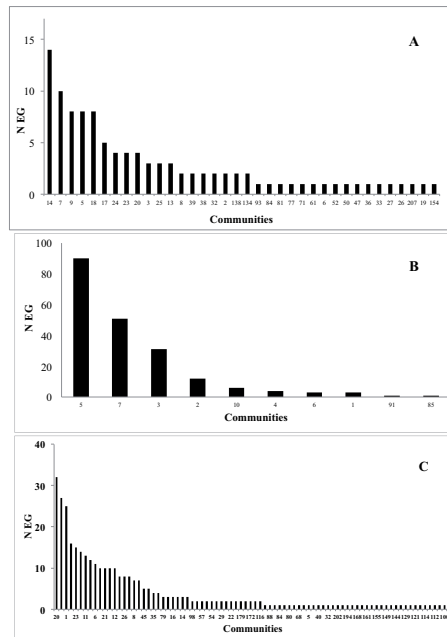


Figure 2. Distribution of number of essential genes in communities detected in protein-protein interaction networks using Louvain method. A. *A. thaliana*; B, *C. elegans*; C, *S. cerevisiae*.

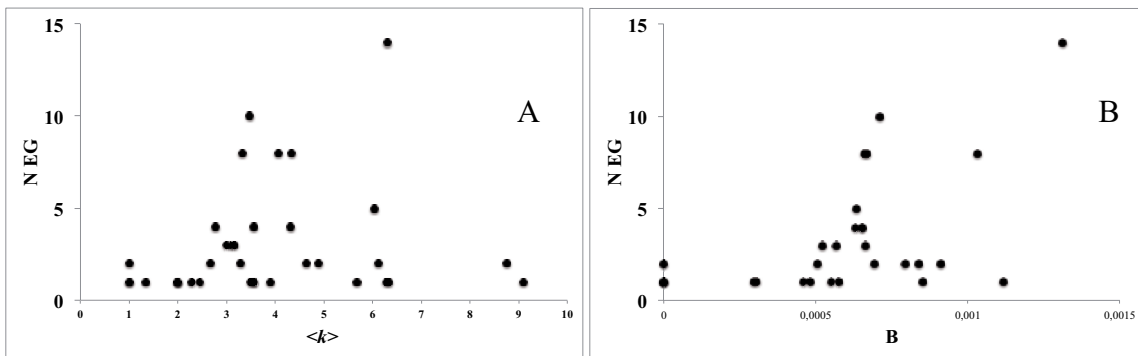


Figure 3. Distribution of average of k and B per community vs number of essential genes in *A. thaliana*. A. Distribution of $\langle k \rangle$. B. Distribution of $\langle B \rangle$.

3. CONCLUSION

Summarizing, the behavior of the distribution of the EG's, do not seem to show a correlation neither with k nor B . Remarkably, communities that concentrate most of EG have a $\langle k \rangle$ located in the central value region. A similar behavior is observed for B . This work shows this approach in communities structure could be useful to understand the relationship between topological stability and biological robustness. More effort is needed in this way to elucidate a model able to predict the EG occurrence in a Biological network.

Acknowledgements

This work was supported by IVIC-141 small research project.

REFERENCES

- [1].Barabási A, Oltvai ZN. Network biology: understanding the cell's functional organization. *Nature Reviews Genetics*. 2004;5:101–13.
- [2].Guimerà R, Amaral LAN. Functional cartography of complex metabolic networks. *Nature*. 2005 Feb 24;433(7028): 895–900.
- [3].Gandhi TKB, Zhong J, Mathivanan S, Karthick L, Chandrika KN, Mohan SS, Sharma S, Pinkert S, Nagaraju S, Periaswamy B, Mishra G, Nandakumar K, Shen B, Deshpande N, Nayak R, Sarker M, Boeke JD, Parmigiani G, Schultz J, Bader JS, Pandey A. Analysis of the human protein interactome and comparison with yeast, worm and fly interaction datasets. *Nature genetics*. 2006 Mar;38(3):285–93.
- [4].Newman MEJ. Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006 Jun 6;103(23):8577–82.
- [5].Blondel VD, Guillaume J-L, Lambiotte R, Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks. *arXiv.org*. 2008.
- [6].Simonis N, Rual J-F, Carvunis A-R, Tasan M, Lemmens I, Hirozane-Kishikawa T, Hao T, Sahalie JM, Venkatesan K, Gebreab F, Cevik S, Klitgord N, Fan C, Braun P, Li N, Ayivi-Guedehoussou N, Dann E, Bertin N, Szeto D, Dricot A, Yildirim MA, Lin C, de Smet A-S, Kao H-L, Simon C, Smolyar A, Ahn JS, Tewari M, Boxem M, Milstein S, Yu H, Dreze M, Vandenhaute J, Gunsalus KC, Cusick ME, Hill DE, Tavernier J, Roth FP, Vidal M. Empirically controlled mapping of the *Caenorhabditis elegans* protein-protein interactome network. *Nature Methods*. 2009 Jan;6(1):47–54.

- [7]. Yu H, Braun P, Yildirim MA, Lemmens I, Venkatesan K, Sahalie J, Hirozane-Kishikawa T, Gebreab F, Li N, Simonis N, Hao T, Rual J-F, Dricot A, Vazquez A, Murray RR, Simon C, Tardivo L, Tam S, Svrikapa N, Fan C, de Smet A-S, Motyl A, Hudson ME, Park J, Xin X, Cusick ME, Moore T, Boone C, Snyder M, Roth FP, Barabási A-L, Tavernier J, Hill DE, Vidal M. High-quality binary protein interaction map of the yeast interactome network. *Science*. 2008 Oct 3;322(5898):104–10.
- [8]. Arabidopsis Interactome Mapping Consortium, Dreze M, Carvunis AR, Charlotiaux B, Galli M, Pevzner SJ, Tasan M, Ahn YY, Balumuri P, Barabási A-L, Bautista V, Braun P, Byrdsong D, Chen H, Chesnut JD, Cusick ME, Dangl JL, de los Reyes C, Dricot A, Duarte M, Ecker JR, Fan C, Gai L, Gebreab F, Ghoshal G, Gilles P, Gutierrez BJ, Hao T, Hill DE, Kim CJ, Kim RC, Lurin C, MacWilliams A, Matrubutham U, Milenkovic T, Mirchandani J, Monachello D, Moore J, Mukhtar MS, Olivares E, Patnaik S, Poulin MM, Przulj N, Quan R, Rabello S, Ramaswamy G, Reichert P, Rietman EA, Rolland T, Romero V, Roth FP, Santhanam B, Schmitz RJ, Shinn P, Spooner W, Stein J, Swamilingiah GM, Tam S, Vandenhoute J, Vidal M, Waaijers S, Ware D, Weiner EM, Wu S, Yazaki J. Evidence for Network Evolution in an Arabidopsis Interactome Map. *Science*. 2011 Jul 28;333(6042):601–7.
- [9]. de Nooy W, Mrvar A, Batagelj V. *Exploratory Social Network Analysis with Pajek*. Cambridge University Press; 2005. 1 p.
- [10]. Newman MEJ, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E: Statistical and Nonlinear Soft Matter Physics*. 2004 Feb 1;69(2 Pt 2):026113.
- [11]. Luo H, Lin Y, Gao F, Zhang C-T, Zhang R. DEG 10, an update of the database of essential genes that includes both protein-coding genes and noncoding genomic elements. *Nucleic Acids Research*. 2013 Nov 15.
- [12]. Freeman LC. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*. JSTOR; 1977;:35–41.
- [13]. Fortunato S. Community detection in graphs. *Physics Reports*. 2010 Feb 1;486:75.

ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES EN REGISTROS CONTINUOS DE GLUCOSA: UN ENFOQUE BASADO EN REPRESENTACIÓN POCO DENSA EN DICCIONARIOS REDUNDANTES

Jimer C. Ramírez

José L. Paredes

Rubén D. Rojas

jimer@ula.ve

paredesj@ula.ve

rdrojas@ula.ve

Centro de Ingeniería Biomédica y Telemedicina, Universidad De Los Andes, Mérida-Venezuela

Resumen. *En este artículo se propone un novedoso método de estimación de datos no registrados de glucosa que han sido adquiridos erradamente con dispositivos de monitoreo continuo de glucosa (CGM). El problema de la estimación es resuelto bajo el argumento que el o los registros faltantes se puedan aproximar por la superposición de señales prototipos (átomos) de un diccionario redundante que se ajusta apropiadamente a los datos efectivamente registrados. El diccionario es entrenado a través del método K-times Singular Value Decomposition (K-SVD) a fin de encontrar los átomos del diccionario más adecuado que permita la mejor representación de la señal con restricciones de poca densidad. Se utiliza el algoritmo Orthogonal Matching Pursuit para encontrar la mejor representación de la señal de glucosa registrada. El proceso de estimación de registros faltantes se realiza por bloques solapados, se compara el desempeño del método de interpolación propuesto con un método convencional de interpolación, así como con un algoritmo recientemente propuesto en la literatura [1].*

Palabras clave: Estimación de datos faltantes, monitoreo continuo de glucosa, representación poco densa, diccionarios redundantes

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años diversos estudios se han centrado en la predicción de glucosa de pacientes diabéticos usando modelos que dependen de los registros adquiridos. Dichos datos son proporcionados por dispositivos de monitoreo continuo de glucosa (CGM) los cuales son capaces de registrar en tiempo real los niveles de glucosa en sangre de pacientes diabéticos, con periodos

de muestreo continuos de 1 a 5 min. En los modelos desarrollados que dependen de los datos es común excluir grupos de datos de glucosa de pacientes diabéticos por diferentes causas [2, 3], influyendo negativamente en la exactitud de los modelos desarrollados. Los modelos desarrollados con data incompleta pudieran no describir algún comportamiento característico de la dinámica de la glucosa, surgiendo así la necesidad de desarrollar algoritmos que permitan la estimación de estos datos faltantes previo al desarrollo de los modelos dependientes de la data. Para hacer frente a esta dificultad, en este artículo, se ha desarrollado un método de interpolación de datos que ataca el problema desde un enfoque diferente a los métodos de interpolación tradicional. Este método tiene como particularidad que esta basado en la representación poco densa de señales con la utilización de diccionarios entrenados construidos a partir de segmentos de datos de glucosa registrados apropiadamente, además de incorporar un procesamiento de datos más robusto que los métodos de interpolación tradicional.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Sea \mathbf{z} un vector que contiene los N datos de glucosa registrados por un dispositivo CGM durante un intervalo T ($\mathbf{z} \in \mathbb{R}^N$). Considere que la toma de muestra es realizada en forma uniforme cada T_s minutos de forma que $T = (N - 1)T_s$. Considere también que en el instante $T_p = (p - 1)T_s$ ocurre una falla en el dispositivo de registro y no se registran más muestras sino hasta el instante $T_k = (p + m - 1)T_s$, donde, $T_p, T_k \subseteq T$ y $p, m \in \mathbb{N}$. Es decir, de la muestra p hasta la muestra $p + m - 1$, no se registran datos de glucosa. Adicionalmente, considere que el valor de glucosa adquirido se relaciona con el valor de glucosa verdadero a través de una relación lineal, de la forma

$$\mathbf{z} = \mathbf{\Lambda}(\mathbf{y} + \xi) \quad (1)$$

donde \mathbf{y} representa un vector N -dimensional que contiene los niveles verdaderos de glucosa en sangre, ξ el vector que modela el ruido introducido por el proceso de adquisición ($\xi \in \mathbb{R}^N$), incluyendo ruido térmico, ruido dependiente de la tecnología del sensor, errores de calibración e interferencia causada por terceras fuentes [2, 3], y $\mathbf{\Lambda}$ es una matriz diagonal binaria cuyos elementos en la diagonal principal están definidos por

$$\Lambda_{i,i} = \begin{cases} 0 & \text{si } p \leq i < p + m \\ 1 & \text{para otros valores} \end{cases} \quad (2)$$

Observe que, los datos no registrados por el CGM toman el valor de cero en el vector N -dimensional \mathbf{z} . Aunque un modelo más general permitiría que muestras no registradas ocurran en forma aleatoria a lo largo del vector \mathbf{z} , en este estudio se considerará que los datos no registrados ocurren en bloques de m muestras consecutivas ubicadas en forma aleatoria. Esta suposición es acorde a lo que se ha observado en base de datos de CGM y lo que ha sido reportado por terceros [1].

Así, el objetivo del proceso de estimación de la señal de glucosa es determinar el (o los) valor (es) de glucosa no registrado (s) a partir de las muestras registradas con ruido, esto es:

$$\begin{array}{ll} \text{dado } \mathbf{z}_i & \text{para } i \in \{1, 2, \dots, p - 1\} \cup \{p + m, p + m + 1, \dots, N\} \\ \text{determinar } \mathbf{z}_k & \text{para } p \leq k < p + m \end{array}$$

3. ESTIMACIÓN/INTERPOLACIÓN DE REGISTROS CONTINUOS DE GLUCOSA BASADO EN REPRESENTACIÓN POCO DENSA

Consideré que la secuencia de valores de glucosa $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^N$, tiene una representación poco densa en algún dominio expandido por las funciones base de una transformada apropiadamente seleccionada y/o de un diccionario de funciones parametrizadas a_i , $i = \{1, 2, \dots, K\}$ diseñado. Dicho de otra forma, \mathbf{y} puede ser escrito como la superposición de algunas pocas señales elementales $\mathbf{a}_j \in \mathbb{R}^N$. Así, \mathbf{y} puede representarse como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (3)$$

Donde $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \mid \mathbf{a}_2 \mid \dots \mid \mathbf{a}_K]$ es la matriz $N \times K$ en cuyas columnas están dispuestas las señales elementales o átomos $\{\mathbf{a}_j\}_{j=1}^K$, con norma l_2 unitaria y que no necesariamente deban ser ortogonales entre sí. A esta matriz se refieren comúnmente en la literatura como diccionario de funciones básicas. En la Ec. (3), $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_K]^T$ es el conjunto de coeficientes de representación de la señal \mathbf{y} en el diccionario \mathbf{A} . Estos coeficientes presentan la particularidad de que la mayoría son iguales a cero y unos muy pocos toman valores elevados, siendo x_j la contribución de la j -ésima forma de onda a la formación de \mathbf{y} , y K pudiera ser en general mayor o igual a N .

Suponga que se cuenta con una versión incompleta y posiblemente contaminada de \mathbf{y} tal que $\mathbf{z} = \mathbf{\Lambda}(\mathbf{y} + \xi)$, donde $\mathbf{\Lambda} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ está definida en Ec. (2). Se define $\hat{\mathbf{z}} = \hat{\mathbf{\Lambda}}(\mathbf{y} + \xi)$, donde $\hat{\mathbf{z}}$ contiene las muestras registradas por el CGM, es decir, los valores no nulos de \mathbf{z} y $\hat{\mathbf{\Lambda}}$ se forma al eliminar las filas que corresponden a los ceros en la diagonal principal de $\mathbf{\Lambda}$, por lo tanto, la matriz $\hat{\mathbf{\Lambda}}$ es de tamaño $(N - m) \times N$. El enfoque de estimación/interpolación que se propone intenta recuperar el vector de coeficientes $\hat{\mathbf{x}}$ que reconstruya o aproxime lo mejor posible la señal $\hat{\mathbf{z}}$ como una combinación lineal de algunos pocos átomos del diccionario \mathbf{A} a partir de las muestras $\hat{\mathbf{z}}$. Una vez determinado $\hat{\mathbf{x}}$ es posible estimar los valores de glucosa faltantes. Considerando esto como un problema inverso, el problema de estimación/interpolación se puede formular como la solución al problema de optimización

$$\arg_{\mathbf{x}} \min \|\mathbf{x}\|_0 \text{ sujeto a } \hat{\mathbf{z}} = \hat{\mathbf{\Lambda}}\mathbf{A}\mathbf{x} \quad (4)$$

Al encontrar la solución $\hat{\mathbf{x}}$ a este problema de optimización, la señal de glucosa viene dada como $\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$.

En la literatura de representación poco densa de señales existen multiples algoritmos que permiten resolver el problema inverso de la Ec. (4). En este estudio se seleccionó el algoritmo *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP) [4], el cual es un algoritmo de optimización iterativa de la clase búsqueda voraz (del inglés *greedy-pursuit*), que tiene como objetivo encontrar el átomo \mathbf{a}_j del diccionario \mathbf{A} que tenga la mayor correlación con la señal de entrada $\hat{\mathbf{z}}$, remueve la contribución de dicho átomo en la señal definiéndose una señal residuo \mathbf{r} , se busca luego el vector \mathbf{a}_j que mejor se ajuste a este residuo. Se procede de forma iterativa hasta alcanzar un criterio de parada o un número máximo de iteraciones preespecificado.

3.1. Definición del diccionario \mathbf{A}

Un problema que surge naturalmente es la definición o escogencia del diccionario de funciones parametrizadas que mejor aproximen los datos de glucosa registrados. Un primer enfoque selecciona los elementos del diccionario \mathbf{A} como conocidos y fijos (preespecificado). Se considera que los datos de glucosa pueden ser apropiadamente representados por una base ortogonal, tal como la transformada discreta del coseno, las bases wavelet o por combinación de estas bases ortogonales, originándose diccionarios completos cuando $K = N$ o sobrecompletos para $K > N$. En un segundo enfoque los átomos del diccionario se diseñan a partir de bases de datos de registro del CGM. En este método los átomos se adaptan apropiadamente en función de representar los registros de glucosa lo más eficiente posible, es decir, con el uso del menor número de átomos que mejor aproxime a los registros. Aunque existen varios métodos de entrenamiento de diccionarios a partir de los datos, en nuestro estudio se usará el algoritmo propuesto por M. Aharon y col. denominado algoritmo K -SVD (descomposición en valores singulares K veces) [5]. En dicho algoritmo dado un conjunto de señales de entrenamiento $\{z_i\}_{i=1}^K$ se busca el diccionario \mathbf{A} que represente lo mejor posible cada miembro de ese conjunto con restricciones de poca densidad. Para mayores detalles ver [5].

3.2. Procesamiento de la señal de glucosa

La señal de glucosa será procesada *bloque por bloque*. Sea $n \in \mathbb{N}$, el tamaño de la ventana de observación, esta ventana al pasar sobre la señal de glucosa de N muestras forma bloques $\mathcal{P}_i(\mathbf{z})$ de tamaño n , el índice i indica la posición de la primer muestra del bloque. La ventana de observación es movida b muestras hacia la derecha para definir la siguiente ventana de observación hasta procesar completamente la señal de glucosa para $(1 < b \leq n)$, donde b se conoce como índice de solapamiento. Cada grupo de muestras en la ventana de observación es procesado con el OMP a fin de devolver su correspondiente vector de representación $\hat{\mathbf{x}}$, y este a su vez devuelve un bloque de la señal de glucosa reconstruido a través de $\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$. Así, el problema de representación objetivo en términos del bloque de niveles verdaderos de glucosa es:

$$\mathbf{y}_{\mathcal{P}_i} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{\mathcal{P}_i} \quad (5)$$

donde $\hat{\mathbf{x}}_{\mathcal{P}_i}$ es el vector de coeficientes de representación poco densa correspondiente al bloque $\mathcal{P}_i(\mathbf{y})$ y \mathbf{A} un diccionario apropiadamente definido o diseñado. Ahora el problema de estimación/interpolación de cada bloque de glucosa adquirido $\mathcal{P}_i(\mathbf{z})$ se puede reescribir como la solución al problema de optimización:

$$\arg_{\mathbf{x}} \min \left\| \hat{\mathbf{z}}_{\mathcal{P}_i} - \hat{\mathbf{\Lambda}}_{\mathcal{P}_i} \mathbf{A} \mathbf{x}_{\mathcal{P}_i} \right\|_2^2 \text{ sujeto a } \|\mathbf{x}_{\mathcal{P}_i}\| \leq T_0 \quad (6)$$

donde $\hat{\mathbf{\Lambda}}_{\mathcal{P}_i}$ y $\hat{\mathbf{z}}_{\mathcal{P}_i}$, se forman al definir el bloque $\mathcal{P}_i(\mathbf{z})$.

La señal reconstruida $\hat{\mathbf{y}}$ debe considerar la media o la mediana entre los datos solapados devueltos en cada estimación de $\mathcal{P}_i(\mathbf{z})$. Cada dato \hat{y}_i en cada bloque será estimado \mathcal{W}_i veces, $(1 \leq \mathcal{W}_i \leq n$ con $\mathcal{W}_i \in \mathbb{N})$. El número de veces que se pueda estimar cada dato depende del tamaño de la señal, tamaño del bloque, posición del dato y el índice de solapamiento.

La señal estimada final $\hat{\mathbf{y}}_f$ será la resultante de cambiar las muestras desconocidas de la señal de glucosa adquirida \mathbf{z} por los datos estimados de $\hat{\mathbf{y}}$ que le correspondan. Así una estimación directa del bloque reconstruido final es:

$$\mathcal{P}_i(\hat{\mathbf{y}}_f) = \mathbf{z}_{\mathcal{P}_i} + (I - \mathbf{\Lambda}_{\mathcal{P}_i})\hat{\mathbf{y}}_{\mathcal{P}_i} \quad (7)$$

Donde I es la matriz identidad y $\hat{\mathbf{y}}_{\mathcal{P}_i}$ es el bloque correspondiente de la señal estimada preliminar $\hat{\mathbf{y}}$.

4. SIMULACIONES

En esta sección, se presentan simulaciones y curvas de errores o medidas de desempeño que ilustran la efectividad del método de estimación/interpolación propuesto para encontrar los valores desconocidos en los registros continuos de glucosa, se procedió a comparar los resultados del mismo con un método de interpolación tradicional (*spline*) y con el método reportado en [1].

Se cuenta con registros continuos de glucosa de un paciente diabético tipo 1, adquiridos bajo condiciones de vida libre por 4 semanas, el periodo de muestreo es de 5 min. Estos registros presentan segmentos de datos desconocidos en todas las semanas, impidiendo tener continuidad en el tiempo de los datos disponibles. Para cuantificar el desempeño de los diferentes métodos de interpolación se seleccionaron 5 segmentos de datos continuos efectivamente registrados, cada segmento está compuesto de 256 muestras, en estos segmentos se generan de forma aleatoria huecos o datos consecutivos iguales a cero ($1 \leq m \leq 15$) para simular los datos no registrados (representan tiempos de 5 a 75 min). Luego estos valores son interpolados por los diferentes métodos anteriormente nombrados y se calcula el RMSE (raíz del error medio cuadrático) cometido por cada uno de los métodos. El RMSE en todas las simulaciones fue calculado a partir de 815 diferentes valores obtenidos a partir de los 5 segmentos de datos seleccionados del paciente.

La ventana de observación se fijó en $n = 32$, valor que representa para los datos de glucosa usados un tiempo de observación de 160 min, (tiempo soportado en [6]).

El tamaño del diccionario es de $n \times 4n$, donde n representa el tamaño de la ventana de observación. El problema de aproximación restringida por poca densidad se resuelve para un $T_0 = 10$ y el procesamiento se realiza para bloques completamente solapados, es decir, $b = 1$. Se usó un diccionario entrenado a partir del *K-SVD* [7]. Este diccionario fue construido utilizando la data disponible sin tomar en cuenta los bloques de datos donde no se registraron valores, para realizar el entrenamiento se generaron bloques de tamaño n , el diccionario se construyó con bloques de señal no solapados, la matriz para este caso tiene un tamaño de (32×161) y la aproximación por poca densidad se fija en $T_0 = 10$.

Los resultados se presentan en la Fig. 1, en la cual se muestra el RMSE obtenido por el método de interpolación *spline* incluido en el paquete *Mathematics* de MATLAB, el método recientemente reportado en la literatura [1], que para fines de este trabajo, se representa en la Fig. 1 con el nombre de “lingap” y el método descrito en este trabajo, representado en la misma figura con el nombre de “interpcs”.

En la Fig. 1 se observa que el método propuesto en este trabajo, mejora el rendimiento del método [1] y del método *spline*. La mejoría en el rendimiento se aprecia significativamente para 5 muestras desconocidas en adelante, lo que indica que el comportamiento del método propuesto puede ser

una buena elección para tratar problemas de datos faltantes en los registros continuos de glucosa. Es importante mencionar que el método propuesto ajusta las señales de interés a diferentes formas de ondas, mientras que la mayoría de los métodos existentes de interpolación ajustan los datos a formas y funciones específicas, tales como funciones polinomiales.

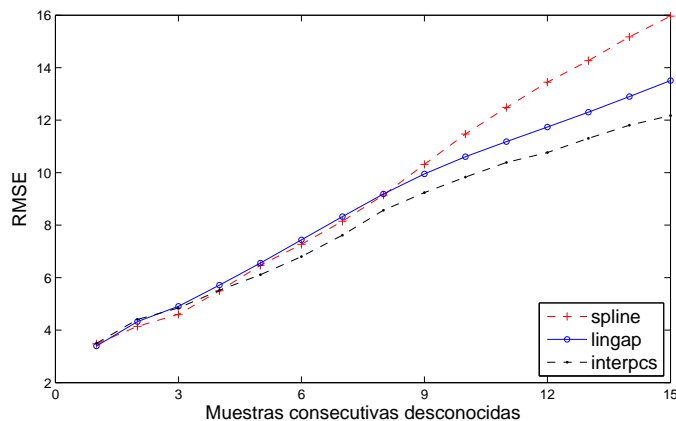


Figura 1: Comparación del desempeño de los diferentes métodos de interpolación para datos de glucosa variando el tamaño de los bloques interpolados.

5. CONCLUSIÓN

En este artículo, se desarrolló un método novedoso de estimación/interpolación de datos de CGM. El método propuesto usa la representación poco densa de señales de glucosa para interpolar datos perdidos en los registros continuos de glucosa. El método es capaz de interpolar con bastante eficiencia hasta 15 muestras consecutivas no registradas por los CGM, este número de muestras representa 75 minutos de datos no adquiridos. El tipo de procesamiento utilizado permite explotar la información contenida alrededor del grupo de muestras desconocidas. Se demostró que el método propuesto supera el rendimiento de los métodos de interpolación tradicional. Aunque nosotros enfocamos nuestra atención en interpolar datos de niveles de glucosa, este método puede ser extendido a otros tipos de señales y aplicaciones que involucren resolver el problema de la interpolación de datos.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el CDCHTA bajo el proyecto CDCHTA I-1336-12-02-B.

REFERENCIAS

- [1] STEPHANIE J. FONDA, & COL., Minding the Gaps in Continuous Glucose Monitoring: A Method to Repair Gaps to Achieve More Accurate Glucometrics. *Journal of Diabetes Science and Technology*, vol. 7, n. 1, pp. 88-92, 2013.
- [2] SANTHISAGAR VADDIRAJU, & COL., Technologies for Continuous Glucose Monitoring: Current Problems and Future Promises. *Journal of Diabetes Science and Technology*, vol. 4, n. 6, pp. 1540-1562, 2010.
- [3] NEESHA RAMCHANDANI, & COL., Real-Life Utilization of Real-Time Continuous Glucose Monitoring: The Complete Picture. *Journal of Diabetes Science and Technology*, vol. 5, n. 4, pp. 860-870, 2011.
- [4] JOEL A. TROPP, & ANNA C. GILBERT, Signal Recovery From Random Measurements Via Orthogonal Matching Pursuit. *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY*, vol. 5, n. 12, pp. 4655-4666, 2007.
- [5] MICHAL AHARON, & COL., K-SVD: An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation. *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, vol. 54, n. 11, pp. 4311-4322, 2006.
- [6] YINGHUI LU, & COL., The Importance of Different Frequency Bands in Predicting Subcutaneous Glucose Concentration in Type 1 Diabetic Patients. *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, vol. 5, n. 8, pp. 1839-1845, 2010.
- [7] RON RUBINSTEIN, & COL., *Efficient Implementation of the K-SVD Algorithm using Batch Orthogonal Matching Pursuit*. Reporte Técnico, Technicon - Israel Institute of Technology, 2008.

SIMULACIÓN NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS DE LA FABRICACIÓN DE UNA PRÓTESIS DE PIE USANDO MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICO. REVISIÓN DE LOS MATERIALES

María Virginia Candal

mcandal@usb.ve

Grupo de Polímeros. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar.
Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela

Orlando Pelliccioni

Carmen Müller-Karger

orlandop@usb.ve

cmuller@usb.ve

Grupo de Biomecánica. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar.
Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela

Resumen: *En la actualidad, se encuentran en el mercado, prótesis fabricadas con una gran variedad de polímeros; esto es debido a las propiedades tan versátiles que los han hecho destacarse frente a otros materiales (metales y madera). Entre estas propiedades se encuentran la facilidad para ser procesados y su bajo costo, además de sus buenas propiedades físicas y mecánicas. En la fabricación de dichas prótesis de materiales poliméricos se pueden emplear diversas técnicas de manufactura. Entre ellas, se encuentra el proceso de inyección, el cual permite obtener piezas a una alta velocidad de producción y con muy buena calidad. Hoy en día existen herramientas informáticas de ingeniería asistida por computadora (CAE), que facilitan la simulación numérica del proceso de inyección de los polímeros, debido a que se pueden representar las diferentes etapas del proceso de transformación, como lo son llenado, enfriamiento y compactación de la pieza, sin necesidad de llevar a cabo numerosas pruebas en la máquina de inyección, lo cual ahorra mucho tiempo y dinero. En este trabajo se presenta un estudio detallado de la optimización del tiempo de fabricación por inyección de un prototipo de prótesis de pie dinámico mediante simulación numérica. Para la simulación se empleó como material para su fabricación, la poliamida. La propuesta de esta componente de prótesis fue desarrollada en el Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar (Venezuela). Se obtuvo que el tiempo de fabricación de la prótesis se puede reducir hasta 474 segundos, con una baja contracción volumétrica y alabeo de la pieza, optimizando las variables del proceso.*

Palabras claves: piezas gruesas, moldeo por inyección, *Moldflow*

1. INTRODUCCIÓN

Las prótesis son elementos desarrollados con la finalidad de mejorar o reemplazar una función, una parte o un miembro completo del cuerpo humano afectado, por lo tanto, una prótesis para el paciente amputado, también colabora con el desarrollo psicológico del mismo, creando una percepción de totalidad al recobrar movilidad y aspecto. En particular, una prótesis de pie provee las funciones de simulación de la articulación, absorción de impacto o energía, ser una base estable de soporte de peso y simulación del músculo. Existen diversos tipos de prótesis de pie, entre ellos se destacan las de tipo dinámico, el cual por sus características de amortiguación y efecto resorte, acumula la energía utilizada y la retorna al momento del despegue de los dedos lo que le ofrece al paciente un retroceso elástico, el cual facilita una marcha activa [1]. El avance en el diseño de las prótesis ha estado ligado directamente con el avance en el manejo de los materiales empleados por el hombre, así como el desarrollo tecnológico y el entendimiento de la biomecánica del cuerpo humano. En cuanto a los materiales, específicamente, los polímeros y sus tecnologías de fabricación, cada día abren un horizonte más amplio en el desarrollo de componentes protésicas. Es por ello, que Figueroa y Müller-Karger [2-3] en el Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar (USB) diseñaron una prótesis para amputaciones transtibiales (Fig 1), específicamente un modelo de pie artificial dinámico que busca satisfacer las necesidades de personas discapacitadas dentro del Nivel 2 de Funcionalidad. Se propuso su fabricación en Polióxido de Metileno (POM). Posteriormente, Candal *et al.* [4] presentaron el diseño de un molde para la fabricación de la componente apoyándose en la simulación numérica del proceso de inyección y empleando el mismo material propuesto por los autores anteriores. Seguidamente, Pelliccioni *et al.* [5] presentaron un análisis comparativo entre diferentes materiales poliméricos para la inyección de la prótesis de pie dinámico, encontrándose que el empleo de Poliamida (PA), otro material de tipo ingenieril, permite su fabricación en un tiempo mucho menor que el resto de los materiales estudiados (POM y Polipropileno (PP)).

2. METODOLOGÍA

Geometría evaluada: La pieza en estudio fue un prototipo de prótesis de pie dinámico diseñada en el grupo de Biomecánica de la USB (Fig. 1). Se diseñó un molde para inyectar una sola prótesis a la vez, mostrado previamente por Candal *et al.* [4] y Pelliccioni *et al.* [5]. Éste consta de un sistema de alimentación de colada fría con entrada directa desde el bebedero hasta la cavidad, y un sistema de refrigeración formado por 10 canales de 20 mm de diámetro: cuatro de ellos son pasantes, dos tienen forma de “U”, dos tienen forma de escalón y dos tienen un *baffle* (sistemas de refrigeración internos) cada uno por la complejidad de la pieza (Fig. 2). El plano de partición del molde se ubica en el plano de simetría de la componente protésica (Fig. 1).

Mallado: Se definió un análisis tridimensional para la simulación, empleado el programa *Autodesk Moldflow Insight 11*, seleccionando elementos planos tetraédricos. El análisis de convergencia fijó una malla de 7705 nodos y 40431 elementos para discretizar la pieza de estudio.

Asignación del material: El material empleado para la simulación del proceso de inyección de la prótesis es la PA6 Zitel HTN FE8200 NC010 de la casa comercial *Dupont Europa*, que se caracteriza por poseer un índice de fluidez (MFI) de 30,0 g/10 min (275/5.0), una densidad de 1,13 g/cm³ y un módulo tensil de 2190 MPa.

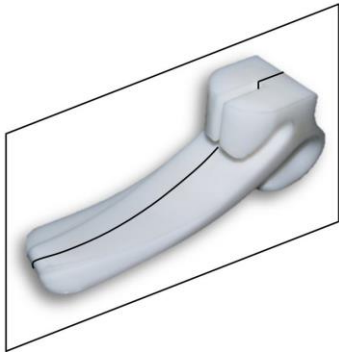


Figura 1- Prótesis de pie dinámica diseñada en el grupo de Biomecánica de la USB.

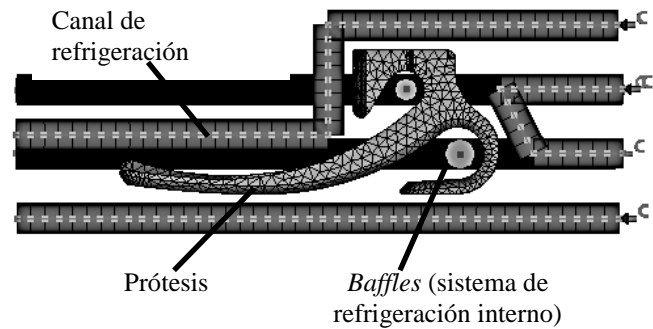


Figura 2- Molde de inyección propuesto para la prótesis de pie.

Ajuste de variables: El proceso de inyección se llevó a cabo para todas las simulaciones manteniendo el número de Reynolds en 10000, el fluido refrigerante como aceite y el material recomendado para el molde es acero P20. La máquina de inyección empleada para la simulación fue una genérica con fuerza de cierre de 150 Ton. Los rangos de valores estudiados para lograr la optimización del tiempo de ciclo de la prótesis de pie fueron: Temperatura de molde=60–100°C, Temperatura de fundido=320–330°C, Velocidad de inyección=20–40 cm³/s, Tiempo de presión sostenida=30-180 segundos y Presión sostenida= 50–200 MPa.

3. EFECTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE INYECCIÓN SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE CICLO

Inicialmente, se llevó a cabo el estudio del prototipo de prótesis de pie dinámica con algunos de los materiales poliméricos propuestos para tal fin, los cuales fueron mencionados por Figueroa y Müller-Karger [2-3] como son: POM, PA y PP. Se propuso el empleo de POM para la fabricación de la prótesis por ser un material rígido, resistente al impacto, a la fatiga y a la abrasión, requisitos indispensables para el correcto funcionamiento de la misma. Aunque estos autores reportan buenos resultados de la misma en cuanto a comportamiento mecánico, Candal *et al.* [4] encontraron que el tiempo de fabricación de la pieza es de 600 s (10 min), lo que representa un valor sumamente elevado que trae consigo degradación del material dentro de la cavidad del molde de inyección, perdiendo sus propiedades mecánicas. Además, es el polímero que presenta las mayores contracciones volumétricas (19%) y la mayor deformación de todos los materiales estudiados. Por estas razones, el POM fue descartado para la fabricación del dispositivo por el moldeo de inyección. Posteriormente, Pelliccioni *et al.* [5] propuso el empleo de PP por su bajo costo, por ser de fabricación nacional, además de ser fácil de procesar al requerir menores temperaturas de procesamiento. Sin embargo, este material presentó los resultados más desfavorables durante su inyección y el tiempo de fabricación de la prótesis obtenido fue de 1117 s (19 min). De allí que se propuso el empleo de PA porque permite la fabricación de la pieza en un tiempo menor. Por lo que el objetivo principal de esta investigación es presentar la optimización del tiempo de fabricación y la reducción de la contracción y deformación de la prótesis de pie estudiando el efecto de las variables del proceso de inyección.

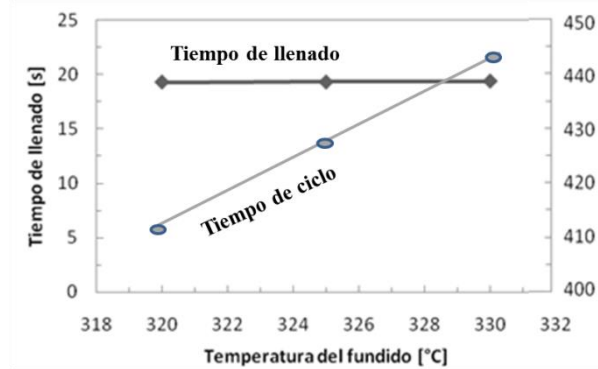


Figura 3- Tiempos de llenado y de ciclo en función de la temperatura del fundido.

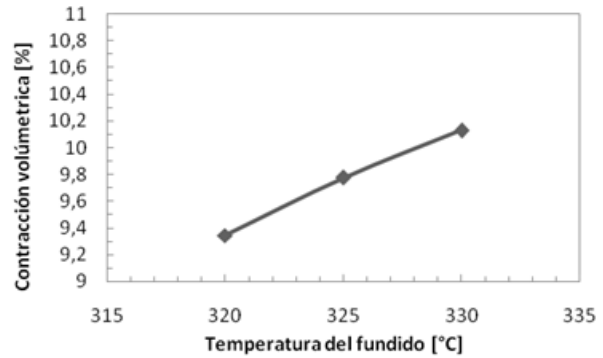


Figura 4- Contracción volumétrica con respecto a la temperatura del fundido.

a) Efecto de la temperatura del fundido: esta variable es de gran importancia al momento de definir las condiciones del proceso de inyección, ya que, al modificarla varía el comportamiento del flujo del material, produciendo cambios en la densidad y viscosidad del mismo. La fluidez del material puede influir en resultados como: la deformación lineal, la temperatura de desmoldeo, el alabeo, el tiempo de llenado y el tiempo de ciclo [6]. El tiempo de llenado se mantiene constante al modificar la temperatura del fundido, en 19 s (Fig 3). Sin embargo, se esperaba que al elevar esta temperatura, el tiempo de llenado disminuiría, debido al decremento de la viscosidad del polímero, que al estar más fluido se inyectaría más rápidamente [6]. Esto se puede deber a que el rango de temperatura evaluado es muy estrecho como para influir en el tiempo de llenado, o que la velocidad de inyección fijada es muy alta como para que la viscosidad del material sea relevante. A pesar de que el tiempo de llenado se mantuvo constante, se obtuvo que a medida que se incrementa la temperatura de fundido, el tiempo de fabricación de la prótesis se incrementaba en un 8%. Este resultado era de esperarse debido a que temperaturas de fundido altas requieren un mayor tiempo de enfriamiento, el cual representa la mayor parte del tiempo de ciclo (Fig 3).

Para la fase de compactación, la Fig 4 muestra el efecto de la temperatura de fundido sobre la contracción volumétrica. Al incrementarse la temperatura se nota un aumento de la contracción volumétrica, en un orden de entre 9,3 y 10,2%. Esta tendencia se puede explicar desde el punto de vista termodinámico, ya que, al disminuir la temperatura del fundido en este material semicristalino, esto implica un decrecimiento de la movilidad molecular de la resina polimérica, por lo que la formación de cristales se dificulta, es decir, el reordenamiento y compactación molecular se ve desfavorecido, y de esta manera, se disminuye la contracción del material [8]. De esta manera, evaluando los resultados anteriores se puede considerar que la temperatura del fundido óptima debe estar en el orden de los 320°C, favoreciendo de esta manera, un menor tiempo de ciclo y consumo energético con menores contracciones.

b) Efecto de la temperatura del molde: los resultados no mostraron variaciones en ninguna de las fases de inyección. En definitiva, se escogió 70°C como temperatura de molde para aumentar la rapidez del enfriamiento, a pesar de que con 60°C se lograría una mayor reducción del consumo energético. No es recomendable emplear temperaturas de molde muy bajas ya que pueden producir una mala calidad en el acabado de la pieza [7].

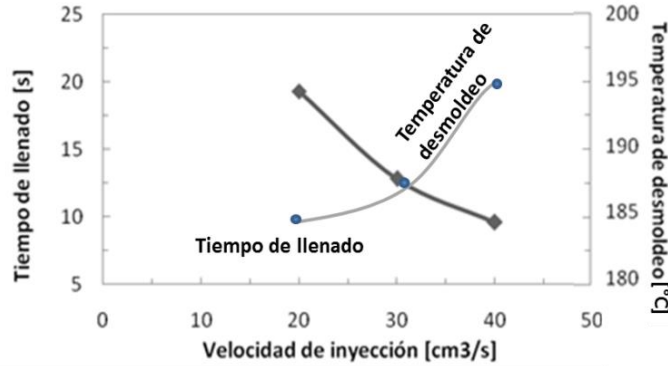


Figura 5-Tiempo de llenado y Temperatura de desmoldeo con respecto a la velocidad de inyección

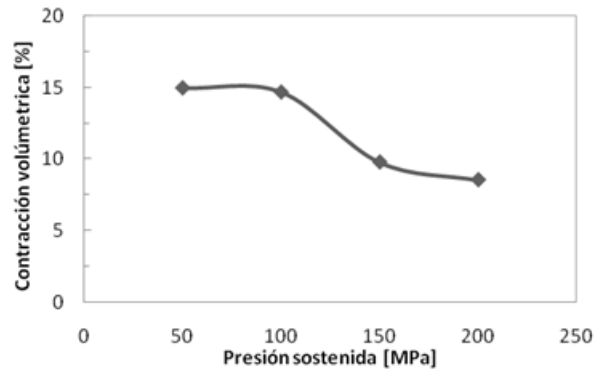


Figura 6- Contracción volumétrica con respecto a la presión sostenida.

c) Efecto de la velocidad de inyección: esta propiedad está referida al caudal del material que entra hacia las cavidades y define el tiempo de llenado. Además, puede causar otros efectos importantes como lo es el aumento de la temperatura de fundido debido a los altos esfuerzos de corte que se generan en la entrada, a medida que va aumentando la velocidad [7]. Se observó que a medida que se incrementa la velocidad de inyección, el tiempo de llenado se ve disminuido en gran medida (Fig 5). Al incrementar la velocidad de inyección en $20 \text{ cm}^3/\text{s}$ se obtuvo una disminución del tiempo de llenado en un 50%. Este efecto se debe a que cuando el flujo del material que entra en la cavidad es mayor, el tiempo de llenado se reduce debido a que el recorrido del flujo siempre es el mismo [6]. Por otro lado, el incremento de la velocidad, puede afectar el enfriamiento de las piezas, específicamente, puede influir en la temperatura de desmoldeo, ya que la eficiencia de la refrigeración se vería disminuida debido al calor adicional presente en el material, por efecto de los esfuerzos de corte generados [7] (Fig 5). En este caso, a medida que se incrementó la velocidad de inyección en $20 \text{ cm}^3/\text{s}$, se obtuvo un aumento de la temperatura de desmoldeo de 20°C , pero encontrándose aun dentro de la temperatura máxima de desmoldeo recomendada para dicho material (245°C). Para evitar, el incremento del tiempo de llenado, y por consecuencia el del tiempo de ciclo, se descartó la velocidad de $20 \text{ cm}^3/\text{s}$. Para evitar defectos de llenado por una velocidad muy alta, se descartó el valor de $40 \text{ cm}^3/\text{s}$, debido a que se puede generar degradación del polímero causada por las altas velocidades de corte.

d) Efecto del tiempo de presión sostenida: en ninguna de las fases del proceso se generaron cambios relevantes, por lo que al parecer esta variable no está afectando los resultados. Esto es debido, posiblemente por la combinación del resto de variables de proceso empleadas. Se seleccionó 30 s, tiempo que no contribuye con el incremento del tiempo de ciclo.

e) Efecto de la presión sostenida: esta variable influye, principalmente, en el porcentaje de contracción volumétrica y la deformación o desplazamiento en el eje "X", "Y" y "Z" de la pieza, debido a que definen la compactación del material durante el enfriamiento. En la Figura 6 se presenta la disminución del porcentaje de contracción volumétrica en un 53% con el aumento de la presión sostenida en 150 MPa, ya que, al aplicar una mayor presión a las cadenas poliméricas que se encuentran dentro de la cavidad del molde, éstas se reorganizan mejor y logran empaquetarse de manera más eficiente [6-7]. Cabe destacar que la contracción volumétrica reportada es el valor máximo reportado para la prótesis, y la zona donde se encuentra dicho porcentaje coincide con la zona donde el material está más caliente, que es en el núcleo de la pieza (parte más gruesa). En la Tabla 1 se presentan los desplazamientos en los diferentes ejes, en relación con la presión sostenida y se puede observar, que se genera el mismo efecto que para

Tabla 1 Alabeo en todas las direcciones para la prótesis de pie.

Presión sostenida [MPa]	Desplazamiento en X [mm]	Desplazamiento en Y [mm]	Desplazamiento en Z [mm]
50	0,9	1,6	2,2
100	0,7	1,2	1,7
150	0,6	0,9	1,2
200	0,5	0,8	1,0

la contracción volumétrica. Por ello, evaluando ambos resultados y para reducir al máximo la contracción se escogió el valor de 200 MPa como presión sostenida óptima.

4. CONCLUSIONES

Para la inyección de la prótesis de pie con PA, se disminuyeron considerablemente los tiempos de ciclo de la pieza a 474 s (7,8 min), en comparación con los otros polímeros trabajados previamente. Se obtuvo una contracción volumétrica de 10%, valores de alabeo aceptables (no sobrepasan los 3 mm máximos recomendados para polímeros), y se desmoldea a una temperatura de 188°C, la cual es inferior a la recomendada, por lo que se evitan defectos en la calidad de la pieza. Las variables de proceso optimizadas fueron: Temperatura de fundido=320°C, Temperatura de molde=80°C, velocidad de inyección=30 cm³/s, Número de Reynolds=10000, Tiempo de presión sostenida=30 segundos y Presión sostenida=200 MPa).

5. REFERENCIAS

- [1]. E.Viosca, *Guía de uso y prescripción de productos ortoprotésicos a medida*, Instituto de Biomecánica de Valencia, España, 2004.
- [2]. Figueroa, R. & Müller-Karger, C., Análisis de esfuerzo por el Método de Elementos Finitos en el Proceso de Diseño de Pie Artificial, *IFMBE Proc. IV Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, CLAIB 2007*, Porlamar VE, pp. 732–735.
- [3]. Figueroa, R. & Müller-Karger, C., Using FE for Dynamic Energy Return Analysis of Prosthetic Feet during Design Process, *IFMBE Proc. 25th Southern Biomedical Engineering Conference*, 2009, Miami USA, pp. 289–292.
- [4]. Candal, M.V., Romero, J., Müller-Karger, C., & Pelliccioni, O., Análisis numérico en el diseño de un molde para prótesis de pie empleando herramientas de diseño (CAD) e Ingeniería (CAE) asistidas por computador, *Mecánica Computacional Vol. XXIX*, E. Dvorkin, M. Goldschmit, M. Storti (Eds.), AMCA, pp. 6441–6454, 2010.
- [5]. Pelliccioni, O., Candal, M.V., Bermeo, M. & Müller-Karger, C.M., Uso de Programa basado en Elementos Finitos de Moldeo por Inyección de Plástico para el Análisis Comparativo de Materiales durante el Diseño de Prótesis de Pie. *VIII Panamerican Health Care Exchanges Conference (PAHCE 2013). V Congreso Colombiano de Bioingeniería e Ingeniería Biomédica(CCBIO 2013)*. Medellín, Colombia. Mayo 2013.
- [6]. Beaumont, J., *Runner and Gating Design Handbook: Tools for Successful Injection Molding*, 2nd edition, Hanser Verlag, USA, 2008.
- [7]. Rosato, D., & Rosato, M., *Injection Molding Handbook*, Springer, USA, 2000.

ESTUDIO DE LA COHERENCIA Y LA CORRELACIÓN ENTRE LA FRECUENCIA CARDIACA Y LA DESPOLARIZACIÓN Y REPOLARIZACIÓN VENTRICULAR EN SUJETOS DIABÉTICOS

María G. Rodríguez

Miguel Altuve

marrodri@ucab.edu.ve

maltuve@usb.ve

Escuela Ing. de Telecomunicaciones, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela

Grupo de Bioingeniería y Biofísica Aplicada, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

Bhakti Guerra

Adriano Adrianza

Sara Wong

bhguerra.11@ucab.edu.ve

aadrianza.11@ucab.edu.ve

swong@usb.ve

Escuela Ing. de Telecomunicaciones, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela

Grupo de Bioingeniería y Biofísica Aplicada, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

Resumen. *La diabetes mellitus es una enfermedad metabólica caracterizada por acumular glucosa en sangre debido a la incapacidad del páncreas para producir suficiente insulina o de las células para procesarla. La Neuropatía Autonómica Cardíaca (NAC) produce trastornos de la frecuencia cardíaca y la dinámica vascular debido al daño de las fibras nerviosas autonómicas que inervan el corazón. El Sistema Nervioso Autónomo (SNA), responsable del control cardiovascular, se puede analizar procesando señales electrocardiográfica (ECG), mediante la extracción de secuencias como la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC) y la Variabilidad del intervalo QT (VQT). En este trabajo se estudia la coherencia y la correlación entre la VFC y la VQT en sujetos diabéticos, con miras a encontrar información útil para el diagnóstico temprano de las complicaciones de la diabetes, en particular la NAC. Se utilizaron las señales ECG de 19 sujetos diabéticos con complicaciones cardíacas y de 11 sujetos control. Indicadores lineales para explorar la dependencia entre la VFC y la VQT fueron utilizados: la coherencia y la correlación cruzada. Además, dos técnicas para evaluar la coherencia fueron*

aplicadas: el método clásico, donde se estima el espectro usando el método de Welch, y la de respuesta sin distorsión de mínima varianza o MVDR. El análisis se realizó en dos fases: i) comparando los resultados obtenidos entre grupos (Diabéticos vs. Control) utilizando cada uno de los índices propuestos, y ii) comparando los resultados entre las dos técnicas de coherencia por cada grupo de estudio (Clásica vs. MVDR). Los resultados obtenidos en la primera fase no mostraron diferencia significativa ($p > 0,05$). La segunda fase arrojó valores de $p < 0,0014$ en sujetos diabéticos y $p > 0,4$ en el grupo control. La correlación cruzada es mayor para el grupo control, aunque no significativa respecto a los diabéticos ($p > 0,07$), no obstante esto debe ser analizado en una población con mayor número de sujetos.

Palabras claves: Coherencia, Correlación, Diabetes, Variabilidad de la frecuencia cardíaca, Variabilidad del intervalo QT.

1. INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus (DM) es una enfermedad metabólica caracterizada por acumular glucosa en sangre debido a la incapacidad del páncreas para producir suficiente insulina o de las células para procesarla. La DM afecta a más de 347 millones de personas a nivel mundial [1], siendo la Neuropatía Autonómica Cardiovascular (NAC) la de mayor prevalencia y la menos estudiada en estos casos [2], [3].

El corazón se encuentra profundamente inervado por el Sistema Nervioso Autónomo (SNA), responsable del balance simpático-vagal que, conjuntamente, regulan las funciones autonómicas del cuerpo humano.

Es posible examinar el estado del SNA a partir de la señal electrocardiográfica (ECG). Dado el ECG, se pueden obtener series temporales que revelan información del SNA. Dos de estas señales son: la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (VFC) que es la variación del intervalo de tiempo entre latidos cardíacos, y la Variabilidad del intervalo QT (VQT), que registra la variación temporal en el proceso de despolarización y repolarización ventricular [4].

En el análisis de señales biomédicas, la medición de parámetros lineales como la correlación y la coherencia se han empleado para proporcionar información acerca del estado clínico de pacientes [5]. Éstos han de proporcionar información acerca de fenómenos repetitivos, en tiempo o en frecuencia, presentes en las señales. La correlación lineal es un operador que permite cuantificar el grado de similitud temporal entre dos series, aunque en ellas no exista evidencia aparente de coincidencia [6]. Por su parte, la coherencia permite encontrar frecuencias comunes y evaluar la similitud entre dos señales.

En este trabajo se estudia la correlación lineal y la coherencia paramétrica y no paramétrica entre la VFC y la VQT en sujetos diabéticos, con miras a encontrar información útil en el diagnóstico temprano de las complicaciones de la diabetes, en particular la NAC.

El resto de este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta la metodología, donde se presenta una breve descripción de los parámetros a estudiar y se describe la base de datos y el protocolo experimental utilizado. La sección 3 contiene los resultados obtenidos y se finaliza con las conclusiones del estudio.

2. METODOLOGÍA

2.1 Correlación Lineal (*corrC*)

La correlación lineal tiene como finalidad medir la intensidad de relación lineal entre dos variables. La función más usada para hallar esta relación es la determinada por Pearson, donde la correlación se calcula como el cociente entre la covarianza de dos variables (X y Y) y el producto de sus desviaciones estándar (σ_x, σ_y)

$$\text{corrC} = \frac{\text{cov}\{X, Y\}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E\{(X - \mu_x)(Y - \mu_y)\}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

donde $\text{cov}\{\cdot\}$ es la covarianza, $E\{\cdot\}$ es el operador valor esperado, y μ_x, μ_y son la media de las señales X e Y, respectivamente [7].

Las variables estarán correlacionadas si el resultado de la Ec.(1) se encuentra alrededor de ± 1 . Se dice que la correlación es directa si ambas variables son crecientes (valor cercano a 1) y se define inversa, cuando una variable crece y la otra decrece (valor cercano a -1). Si este valor se acerca a cero, la correlación entre las variables será más débil.

2.2 Coherencia (C)

La coherencia permite encontrar frecuencias comunes entre dos señales y evaluar la similitud entre ellas. Aplicada a un proceso aleatorio proporciona una medida estadística de la correlación entre dos series temporales en función de sus frecuencias.

La coherencia se clasifica como paramétrica y no paramétrica. La paramétrica propone la aplicación de un modelo cuya selección presupone que los datos se adaptaran a éste. Si el modelo no satisface la estructura de los datos, una degradación significativa del rendimiento del modelo se presentará y dará lugar a una estimación sesgada de la coherencia [8]. La Ec.(2) permite calcular la coherencia para el modelo propuesto:

$$C_{1,2}(f) = \frac{S_{xy}(f)}{\sqrt{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}} \quad (2)$$

donde $S_{xy}(f)$ es la densidad espectral de potencia (DEP) cruzada entre dos series y $S_{xx}(f)$ y $S_{yy}(f)$ son la DEP respectivas. El método del periodograma promediado de Welch es usado para estimar las DEP [9].

Por su parte, la coherencia no paramétrica busca estimar la similitud entre frecuencias adaptándose al tipo de secuencia de entrada. El método empleado fue el *Minimum Variance Distortionless Response* o MVDR propuesto por Capon [10]. Esta técnica puede ser vista como la salida de un banco de filtros, donde la frecuencia central de cada uno se ajusta de forma dinámica a la frecuencia de análisis. Así, los coeficientes del k -ésimo filtro, g_k , se calculan de acuerdo ciertas restricciones. A continuación una breve descripción de cómo se estima el espectro usando el modelo MVDR: sea $x(n)$ un proceso estacionario de media nula aplicado a un banco de K filtros de longitud L , así

$$g_k = [g_{k,0} \quad g_{k,1} \quad g_{k,2} \quad \cdots \quad g_{k,L-1}]^T \quad (3)$$

donde $k = 0, 1, 2, \dots, K-1$ y T denota el vector transpuesto. La salida del k -ésimo filtro, $y_k(n)$, será la convolución de la secuencia $x(n)$ y el filtro. Su energía se puede estimar mediante

$$E\{|y_k(n)|^2\} = E\{g_k^{T*} x(n)\} = g_k^{T*} R_{xx} g_k \quad (4)$$

donde $*$ es el operador conjugado y $R_{xx} = E\{\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^{T*}(n)\}$ es la matriz de covarianza, donde $\mathbf{x}(n) = [x(n) \dots x(n-L+1)]^T$ son los elementos de la señal de estrada.

Luego, los coeficientes de cada filtro se escogen de manera de minimizar la varianza a la salida de cada uno, por lo que se debe cumplir que,

$$g_k^{T*} f_k = f_k^{T*} g_k = 1 \quad (5)$$

donde $f_k = \frac{1}{\sqrt{L}} [1, \exp(j\omega_k), \exp(j2\omega_k), \dots, \exp(j(L-1)\omega_k)]^T$ es el vector unitario de Fourier con frecuencia ω_k . Con esta condición, las componentes espectrales de $x(n)$ alrededor de ω_k pasan sin distorsión, mientras que el resto son atenuadas. Los coeficientes de cada filtro serán entonces:

$$g_k = \frac{R_{xx}^{-1} f_k}{f_k^H R_{xx}^{-1} f_k} \quad (6)$$

El espectro de $x(n)$ en la frecuencia ω_k ($S_{xx}(\omega_k)$) sería la energía de la salida $y_k(n)$ donde,

$$S_{xx}(\omega_k) = E\{|y_k(n)|^2\} = g_k^{T*} R_{xx} g_k \quad (7)$$

2.3 Protocolo de Prueba

Para este estudio se utilizaron las señales ECG en estado de reposo de 19 sujetos diabéticos (edad promedio 56.44 ± 9.60) con complicaciones cardíacas, de ahora en adelante se denominará grupo diabético (GD) y 11 sujetos control (edad promedio 52.63 ± 4.99) que conforman el grupo control (GC); para más información sobre la base de datos referirse a [11]. A estas señales se les aplicó un algoritmo basado en ondulitas [12], para detectar las ondas Q, R y T (final de la onda T), y se construyeron las series temporales VFC y VQT de cada grupo.

2.3 Medidas

Para cada par de señales se calcularon los coeficiente de: el valor absoluto de la correlación lineal (*corrC*) empleando la Eq.(1), utilizando las series VFC y VQT; la coherencia clásica (*cohC*) empleado la Eq.(2), donde se estima el espectro usando el periodograma promedio por el método de Welch; y la coherencia MVDR (*cohMVDR*) utilizando el algoritmo propuesto por Benesty [13]. Se calcula la media y la desviación estándar (std) para cada grupo.

Para obtener el índice de coherencia con la metodología propuesta (clásica-*cohC* y MVDR-*cohMVDR*) el máximo de cada resultado es calculado. Así, para un par de secuencias de entrada el valor máximo dado por la Eq.(2) es el coeficiente *cohC*, mientras que para el índice *cohMVDR* el valor máximo obtenido del algoritmo implementado por [14] es el resultado. Se plantearon dos

fases para el análisis de los resultados obtenidos: *i*) comparar los datos entre grupos (GD vs. GC) utilizando cada uno de los índices propuestos, y *ii*) comparar los resultados entre técnicas de coherencia (Clásica vs. MVDR) para cada grupo de estudio.

La prueba de los rangos con signo de Wilcoxon se utilizó para determinar la diferencia significativa entre los grupos (diabéticos y control) en cada conjunto calculado, con un umbral de significación estadística de $p < 0.05$.

3. RESULTADOS

Las secuencias VFC estudiadas tienen valor promedio \pm std por grupo de: GD 0.92 ± 0.13 , GC 0.82 ± 0.09 ; mientras que las series VQT analizadas cuentan con valor promedio \pm std por grupo de: valores promedio: GD 0.36 ± 0.04 , GC 0.33 ± 0.02 .

Para la primera fase del estudio, la tabla 1 presenta los resultados obtenidos. Se muestra el valor promedio \pm std de la coherencia calculada por ambos métodos (*cohC* y *cohMVDR*) y la correlación lineal (*corrC*), todos hallados para cada población (GD y GC). Además, se muestra el valor de significancia p , comparando los resultados entre grupos.

Tabla 1. Índices de coherencia (clásica: *cohC*, y MVDR: *cohMVDR*) y correlación (*corrC*) obtenidos a partir de las series VFC y VQT de los grupos de diabéticos (GD) y de control (GC)

	<i>cohC(VFC, VQT)</i>	<i>cohMVDR(VFC, VQT)</i>	<i>corrC(VFC, VQT)</i>
GD	$0,797\pm 0,147$	$0,653\pm 0,115$	$0,111\pm 0,066$
GC	$0,762\pm 0,178$	$0,697\pm 0,119$	$0,191\pm 0,135$
p	0.7797	0.4014	0.0741

En la segunda fase del estudio, se obtuvo diferencia significativa ($p < 0.0014$) para el GD, no así para el GC ($p > 0.4$). La fig. 1 muestra el diagrama de caja con los resultados obtenidos.

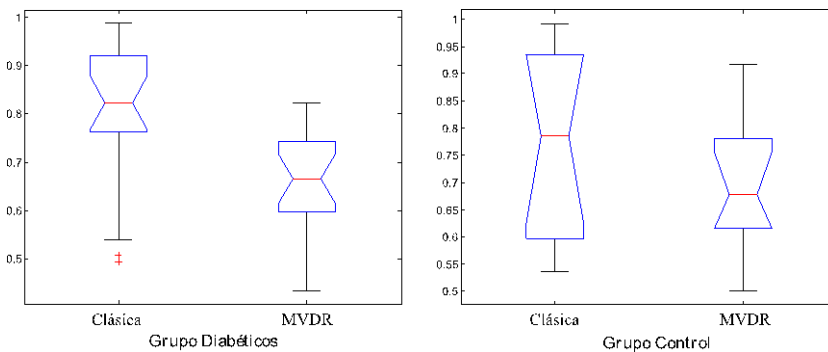


Figura 1. Comparación entre las técnicas de coherencia Clásica y MVDR por grupos.

4. CONCLUSIONES

Comparando la correlación y coherencia entre las series VFC y VQT de los grupos en estudio (GC vs. GD), no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) para ningún indicador. Se observa que la correlación cruzada es mayor para el GC, aunque no significativa respecto a los diabéticos ($p > 0,07$), no obstante esto debe ser analizado en una población con mayor número de

sujetos, evaluando también la medicación farmacológica de los pacientes diabéticos. No se reportó diferencia entre grupos empleando cada técnica de coherencia.

En la segunda fase de análisis, comparando los resultados entre los índices de coherencia propuestos, sólo se halló diferencia significativa en el grupo de diabéticos ($p < 0.0014$) comparando ambas técnicas. Esto sugiere realizar un análisis a profundidad de la coherencia para cada serie, VFC y VQT. Para futuros trabajos, con miras a evaluar la relación entre las frecuencias de las series, se propone el análisis entre la DEP de cada serie, la DEP cruzada y la función de coherencia hallada por ambas técnica.

REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, Septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.who.int/es/>. [Último acceso: 15 Julio 2013].
- [2] Chacín, L., Jatem, E. & Rojas, C., Neuropatía autonómica cardiovascular diabética. *Diabetes Internacional*, vol. I, n. 1, 2009.
- [3] Vinik, A. & Ziegler, D., Diabetic cardiovascular autonomic neuropathy. *Contemporary Reviews in Cardiovascular Medicine*, vol. 115, n° 3, pp. 387-397, 2007.
- [4] Guyton, A., & Hall J., Tratado de Fisiología Médica. pp. 115-127. McGraw-Hill Interamericana, 2001.
- [5] Loforte, L., Carraul, G., Mainardi L. & Beuche, A., Heart Rate and Respiration Relationships as a Diagnostic Tool for Late Onset Sepsis in Sick Preterm Infants. *Computers in Cardiology*, Valencia, 2006.
- [6] Bertran, E., Procesado digital de señales, Ediciones UPC, vol. 2. pp. 401. Barcelona, 2006.
- [7] Proakis, J. & Manolakis, D., Predicción lineal y filtros lineales óptimos. Tratamiento Digital de Señales. pp. 735-744. Pearson Educación, Madrid, 2007.
- [8] Benesty, J & Huang, Y., A Generalized MVDR Spectrum, *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 12, n° 12, pp. 827-830, 2005.
- [9] Stoica, P. & Moses, R., Nonparametric Methods. *Spectral Analysis of Signals*. pp. 22-59, Prentice Hall, Inc. New Jersey. 2005.
- [10] Capon, J., High resolution frequency-wavenumber spectrum anlysis. *Proceedings of the IEEE*, vol. 57, pp. 1408-1418, 1969.
- [11] Quintero, L., Parra, R., Wong, S., Antepara, N., Almeida D. & Passariello, G., Diseño de una base de datos para el diagnóstico precoz de la neuropatía diabética. *III Congreso Venezolano de Bioingeniería Valencia*, Valencia, 2006.
- [12] Rivera, P., Severeyn, É., Wong S. & Pérez, J., Study of Cardiac Repolarization during Oral Glucose Tolerance Test in Metabolic Syndrome Patients. *Computing in Cardiology*, Cracovia, 2012.
- [13] Benesty, J. MathWorks, 30 Enero 2006. [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/authors/22070>. [Último acceso: 11 Junio 2013].
- [14] Benesty, J., Chen, J. & Huang, Y., Estimation of the Coherence Function with the MVDR Approach. *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Toulouse, 2006.

ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE PLACAS ATEROESCLERÓTICAS HUMANAS MODIFICADAS CON NANOTUBOS DE CARBONO

Orlando Pellicioni

orlandop@usb.ve

Grupo de Biomecánica. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar.
Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela

John Bustamante

Lina Hoyos

john.bustamante@upb.edu.co

lina.hoyos@upb.edu.co

Grupo de Dinámica Cardiovascular. Facultad de Medicina. Universidad Pontificia Bolivariana.
Circular 1, Bloque 22-B, Medellín, Colombia

Resumen. *Este trabajo estudia numéricamente las características del comportamiento mecánico de la presencia de nanotubos de carbono, desplegados e implantados en una arteria que contiene una placa esclerótica, tratando de llegar a un modelo ajustado a la condición real de la implantación. Las técnicas computacionales se han convertido en una práctica no invasiva con la que se pueden simular un sinnúmero de escenarios, para entender el comportamiento de las prótesis bajo las condiciones fisiológicas de un tramo arterial y determinar su incidencia en la reparación de la placa, situación clave para el desarrollo de nuevos diseños de dispositivos médicos. El estudio se desarrolló estratégicamente en dos fases: primero simulando el comportamiento micromecánico de un material compuesto de placa esclerótica (matriz) con inclusiones de nanotubos de carbono al modificar parámetros mecánicos del compuesto vs. cargas de nanopartículas y grado de alineación, basado en modelos de Eshelby, Mori y Tanaka. Luego, en una siguiente fase, se analizaron de forma numérica los esfuerzos de pared en arterias distendidas por angioplastia para los escenarios más relevantes con la placa modificada por la presencia de los nanotubos de carbono. La arteria se modeló como un material hiperelástico utilizando las ecuaciones constitutivas de tercer orden de Mooney-Rivlin, y la placa estenótica calcificada bajo un comportamiento elástico lineal. Los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas son discutidos y se plantean nuevos objetivos para investigaciones futuras.*

Palabras claves: placa aterosclerótica, nanotubos de carbono, angioplastia, Mooney-Rivlin, Eshelby, Mori y Tanaka.

1. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades cardiovasculares se consideran un problema de salud pública, siendo una de las principales causas de mortalidad y, según la Organización Mundial de la Salud, una de cada tres muertes por esta causa se podría prevenir con tratamientos oportunos. Con el propósito de acceder terapéuticamente a las lesiones estenóticas del lumen vascular debido a placas arterioescleróticas, la técnica de angioplastia transluminal mediante el uso de prótesis vasculares (*stents*) es una opción de primera línea en muchos casos. Ésta ayuda a restablecer el flujo sanguíneo, y a su vez ha reducido los índices de mortalidad. Como resultado, la técnica ha aminorado costos de manejo, y también el número de intervenciones quirúrgicas de mayores complicaciones y estancias hospitalarias. Desafortunadamente, según estudios realizados, se ha encontrado que entre 30% y 40% presentan nuevamente estrechamiento del lumen debido a la formación de neo-tejido sobre el dispositivo (re-estenosis) alrededor de los seis meses de implantación.

Se propone el uso de materiales nano-estructurados, porque estos representan una alternativa para el desarrollo de recubrimientos muy específicos, debido a sus excepcionales propiedades químicas, mecánicas, térmicas, entre otras [1]. Adicionalmente, los materiales nano-estructurados han sido catalogados como uno de los avances tecnológicos más prometedores para el área médica, por su capacidad de ser funcionalizados, uniendo a su superficie ligandos de interés médico que pueden ser transportados a un lugar específico del cuerpo. Además, debido a su tamaño, pueden transitar libremente a través de la circulación sanguínea lo que constituye una ventaja en términos de la facilidad de su implantación; adicionalmente presentan la ventaja de que pueden estar fabricados con materiales biocompatibles con el organismo.

2. SIMULACIONES DEL MATERIAL COMPUESTO

2.1 Objetivos

Se implementó un análisis no lineal aproximado por la técnica del elemento finito del comportamiento mecánico del material compuesto, utilizando la herramienta comercial *Digimat 4.5.1* [2]. Esta aplicación utiliza el método de homogenización de campo medio para el cálculo de propiedades del material compuesto. Este método es un enfoque semi analítico para el modelado micromecánico de materiales heterogéneos y se basa fundamentalmente en los trabajos de Eshelby, Mori & Tanaka [2]. El objetivo del presente trabajo es predecir las propiedades macroscópicas efectivas mecánicas de un material compuesto cuya microestructura la conforma una matriz de tejido humano con placa aterosclerótica e inclusiones espacialmente distribuidas de nanotubos de carbono, las cuales están geométricamente definidas sólo por su relación de aspecto y su distribución de la orientación estadística relativa a un campo de deformación por tracción uniaxial externa. La referencia de Guo [3] presenta una introducción más detallada al tema de la micromecánica y modelado de materiales, el cual se escapa de los alcances de la presente publicación.

El trabajo se enfoca en el cálculo y evaluación de las propiedades mecánicas de una placa aterosclerótica humana con variaciones de carga y grados de alineación de nanotubos de multicapas de carbono. Todas las simulaciones se basaron cumpliendo las siguientes suposiciones:

(a) Los nanotubos se modelaron como una distribución homogénea de elipsoides dentro de una matriz de tejido humano homogéneo de placa, por lo que no se consideraron aglomeraciones de partículas o interacciones partícula-partícula. (b) Uniones perfectas entre partícula y matriz, por lo que no se consideran cambios en los esfuerzos interfaciales debido a deslizamientos. (c) Tanto la matriz como las nanopartículas mantienen constantes sus parámetros elásticos o elastoplásticos. (d) Se modelaron únicamente partículas con un radio de aspecto del nanotubo constante.

Estas suposiciones representan simplificaciones notables si se comparan con el estado real del comportamiento micromecánico de los materiales compuestos de nanotubos reforzados, y por tanto, los resultados del presente trabajo deben considerarse como estimaciones para casos de óptima homogenización de las nanopartículas con enlaces interfaciales en la matriz de inclusión.

2.2 Propiedades elásticas del material compuesto

Configuración del modelo: Para una primera estimación, el tejido arterial (ART) fue modelado utilizando una ecuación constitutiva hiperelástica Mooney Rivlin de tercer orden con 5 parámetros. Ésta fue seleccionada para describir de forma adecuada la relación no lineal esfuerzo/deformación del tejido elástico de la arteria [4]. El modelo constitutivo hiperelástico que específicamente se utilizó es una variante de la ecuación polinomial de la función de densidad de energía de deformación definida por los invariantes de la matriz de deformación, la cual fue propuesta por Mooney [5] como una ecuación de tercer orden para materiales isotrópicos incompresibles:

$$W = a_{10}(I_1 - 3) + a_{01}(I_2 - 3) + a_{20}(I_1 - 3)^2 + a_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + a_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (1)$$

con la Eq. (1), las componentes de la matriz de esfuerzo pueden obtenerse diferenciando a W con respecto a las correspondientes componentes de deformación. La placa aterosclerótica (PLAC) se modeló como un material transversalmente isotrópico: las propiedades mecánicas de su medio deformable se asumieron con un mismo comportamiento en las direcciones axial (z) y circunferencial (θ), y diferentes en la dirección radial (r) [6]. El origen de coordenadas para este material ortotrópico se definió en el centro del lumen. Los nanotubos de carbono multicapas (CNT) [7] fueron modelados con comportamiento ideal-elástico con bajo coeficiente de Poisson y un módulo de Young efectivo (módulo elástico) relacionado a su área de sección transversal, derivada de los valores reportados por las referencias técnicas [8]. Para el modelado del material compuesto, PLAC fue considerada como la fase matriz, y los CNT como inclusiones sólidas elipsoidales a distintos porcentajes de mezcla y orientación. La Tabla 1 resume los valores de ajuste seleccionados para todos los materiales y casos de estudio simulados.

Resultados: La Fig. 1 muestra el módulo de Young calculado del compuesto PLAC+CNT versus la concentración volumétrica de CNT, suponiendo una distribución con orientación isotrópica. Se reconoce una dependencia lineal para el material compuesto bajo esta configuración. En general, el módulo elástico efectivo y los valores de esfuerzo a tensión de

Tabla 1. Constantes elásticas e hiperelásticas de los materiales utilizados en el estudio numérico.

	CNT [7]		ART [4]		PLAC [6]
E (GPa)	30	a_{10} (kPa)	18.90	E_r (kPa)	100
ν	0.034	a_{01} (kPa)	2.75	$E_z=E_\theta$ (kPa)	1000
ρ (kg/m ³)	1800	a_{20} (kPa)	85.72	$\nu_{r\theta} = \nu_{rz}$	0.01
Radio de aspecto L/D	150	a_{11} (kPa)	590.43	$\nu_{\theta z}$	0.27
Diámetro prom. (nm)	9.5	a_{30} (kPa)	0	$G_{r\theta}=G_{\theta z}=G_{rz}$ (kPa)	500

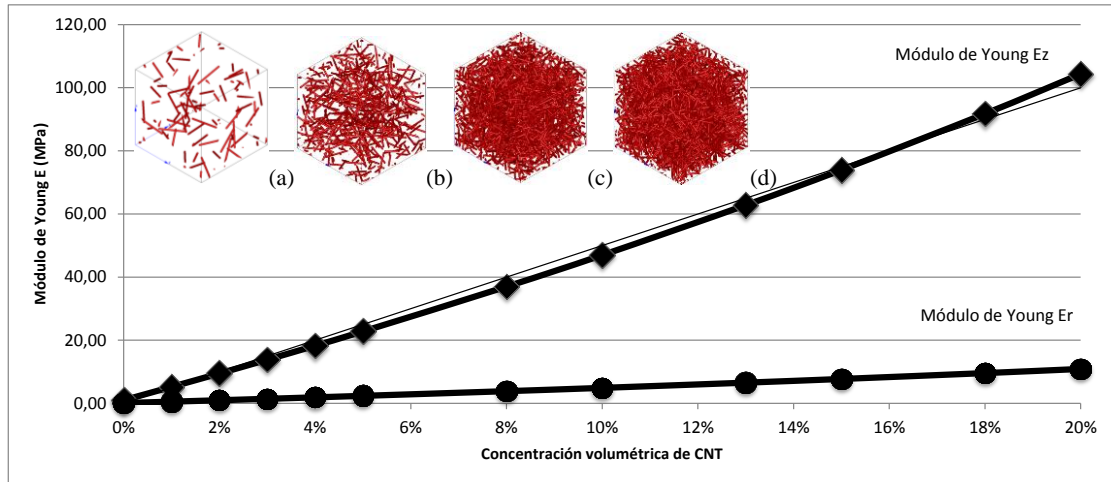


Figura 1 – Simulación del módulo de Young del compuesto PLAC+CNT versus el incremento en la concentración volumétrica de nanotubos para una distribución con orientación isotrópica y un radio de aspecto de 150. Las ilustraciones son representativas de elementos volumétricos para concentraciones de CNT de: a) 0.5%, b) 3%, c) 10%, y d) 20%

nanotubos dispersos en compuestos viscoelásticos son altamente dependientes de muchos escenarios, como por ejemplo: defectos en la estructura cristalina del CNT, morfología producto de su proceso de obtención, etc [8]. Sin embargo, estos resultados siguen siendo válidos para reportar incrementos importantes en la rigidez del tramo de arteria, esencialmente en su dirección longitudinal (z).

Un segundo ejercicio fue evaluar el efecto de la alineación del CNT partiendo de una orientación isotrópica (33.3%) hasta una totalmente alineada (100%) relativa a la dirección de un ensayo tensil uniaxial. Para la muestra se mantuvo constante el radio de aspecto del nanotubo y se calculó para una concentración baja (3% vol.) y una alta (20% vol.) de inclusiones de CNT en la matriz PLAC. La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos de los módulos de Young calculados para los materiales compuestos, reportándose en la dirección normal y paralela a la del esfuerzo a

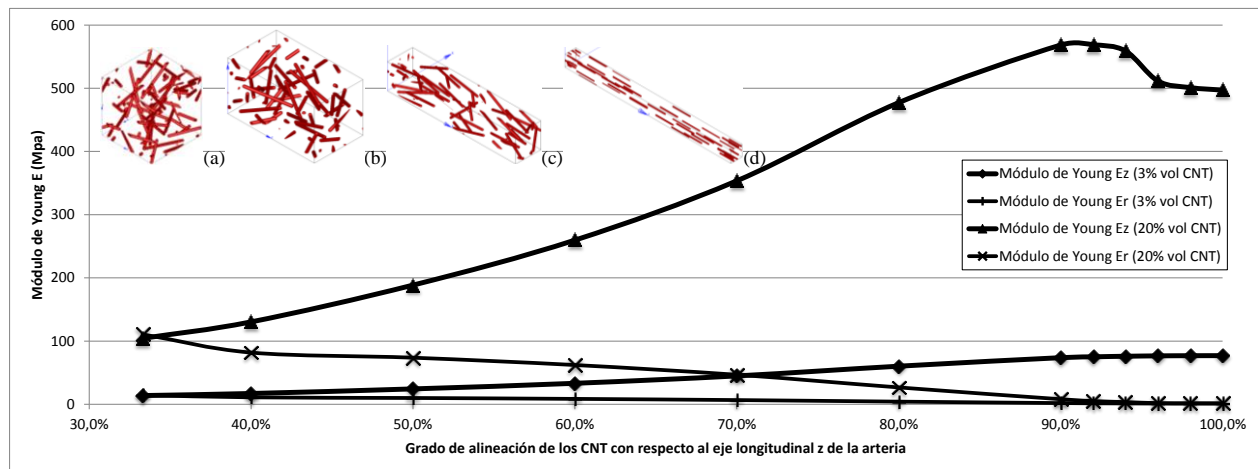


Figura 2 – Simulación de los módulos de Young en las direcciones longitudinal (z) y radial (r) del compuesto PLAC+CNT versus el grado de alineación de los CNT para una concentración volumétrica de nanotubos al 3% y un radio de aspecto de 150. Las ilustraciones son representativas de elementos volumétricos para orientaciones de CNT: a) Isotrópica 33.3%, b) 50%, c) 80%, y d) Uniaxial 100% alineada con el eje z .

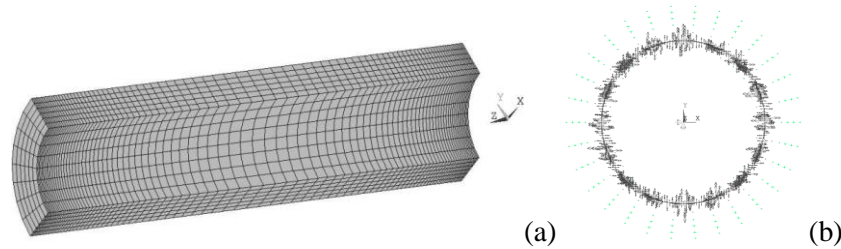


Figura 3 – Esquemas de: a) Malla utilizada para el modelo, b) Presión interna aplicada (puntos) y Restricciones (flechas).

tensión aplicado. Se reconoce un incremento no lineal del valor del módulo para la dirección paralela (E_z) al esfuerzo a tensión y una ligera disminución del valor del módulo elástico en la dirección normal. Esta respuesta permite afirmar a través de los cálculos que la presencia de los CNT sobre la matriz PLAC refuerza las propiedades mecánicas del material compuesto a la vez que desarrolla potencialmente una anisotropía significativa en el módulo elástico, incluso a bajas concentraciones de CNT, siempre que estos muestren una fuerte orientación y una perfecta adhesión con la matriz de tejido humano.

3. SIMULACIONES DEL MODELO ARTERIAL

3.1 Objetivos

Seguidamente, se procedió a registrar las propiedades homogeneizadas del material compuesto NCT+PLAC para analizar los resultados del cálculo de esfuerzos de pared en arterias distendidas por angioplastia, y el que corresponde luego a una presión sanguínea media de 100 mmHg [3], todo esto con el objeto de evaluar el efecto de la presencia de los NTC sobre el comportamiento elástico del tejido arterial. Se implementó un análisis no lineal aproximado por elemento finito utilizando la herramienta comercial *ANSYS Mechanical APDL 14.5* [9].

3.2 Análisis numérico del comportamiento del tejido arterial

Modelo geométrico: Se modeló una arteria coronaria idealizada y con presencia de placa aterosclerótica, representada como un cilindro con diámetro externo de 5.2mm e interno de 4.2mm, y una estenosis localizada de 5mm de espesor. Por simetría, se limitó el estudio a un segmento de un cuarto de circunferencia y 15mm de longitud (Fig. 3a). La malla obtenida luego del análisis de convergencia del modelo fue de 4500 elementos.

Condiciones de borde: Las condiciones de cargas y restricciones se aplicaron al sistema arterial en dos pasos. Para el primero, la arteria fue distendida a un diámetro mayor por la aplicación de una presión interna de 100kPa, propia de insuflar un balón de angioplastia sobre la estenosis (Fig. 3b). En el segundo paso, la presión en el lumen interno de la arteria fue reduciéndose gradualmente hasta un valor medio de 13.3kPa (100mmHg). Condiciones libres de esfuerzo fueron asumidas para la cara externa de la arteria. Se aplicó una restricción multipunto (MPC) para fuerza distribuida sobre las superficies proximal y distal de la arteria utilizando elementos para análisis de contacto flexible-flexible. Se seleccionaron dos puntos contenidos en los respectivos planos de contacto como nodos pilotos, restringiéndoles todos sus grados de libertad. Esta condición permite la expansión radial de la arteria limitando adecuadamente, cualquier posible movimiento de cuerpo rígido para su correcto análisis estático.

Tabla 2. Resultados de la simulación en ANSYS

Presión interna 100kPa			Presión interna 13.3kPa		
Estudio % vol CNT / %orientación	σ_{EQV} (MPa)	u_{res} (mm)	Estudio % vol CNT / %orientación	σ_{EQV} (MPa)	u_{res} (mm)
0 / -	0.688428	0.826470	0 / -	0.065638	0.236724
3 / 33.3	0.630998	0.225589	3 / 33.3	0.068158	0.038197
3 / 100	3.523370	0.717785	3 / 100	0.229000	0.233005
20 / 33.3	0.531086	0.412480	20 / 33.3	0.067828	0.005962
20 / 100	3.270830	0.464236	20 / 100	0.502923	0.101564

Resultados: La tabla 2 resume los cálculos, reportando los límites máximos de esfuerzos de von Mises σ_{EQV} y desplazamientos totales u_{res} del sistema arterial. Un primer grupo de casos mantuvo constante la carga de 100kPa de presión interna en la arteria, variando las proporciones volumétricas de CNT en el material compuesto y grados de alineación; un segundo grupo repitió todos los casos de estudio, pero a la presión de 13.3kPa. Los valores de desplazamiento indican claramente que incluso a una baja concentración volumétrica de CNT el nuevo nanocompuesto se ve altamente reforzado, reduciendo el grado de elongación natural del tejido arterial. Éste es un punto importante para considerar ante técnicas como la dilatación por balón catéter. El escenario se repite para el caso de una presión media normal en un paciente, donde los desplazamientos por dilatación se reducen entre un 2% hasta un 97%. El efecto de la anisotropía también es importante, ya que el comportamiento elástico de la arteria se ve afectado aún más en la dirección radial por efecto de una rigidización en la dirección longitudinal de la arteria.

4. CONCLUSIONES

Los modelos numéricos utilizados en la simulación muestran un fuerte efecto de reforzamiento del tejido aterosclerótico en sus propiedades mecánicas producto de la presencia de los CNT, suponiendo una homogenización perfecta de los nanotubos individuales con una alta relación de aspecto en la matriz de tejido arterial y una transferencia ideal de esfuerzo interfacial entre ambas fases. Este estudio muestra especialmente el notable efecto en los cambios de las propiedades mecánicas con los CNT alineados y a una baja concentración volumétrica (3% vol.) en el material nanocompuesto. Los autores sugieren continuar los estudios, acompañándolos de pruebas in vitro, para considerar efectos como interacción entre la fase PLAC y los CNT, control sobre la orientación y homogenización del material nanocompuesto, etc.

REFERENCIAS

- [1]. Yang, W., Thordarson, P., Gooding, J., Ringer, S., Braet, F. Carbon nanotubes for biological and biomedical applications. *Nanotechnology*, vol. 18 – 41, p. 412001, 2007.
- [2]. Portal oficial Digimat (<http://www.e-xstream.com>).
- [3]. Guo, Z.X., *Multiscale Materials Modelling – Fundamentals and Applications*, CRC, 2007.
- [4]. Lally, C., Dolan, F., Prendergast, P.J., Cardiovascular stent design and vessel stresses: a finite element analysis. *J. Biomechanics*, vol. 38, pp. 1574 – 1581, 2005.
- [5]. Mooney, M., A theory of large elastic deformation. *J. App. Phys.*, vol. 11, pp. 582 – 592, 1940.
- [6]. Ohayon, J., Finet, G., Treyve, F., Rioufol, G., Dubreil, O., A three-dimensional finite element analysis of stress distribution in a coronary atherosclerotic plaque: In-vivo prediction of plaque rupture location”. *Biomechanics Applied to Computer Assisted Surgery*. Research Signpost, 2005.
- [7]. Nanocyl NC7000 (MWNT). Material Datasheet (<http://www.matweb.com>).
- [8]. Weisenberger, M., Andrews, R., Rantell, T., Carbon nanotube polymer composites: recent developments in mechanical properties. *Phys. Proper. Polym. Handbook*, pp. 585 – 598, 2007.
- [9]. Portal oficial ANSYS (<http://www.ansys.com>).

ESTUDIO DETALLADO DEL LLENADO VENTRICULAR

Sánchez Betsy

Rojas Ruben

bsanchez@unet.edu.ve

rdrojas@ula.ve

Grupo de Bioingeniería, Decanato de Investigación. Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal. Táchira – Venezuela.

Centro de Ingeniería Biomédica y Telemedicina, Universidad de Los Andes

Antigua sede Facultad de Ingeniería, Av. Tulio Febres Cordero, Mérida - Venezuela

Abstract. *El llenado del ventrículo comienza cuando las válvulas auriculo-ventriculares se abren y permiten que la sangre acumulada en las aurículas ingrese en los ventrículos, de acuerdo a un gradiente de presión. El ventrículo en esta fase del ciclo se encuentra relajado (en diástole). La diástole comprende las fases de llenado rápido, llenado lento y sístole auricular. Cuando el corazón no se relaja o sufre alguna alteración en el proceso de relajación, se produce un ciclo anormal de bombeo, esto se conoce como la disfunción diastólica (DD). El ventrículo no se relaja con normalidad y por lo tanto la presión aumenta causando problemas en el siguiente latido. La DD se considera un fallo mecánico del corazón que está presente en muchos de los casos de insuficiencia cardíaca. Cuando el ventrículo izquierdo no se llena normalmente debido al deterioro de la precarga o la compliance durante la diástole, la sangre regurgita en la aurícula izquierda y, finalmente, crea un gradiente retrogrado hacia los pulmones. Fisiológicamente esto se traduce en desajuste del gradiente de presión de la sangre dentro de los vasos sanguíneos pulmonares, conduciendo a perder líquido en los espacios de aire (alvéolos) pulmonares. El resultado es el edema pulmonar, una condición caracterizada por la dificultad para respirar, la oxigenación inadecuada de la sangre, y, si es grave y no tratado, lleva a la muerte. De allí la importancia del estudio detallado del llenado ventricular. Para el estudio del llenado ventricular se propone un modelo matemático del corazón y la simulación de las distintas fases de la diástole. Se considera una función de presión auricular que depende del volumen y de una elastancia variable. Esta función consiste en una señal sinusoidal que toma en cuenta la duración de las distintas etapas del ciclo cardiaco y la rigidez del ventrículo. Adicionalmente, se utiliza un modelo del sistema circulatorio (de la literatura), que complementa el modelo propuesto para obtener la respuesta completa del sistema cardiovascular. En conclusión, este modelo permite simular, para su estudio, las diferentes etapas de la diástole en estado normal y/o patológico.*

Keywords: Llenado ventricular, disfunción diastólica, modelo matemático.

1. INTRODUCCIÓN

El llenado ventricular o diástole comienza cuando las válvulas auriculo-ventriculares (A-V) se abren y permiten que la sangre acumulada en las aurículas ingrese en los ventrículos, por medio de un gradiente de presión. Este proceso comprende tres fases: llenado ventricular rápido, llenado lento y sístole auricular. El llenado ventricular rápido se produce durante el primer tercio de la diástole (protodiástole). En esta fase la presión auricular es máxima por haberse acumulado el retorno venoso durante las fases anteriores, y la presión ventricular es mínima por la relajación total; se crea un gradiente de presión y hay un paso rápido de sangre que abre las válvulas A-V. Durante el tercio medio de la diástole (mesodiástole) el gradiente de presión entre la aurícula y ventrículo se ha reducido y la sangre pasa lentamente a los ventrículos iniciándose la fase de llenado lento o diástasis. En este momento penetra una pequeña cantidad de sangre. Al finalizar, durante el último tercio de la diástole (telediástole) las aurículas se contraen y proporcionan un impulso adicional para penetrar sangre en los ventrículos, en este momento la presiones en las aurículas son superiores a la de los ventrículos por encontrarse éstos relajados y las válvulas A-V permanecen abiertas lo que permite el paso de sangre de las aurículas a los ventrículos. La contracción de la aurícula produce un aumento de la presión en esta cavidad y por tanto aumenta el flujo de sangre para terminar de llenar el ventrículo [1]. En la figura 1, se muestra el patrón de flujo transmitral normal.

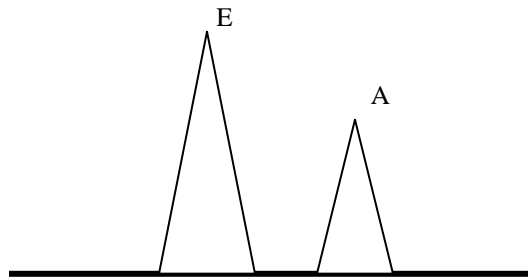


Figura 1. Flujo transmitral normal. E onda de llenado rápido. A onda de contracción

Cuando el corazón no se relaja o sufre alguna alteración en este proceso de relajación o diástole, se produce un ciclo anormal de bombeo, esto se conoce como la disfunción diastólica (DD). La consecuencia de la DD es un aumento de las presiones en la aurícula izquierda (AI), sin que aumente de forma paralela el volumen telediastólico del ventrículo izquierdo (VI), conduciendo a un descenso del gasto cardíaco. El aumento de presión en la AI se transmitirá, retrógradamente, a las venas pulmonares, causando hipertensión pulmonar poscapilar y plétora en el territorio venoso [7].

En promedio, el 40 por ciento de los pacientes con cardiopatía poseen función sistólica conservada. La incidencia de la insuficiencia cardíaca diastólica aumenta con la edad, y es más común en mujeres mayores. Las causas más comunes de la insuficiencia cardíaca diastólica incluyen la sobrecarga de volumen; taquicardia, ejercicio, la hipertensión; isquemia; factores de estrés sistémicos (por ejemplo, la anemia, fiebre, infección, hipertiroidismo); arritmia (por ejemplo, fibrilación auricular, auriculo-ventricular bloqueo del nodo), aumento de la ingesta de sal, y el uso de los fármacos anti-inflamatorios no esteroideos.

La insuficiencia cardíaca diastólica, representa entre el 30 y 50% de todos los casos de insuficiencia cardíaca, y su pronóstico es tan desfavorable como el de la insuficiencia cardíaca con función sistólica deprimida. Hay estudios que indican que 1 de cada 3 pacientes con insuficiencia cardíaca tiene fracción de eyección normal o casi normal. La disfunción diastólica puede definirse como la condición en la cual, para mantener gasto cardíaco normal, la presión de llenado se encuentra aumentada. Por tanto, pacientes con disfunción diastólica pueden manifestar una variedad de síntomas, desde disnea de esfuerzo hasta insuficiencia cardíaca avanzada [4].

La mortalidad es de 5 a 8% anual, comparando con 10 a 15 % de pacientes con insuficiencia cardíaca sistólica. En el caso de insuficiencia cardíaca sistólica la mortalidad está en relación con la edad y a la presencia de enfermedad coronaria. La morbilidad es similar para ambos tipos de insuficiencia cardíaca [4].

Por lo anteriormente descrito es importante realizar un análisis del proceso de llenado ventricular y con ello lograr un mejor entendimiento de la fase diastólica tanto en condiciones normales o patológicas. Para lograr este objetivo se propone el diseño de un modelo matemático para la simulación y estudio de dicho proceso.

Algunos de los modelos matemáticos más conocidos del sistema cardiovascular hacen mayor énfasis en la sístole ventricular, considerando el llenado o diástole en forma pasiva [5-6], y no toman en cuenta las distintas fases de la diástole cuyo comportamiento requiere un estudio particular.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del modelo se propone una función de presión auricular que depende del volumen y de una elastancia variable. Esta función consiste en una señal sinusoidal que toma en cuenta la duración de las distintas etapas del ciclo cardíaco y la rigidez del ventrículo. La función de elastancia, en el caso de la AI, se define en la siguiente ecuación:

$$E_{ai}(t) = \begin{cases} \frac{m}{E_{\min}} \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{\frac{n}{E_{\min}}(t_h - t_{ce})} \right) & t \geq t_{ce} \\ p \cdot \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{q(t_h - t_{ce})} \right) & t \geq t^{**} \end{cases} \quad (2)$$

Donde m , n , p , q son constantes, E_{\min} es el valor de la elastancia mínima, t_h es la duración del ciclo, t_{ce} duración de la sístole y t^{**} , corresponde al 85% del valor de la duración total de la diástole, es decir, en el momento en que aproximadamente ocurre la contracción auricular. Así se obtiene un llenado ventricular más próximo a la realidad.

Por otra parte, la presión auricular que depende de esta elastancia variable y genera el flujo tricúspide puede modelarse mediante la siguiente ecuación:

$$p_{ai} = E_{ai}(t)(V_{ai} - V_{0,ai}) \quad (3)$$

donde, $E_{ai}(t)$ es la elastancia auricular izquierda activa según Ec. (2), V_{ai} , el volumen auricular izquierdo y $V_{0,ai}$ el volumen a presión cero en la aurícula izquierda (constante)

El flujo tricúspide viene dado de la siguiente forma:

$$Q_{ai} = \frac{R_{ai}}{L_{ai}} (P_{ai} - P_{vi}) \quad (4)$$

Donde R_{ai} y L_{ai} representan las propiedades viscosas y de inercia del flujo sanguíneo, respectivamente; P_{ai} es la presión auricular izquierda y P_{vi} la presión ventricular izquierda [5].

Para complementar el modelo propuesto, se utiliza un modelo del sistema circulatorio propuesto por Ottesen [5], que complementa la propuesta para obtener la respuesta completa del sistema cardiovascular

3. RESULTADOS

En la figura 2, se muestra la presión auricular como función de la elastancia, en donde puede observarse un comportamiento acorde con el comportamiento fisiológico en estado normal [8].

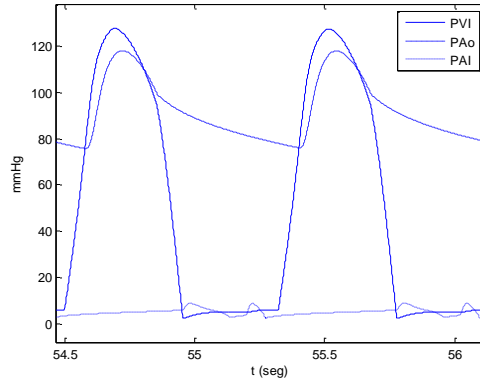


Figura 2- Presión Ventricular Izquierda, PAo: Presión Aortica, PAI: Presión Auricular Izquierda

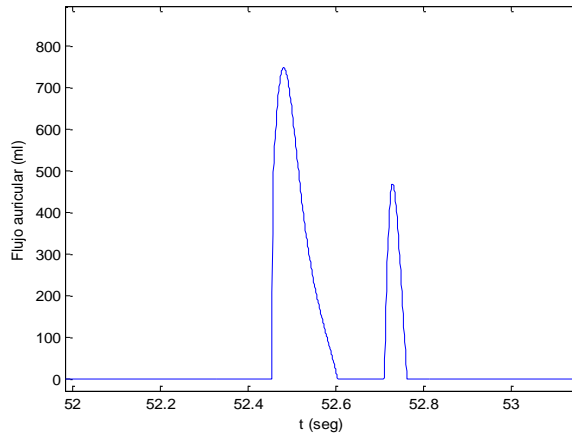


Figura 3- Flujo de salida de la aurícula izquierda.

En la figura 3 se observa el flujo auricular izquierdo en donde se refleja el patrón normal de flujo auricular, siguiendo el modelo mostrado en la figura 1, La primera curva pertenece a la

primera fase de llenado, produciéndose durante aproximadamente en el primer tercio de la diástole, seguidamente se produce el llenado lento y para finalizar, la curva de menor amplitud es la correspondiente a la contracción auricular.

La figura 4 muestra el comportamiento del volumen ventricular tanto en sístole como en diástole, en esta última se distinguen las tres fases, llenado lento, diástasis y contracción auricular.

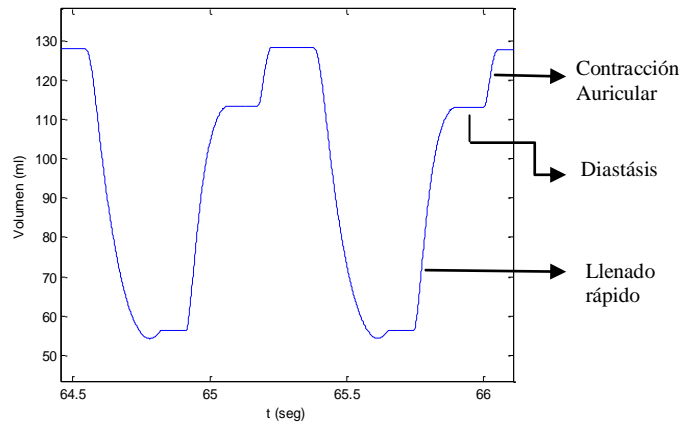


Figura 4. Volumen Ventricular Izquierdo

Si se produce un enlentecimiento en la fase de relajación isovolumétrica del VI, disminuirá el gradiente de presión entre la AI y el VI, que puede conducir a insuficiencia cardíaca por disfunción diastólica [6]. Por medio de la observación de las variaciones en el patrón de flujo auricular es posible detectar este enlentecimiento. En el caso del modelo se simula una hipertrofia (aumento de la rigidez ventricular) y se observa las variaciones del flujo (Fig. 5).

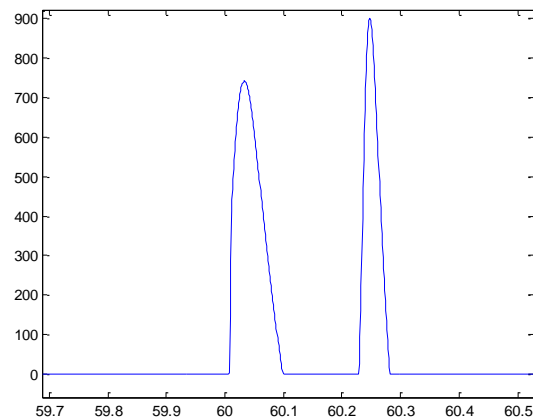


Figura 5. Variación del patrón de flujo auricular por relajación enlentecida

4. CONCLUSIONES

El estudio del llenado ventricular permite analizar el comportamiento del ciclo cardiaco en la etapa de llenado. El modelo propuesto consigue simular las diferentes fases dentro de la diástole y así tener una aproximación más cercana a la realidad.

Adicionalmente se incluyeron modificaciones en los parámetros del modelo para representar algún tipo de DD, y observar su comportamiento. En este caso se alteró el valor que representa la rigidez ventricular y se obtuvo el patrón de flujo correspondiente al enlentecimiento de la fase de relajación, el cual se produce en esta clase de DD, logrando entonces un buen desempeño del modelo basado en su capacidad de representar la respuesta fisiológica del sistema real ante esta perturbación.

REFERENCIAS

- [1].Segarra, E., *Fisiología de los Aparatos y Sistemas*. Universidad de Cuenca. Facultad de Ciencias Médicas, 2006.
- [2].Topol, E., *Textbook of Cardiovascular Medicine* Third Edition Lippincott Williams & Wilkins. 2007
- [3].Satpathy, C., Mishra, T., Satpathy, R., Satphaty, H., Barone Eugene., *Diagnosis and Management of Diastolic Dysfunction and Heart Failure*. American Family Physician. Vol 73, n. 5, pp. 841-846, 2006.
- [4].Correa, M., Sánchez, A. Villegas, E., Salazar, H., *Diagnóstico y tratamiento de la insuficiencia cardiaca diastólica*. Revista de Postgrado de la VIa. Cátedra de Medicina. N.145. pp. 9 – 12. 2005.
- [5].Ottesen J. et al. *Applied Mathematics Model in Human Physiology*. Siam, Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia. 2004
- [6]. Ursino Mario. *Interaction between carotid baroregulation and the pulsating heart: a mathematical model*. Am J Physiol Heart Circ Physiol, Vol. 275 pp. 1733-1747. 1998
- [7].García, R., Sánchez, M., González, A., González V., A., Herrero, P., Hevia C. *Insuficiencia cardíaca con disfunción diastólica*.
http://www.secex.org/revista/revista_5_05.php
- [8].Guyton A., Hall, J.,. *Tratado de Fisiología Médica*. Mc Graw Hill. Décima Edición

NUMERICAL STUDY (FEA & CFD) OF ABDOMINAL AORTIC ANEURYSMS TO PREDICT RISK OF RUPTURE - THE ROLE OF POROSITY OF THE THROMBOSIS.

OMAR ALTUWAIJRI

oaltwijri@KSU.EDU.SA

Department of Biomedical Technology, King Saud University, Saudi

Abstract. *Abdominal aortic aneurysm (AAA) is a cardiovascular disease occurring when the aorta becomes weak and develops a balloon expansion in its wall. This balloon diameter can reach sizes up to 4 times the normal aortic diameter, with the diameter enlarging at rates of 0.2–1.0 cm/year. Ruptured aneurysm leads to death in 78% – 94% of diseased aortas [1]*

Aneurysm rupture is a biomechanical event that occurs when the mechanical stresses in the wall of the aorta exceed the failure strength of the aortic tissue [2].

In medical practice, when the maximum diameter of AAA exceeds 5 cm it is considered at risk of rupture. Surgical repair is usually not considered until the diameter reaches at least 5 cm. However, It is frequently observed that AAAs with diameters less than 4 cm can rupture which raise the need of finding a more reliable method to assess rupture risk.

The role of the intraluminal thrombus (ILT) which exists in more than 75% of AAA was examined using variable thickness and material properties of the thrombus. For simplification purposes, it is assumed that ILT is a solid material, as sourced from previous studies, even though in reality ILT is a highly porous material with an average porosity of 80% [3]. The porosity of the ILT has been experimentally examined in number of studies [4; 5; 6].

Two recent numerical studies have examined the porosity of ILT using finite element models [7; 8] which have provided useful information about the impact of thrombus porosity on AAA biomechanics but both neglected the actual dynamics of blood mass flow.

Keywords: Abdominal aortic aneurysm, Intraluminal thrombus (ILT), Porosity of thrombosis.

1. INTRODUCTION

Abdominal aortic aneurysm (AAA) is a cardiovascular disease occurring when the aorta becomes weak and develops a balloon expansion in its wall. This balloon diameter can reach

sizes up to 4 times the normal aortic diameter, with the diameter enlarging at rates of 0.2–1.0 cm/year. Ruptured aneurysm leads to death in 78% – 94% of diseased aortas [1].

Aneurysm rupture is a biomechanical event that occurs when the mechanical stresses in the wall of the aorta exceed the failure strength of the aortic tissue [2].

In medical practice, when the maximum diameter of AAA exceeds 5 cm it is considered at risk of rupture. Surgical repair is usually not considered until the diameter reaches at least 5 cm. However, It is frequently observed that AAAs with diameters less than 4 cm can rupture which raise the need of finding a more reliable method to assess rupture risk.

The role of the intraluminal thrombus (ILT) which exists in more than 75% of AAA was examined using variable thickness and material properties of the thrombus. For simplification purposes, it is assumed that ILT is a solid material, as sourced from previous studies, even though in reality ILT is a highly porous material with an average porosity of 80% [3]. The porosity of the ILT has been experimentally examined in number of [4; 5; 6].

Two recent numerical studies have examined the porosity of ILT using finite element models [7,8] which have provided useful information about the impact of thrombus porosity on AAA biomechanics but both neglected the actual dynamics of blood mass flow. A lack of knowledge remains on how modelling the porosity of the ILT may contribute to the understanding and the assessment of AAA.

In this study, the porosity of ILT was examined using a computational fluid dynamics model to investigate how blood flows within the thrombus and how the information gained can be used to aid in AAA diagnosis and possible reasons for its growth.

2. METHOD

Simple fusiform axisymmetric three-dimensional (3D) aneurysm model were constructed with inlet diameter of 2.0 cm; maximum aneurysm diameter 5.0 cm. ILT layer with 10 mm maximum thickness were added to the model (see Fig. 1).

ANSYS CFX Computational fluid dynamics solution was used, an assumption of Newtonian flow. Steady flow with velocity of 25 cm/s at the inlet and blood pressure of 120 mmHg at the outlet was used with blood density, 1050 kg/m³; blood dynamic viscosity, 0.0035 Poiseuille (Pa.s).

In CFD, modelling porous material numerically involves applying Darcy's law that describes the flow of a fluid through a porous medium in the following form:

$$Q = \frac{kA}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial L} \right)$$

Where:

Q is the flow rate of the blood.

k is the permeability of the ILT.

A is the cross-sectional area of the aorta.

μ is the viscosity of the blood.

L is the length of the porous media the fluid will flow through.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial L}\right)$$

represents the pressure change per unit length of the blood.

The interface between the blood lumen and the porous ILT material allows blood to flow inside the ILT. The permeability value of the ILT was taken from Adolph et al. [3], who reported that ILT of $0.91 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N} \cdot \text{s}$. The three values of permeability will be examined to understand its effect.

For the fluid medium, a steady flow at a constant velocity of 25 cm/s at the inlet and blood pressure of 120 mmHg at the outlet used with a blood density of 1121 kg/m^3 and blood dynamic viscosity of $0.0035 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [8].

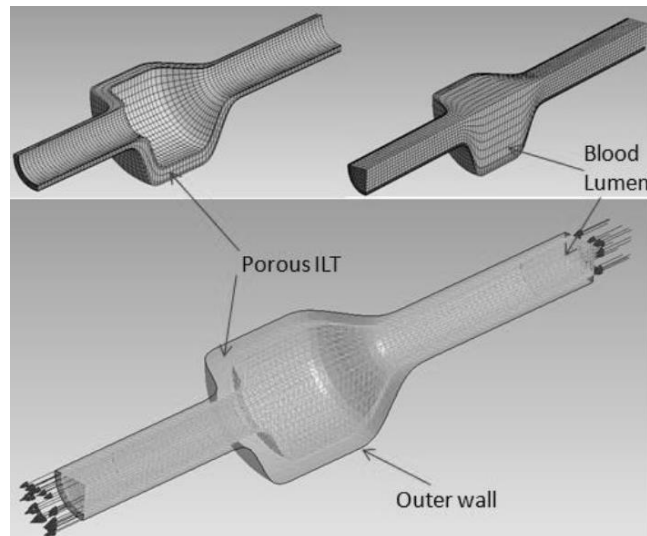


Figure 1: The porous ILT in grey and blood lumen domain in green mesh.

3. RESULTS

Results from these analyses illustrated in Figures 2 and 3 show that the flow inside the ILT has much smaller velocity than flow in blood lumen. It also shows that flow is more able to transmit to ILT at the distal region of aneurysm.

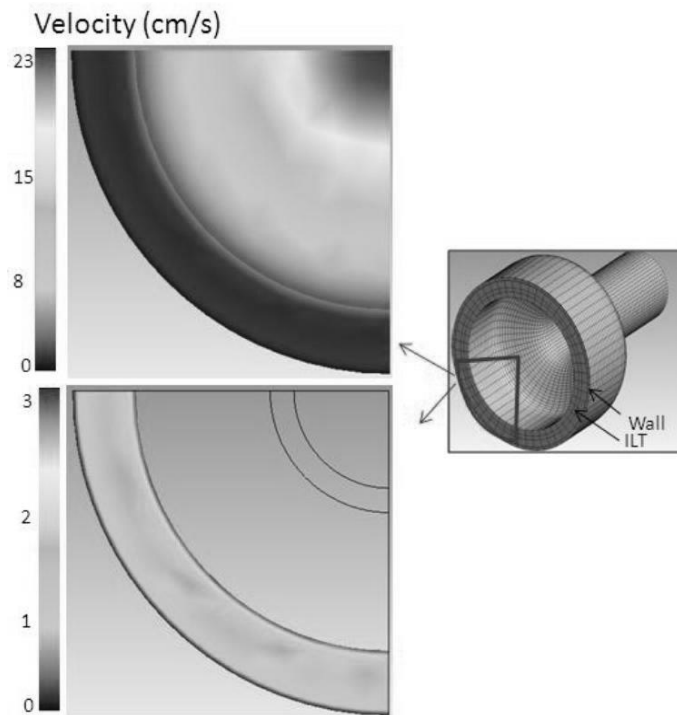


Figure 2: Velocity map on a cross sectional view for blood flow on whole aneurysm (top) and only in the ILT (bottom).

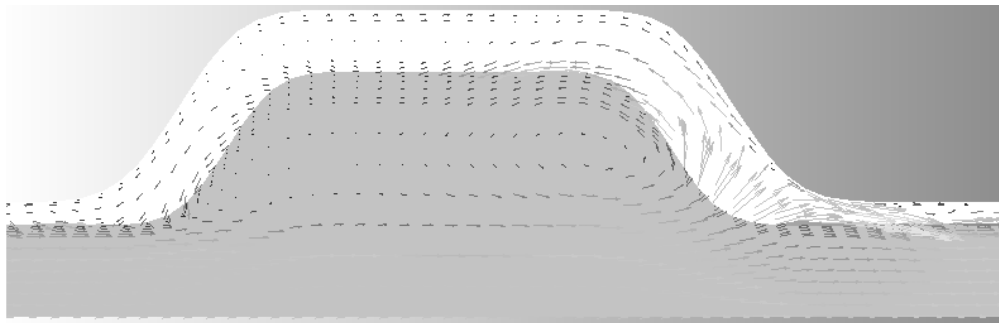


Figure 3: Velocity vectors of blood flow in the blood lumen (grey background) and the ILT (white background).

Figure 4 shows the pressure gradients of the cross sectional view of the ILT in the middle of the aneurysm varying between 119 to 120 mmHg.

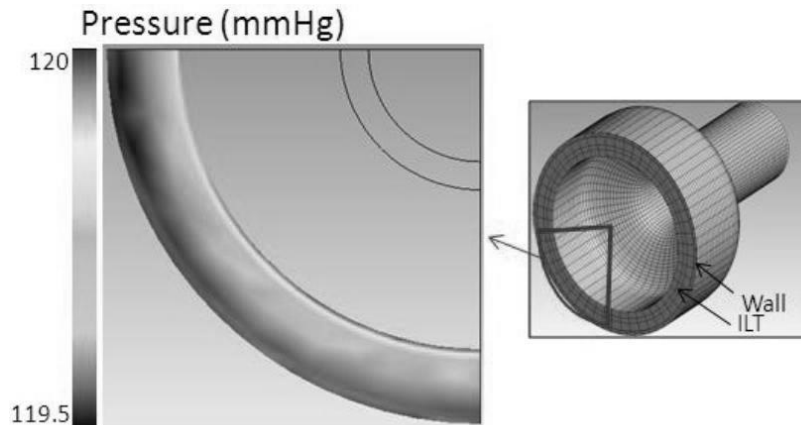


Figure 4: Pressure gradients of the cross sectional view of the ILT in the middle of the aneurysm.

3. DESCUSSION

Figure 2 shows that the flow can actually move from blood lumen to the ILT and noticeable blood movement could be seen within the ILT, which agrees with the conclusion of Adolph et al. [3], who experimentally carried out a histologic analysis for the ILT and suggested that fluid and smaller molecules may pass freely through the thrombus via the canaliculi network. Another very interesting observation can be also seen at the distal end of the aneurysm, in that the flow is more able to transmit through the ILT in this region (recorded velocity in this region is the highest in ILT = 9.6 cm/s) compared to other locations of the ILT. This could be as a result of the perpendicular force of the flow and the continuous vortices' formation in this location, and could have implications for the rupture in these regions. This observation needs to be investigated clinically as it may explain why the aneurysm grows at the distal region of the aneurysm. That could be a result of the continuous movement of the blood and its smaller molecules in this region. Specifically, it could explain why the Matrix metalloproteinases (MMPs) - which is highly linked with AAA pathology - are concentrated in a region of AAA which is at high risk of rupture, as concluded by Wilson et al. [9] in their clinical study, who reported that there was a localized increase in MMP-8 and MMP-9 concentrations at the site of aortic rupture. Another possible advantages of such modelling is that modelling blood flow within the ILT will be important in future work investigating drug delivery solutions in AAA, which is a significant potential new AAA treatment methodology as reported by Ayyalasomayajula et al. [10].

Figure 4 illustrates the pressure drop within the ILT, where it can be seen that the pressure decreases with ILT depth but that the total drop is very small (less than 0.5%). This is not a surprising observation because the ILT was modelled with high porosity (80%) and it will be expected that the pressure drop will be minimal. This is in strong agreement with the results reported by Schurink et al. [10], who found no reduction in blood pressure under the ILT. In their clinical study, Schurink et al. investigated nine patients who underwent operations for an AAA at the level of the thickest thrombus lining; the pressure within the aneurysmal thrombus (just inside the aneurysmal wall) was measured and compared with the systemic pressure and no difference were found. Similar results reported by Takagi et al. [11] who conclude that the thrombus of an aneurysm does not significantly decrease the pressure on the aneurysmal wall. It is also in agreement with the recent blood pressure measurements of Polzer and Bursa [7], who

numerically used poroelastic material for the ILT and reported no reduction of pressure between the blood lumen and underneath the ILT.

REFERENCES

- [1].Finol, K., C. H. Amon. (2003) the effect of asymmetry in abdominal aortic aneurysms under physiologically realistic pulsatile flow conditions. *Journal of Biomechanical Engineering* 125: 207 - 217.
- [2].Speelman A, Bosboom E, Schurink G, Vande vosse F, Makaorun M, Vorp D; (2008), Effects of wall calcifications in patient-specific wall stress analyses of abdominal aortic aneurysms. *Journal of biomechanical engineering*, 129(1): 105-9.
- [3].Ashton J, Geest J, Bruce S, Haskett D; (2009), Compressive mechanical properties of the intraluminal thrombus in abdominal aortic aneurysms and fibrin-based thrombus mimics. *J biomech*, 42(3): 197–201.
- [4].Adolph R, Vorp DA, Steed DL, Webster MW, Kameneva MV, Watkins SC; (1997) Cellular content and permeability of intraluminal thrombus in abdominal aortic aneurysm. *J Vasc Surg.*;25(5):916–26.
- [5].Di Martino S, Guadagni G, Fumero A, Ballerini G, Spirito R, Biglioli P, Redaelli A; (2001), Fluid-structure interaction within realistic three-dimensional models of the aneurysmatic aorta as a guidance to assess the risk of rupture of the aneurysm. *medical engineering & physics*, 23: 647-655.
- [6].Gasser Christian , Giampaolo Martufi, Martin Auer, Maggie Folkesson, Jesper Swedenborg (2010), Micromechanical Characterization of Intraluminal Thrombus Tissue from Abdominal Aortic Aneurysms, *Annals of Biomedical Engineering*, volume (38) 2, 371--379
- [7].Polzer S. and Bursa J.; (2010) Poroelastic Model of Intraluminal Thrombus in FEA of Aortic Aneurysm, 6th World Congress of Biomechanics . August 1-6, 2010 Singapore, *IFMBE Proceedings*, Volume 31, Part 3, 763-767.
- [8].Yu S; (2000), Steady and pulsatile flow studies in abdominal aortic aneurysm models using particle image velocimetry. *International journal of heat and fluid flow*, 21: 74-83.
- [9].Wilson R, Anderton M, Schwalbe E, Jones L, Furness P, Bell P, Thompson M; (2006), Matrix Metalloproteinase-8 and -9 Are Increased at the Site of Abdominal Aortic Aneurysm Rupture. *Circulation*,113:438-445.
- [10]. Schurink G, Van Baalen J, Visser M, Van Bockel J; (2000), Thrombus within an aortic aneurysm does not reduce pressure on the aneurysmal wall. *Journal of Vascular Surgery*, 31:501-506 .
- [11]. Takagi H, Yoshikawa S, Mizuno Y, Matsuno Y, Umeda Y, Fukumoto Y, Mori Y; (2005) Intrathrombotic pressure of a thrombosed abdominal aortic aneurysm. *Ann Vasc Surg*. Jan;19(1):108-12.

COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE TRES MODELOS DE IMPLANTES CIGOMÁTICOS A TRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS

José J. Valera

Mariangel Berroterán

Adriana Lammardo

Carmen Müller-Karger

jjvalera.casique@gmail.com

marivbe@gmail.com

adrianalow006@gmail.com

cmuller@usb.ve

Grupo de Biomecánica. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar. Valle de Sartenejas, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela.

Resumen: *Una de las maneras para tratar las atroñas del maxilar superior es mediante el uso de implantes cigomáticos. En este trabajo se compararon tres configuraciones: cigomático intrasinusal, cigomático extramaxilar y combinación de cigomático con implantes dentales convencionales. Los modelos de la mandíbula se elaboraron a partir de imágenes de tomografía axial computarizada (TAC), y los implantes se dibujaron tomando como patrón modelos comerciales. Se realizó el ensamblaje de los componentes para conocer la respuesta de éstas configuraciones ante las cargas a las cuales están sometidas regularmente, especialmente las correspondientes a la masticación. Dicha respuesta fue estudiada mediante el análisis de esfuerzos a través del método de elementos finitos. Los resultados obtenidos muestran que con los implantes cigomáticos se disminuyen los esfuerzos en el hueso respecto al cráneo dentado. Además, la combinación de implantes cigomático-convencional favorece la distribución de los mismos debido a que el ángulo de inclinación permite una mejor distribución de las fuerzas en todas las direcciones.*

Palabras claves: atrofía maxilar, implante cigomático, análisis de esfuerzos, elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento convencional de la pérdida de dentadura en el maxilar superior, así como de la mandíbula, se basa en colocar dentaduras completas que recuperen la estética, la funcionalidad y la comodidad del paciente. Sin embargo, las personas han manifestado inconformidad y además se ha detectado que esta solución acelera la pérdida del hueso. Una alternativa fue propuesta en 1988 por Brånemark System con el uso de implantes cigomáticos, cuya intención principal era el tratamiento de personas que habían sufrido tumores en el maxilar superior, pero su uso se ha extendido ampliamente, tal como lo señala Ishak *et al.* [1]. Existen cuatro tipos principales de procedimientos quirúrgicos para la colocación de estos implantes: intrasinusal, ranura sinusal, extrasinusal y extramaxilar, según reportan Ishak *et al.* [2] y Stella *et al.* [2]. La principal diferencia entre estas configuraciones es la resistencia mecánica que se origina durante la masticación debido a la localización de la cabeza del implante. También existen quienes recomiendan el uso de implantes cigomáticos en combinación con implantes convencionales, con el fin de mejorar la respuesta a las cargas mecánicas.

Para estudiar el desempeño de los distintos tipos de implantes, diversos investigadores, como Wang *et al.* [3], han utilizado el método de los elementos finitos (MEF) para evaluar los esfuerzos que se generan a partir de las cargas de masticación. En este artículo, utilizando el MEF, se presenta la comparación de tres tipos de configuraciones de implantes cigomáticos: intrasinusal (implante dentro de los límites del seno maxilar), extramaxilar (cuerpo del implante anclado en el arco cigomático) y combinado, así como el comportamiento de una mandíbula sana, totalmente dentada.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 Modelo tridimensional del cráneo

Utilizando *Mimics 15.0*[®]; programa para generar modelos 3D a partir de imágenes de Tomografía Axial Computarizada (TAC), se obtuvo el modelo anatómico del cráneo completo, mediante el procedimiento de segmentación básica. En la Fig. 1a se muestra la segmentación realizada al cráneo y en la Fig. 1b se distingue en 3D la sección del cráneo utilizada para los estudios.

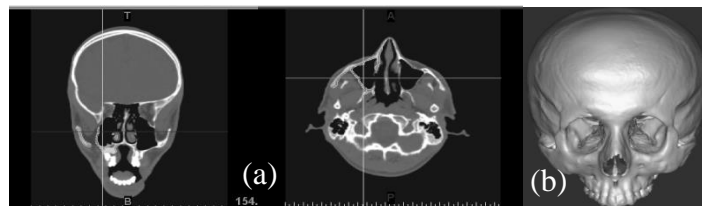


Figura 1- Segmentación ósea realizada para el cráneo, utilizando Mimics 15.0[®].

2.2 Diseño de los implantes cigomáticos

Basados en las geometrías y dimensiones estándar brindadas por el catálogo 2013 de la compañía Nobel Care [4], se dibujaron los modelos de los implantes a estudiar utilizando el programa de Diseño Asistido por Computadora (CAD) *SolidWorks 2012*[®] [5]. Cabe destacar que fueron simplificados con respecto a los modelos comerciales, omitiendo roscas y extremos detallados, con la finalidad de facilitar tanto el dibujo como las simulaciones a realizar.

Implante simple para configuración intrasinusal y extramaxilar: la longitud del implante para ambos casos es de 46,5 mm y su diámetro es de 4,5 mm modelo Branemark System[®] Zygoma. La cabeza del implante tiene un ángulo de inclinación de 45°. En la Fig. 2 se muestran dos vistas de este modelo de implante.



Figura 2- Implante cigomático intrasinusal y extramaxilar: (a) vista lateral y (b) vista isométrica.

Implante combinado: el implante cigomático utilizado para esta configuración es el Branemark System[®] Zygoma de 45 mm de longitud, 4,40 mm de diámetro y un ángulo de 45°, ubicado sobre una base curvada de 8x6 mm de sección transversal, sobre la cual se tienen dos implantes convencionales modelo Branemark System[®] Mark IV de 10 mm de longitud y 4 mm de diámetro, ubicados a 5,20 y 12,50 mm de distancia respecto al plano sagital del modelo, y a un ángulo de 6 y 14° respecto al plano frontal, respectivamente. En la Fig. 3 se observa esta configuración.

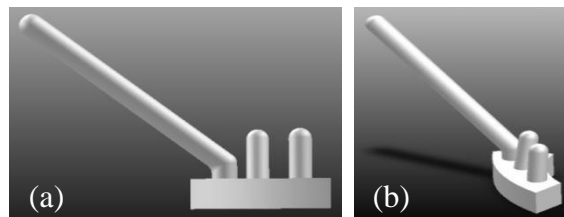


Figura 3- Implante combinado, cigomático y dos convencionales: (a) vista frontal y (b) vista isométrica.

2.3 Ensamblado y mallado de los componentes

Los modelos de implantes fueron importados en archivos .stl al programa *Mimics 15.0*[®] [6] donde se ubicaron dentro del cráneo según lo muestran Ishak *et al.* [1] y Ujigawa *et al.* [7]. Luego, ambos componentes se importaron al programa *3-matic 7.01*[®] para ensamblarlos utilizando la herramienta “non-manifold assembly”, lo cual garantiza la congruencia de nodos entre las mallas de ambos componentes. Se elaboraron varias mallas volumétricas de cada configuración con la finalidad de realizar un estudio de convergencia. Todas las mallas fueron exportadas en formato .cdb para la simulación por el método de los elementos finitos.

2.4 Análisis por el Método de Elementos Finitos

Para las simulaciones se utilizó el programa *Ansys 14*[®] [8]. Las mallas fueron elaboradas con elementos tetraedrales de 10 nodos y tres grados de libertad, SOLID187 el cual se adapta perfectamente en el modelado de superficies irregulares. Con las mallas definidas, se procedió a designar el material de cada componente y las cargas y restricciones de los modelos.

Materiales: Para todos los casos de estudio, se simplificaron los modelos, tomando en cuenta solamente el hueso cortical debido a que es el de mayor presencia en la zona estudiada y se consideraron materiales homogéneos, isotrópicos y elásticos, tanto para el hueso como para los implantes. En la Tabla 1 se listan las propiedades más importantes de los materiales asignados a cada componente.

Tabla 1. Propiedades de los materiales definidos en los modelos [1].

Material	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Hueso cortical	13400	0,3
Titanio quirúrgico	110000	0,33

Cargas y restricciones: Para todos los modelos, se restringió la zona superior y posterior de la sección de cráneo en todas las direcciones, tal como se muestra en la Fig. 4a y Fig. 4b. Además, se estableció condición de simetría en el plano sagital. Para las cargas en los modelos, se simuló la fuerza del músculo masetero colocando 5 fuerzas de 60 N cada una, cuyas componentes fueron: 12,42 en x , 53,04 en y , y -25,14 en z , lo que da un total de 300 N. En la zona inferior del maxilar, donde se coloca la cabeza del implante, se simularon las fuerzas de oclusión con 150 N en la dirección vertical (eje z). En la Fig. 4c se muestra una imagen representativa de las cargas ubicadas en todos los modelos estudiados, basados en los realizados por Ishak *et al.* [1] y Ujigawa *et al.* [7].

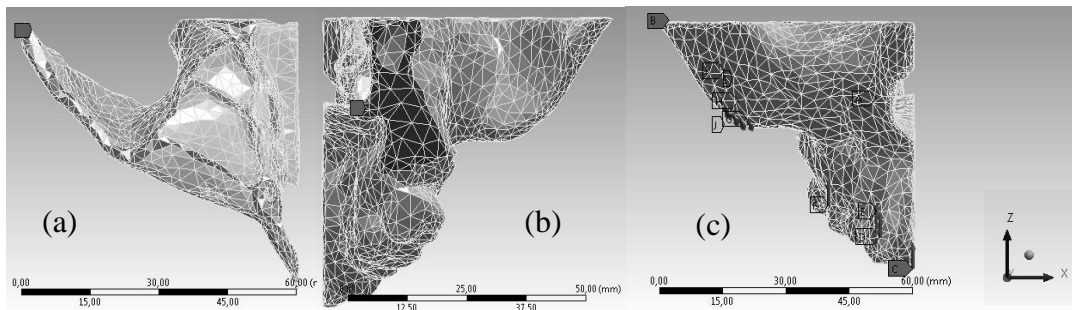


Figura 4- Zonas de restricciones de desplazamiento en todas las direcciones: (a) zona superior y (b) zona posterior, y (c) cargas simuladas en todos los modelos.

Análisis de convergencia: Se realizaron simulaciones con varios tamaños de elemento con la finalidad de determinar la malla óptima para obtener resultados confiables a partir del MEF. En la Tabla 2 se listan los datos de las mallas finales con las que se trabajó cada modelo. Se tomaron como resultados críticos para este análisis el esfuerzo de Von Mises, la deformación y los desplazamientos.

3. RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos y mostrados en la Tabla 2, se observa que todos los modelos o configuraciones de implantes disminuyen los esfuerzos que se generan en el hueso cigomático respecto al cráneo dentado. Esto está relacionado a la diferencia de módulo elástico de cada material, siendo el del titanio mucho mayor al del hueso cortical lo que le permite distribuir y soportar mejor los esfuerzos generados por las fuerzas oclusales y del músculo masetero, lo cual concuerda con lo reportado por Ujigawa *et al.* [7].

En la Fig. 5 se muestran imágenes de los resultados de los esfuerzos, para el cráneo dentado y para los modelos cráneo-implante. Se puede observar que el esfuerzo máximo se ubica en la cresta del arco cigomático, y en los implantes se ubica en la zona media. Esto se corresponde con los resultados mostrados por Ujigawa *et al.* [7] en su investigación, lo cual se debe a que el implante transfiere los esfuerzos hacia el hueso a través de la cresta infracigomática. También se observa en la Tabla 2 que los implantes intrasinusal y extramaxilar presentan menores valores de esfuerzos que el combinado, de la misma forma se puede apreciar en la Fig. 6c que la distribución de esfuerzos en este mismo implante es más suave y uniforme a lo largo de toda la geometría, indicando que la mejor distribución la presenta la combinación de implantes y esto a su vez beneficia la respuesta del hueso cigomático, evitando así la reabsorción del mismo por falta de cargas mecánicas, tal como lo explica Ujigawa *et al.* [7]. Además, con los implantes convencionales se previenen cargas rotacionales del implante que pueden afectar la integridad del mismo. Las deformaciones y desplazamientos siguen la misma tendencia, siendo menores los originados en los modelos con implantes que en el cráneo dentado.

Tabla 2. Datos de las mallas de convergencia para cada configuración estudiada y resultados de esfuerzo, desplazamiento y deformaciones máximas.

Configuración	Tamaño de elemento (mm)	Nº elementos	$\sigma_{\text{máx_imp}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{máx_cr}}$ (MPa)	$d_{\text{máx}}$ (mm)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)
Cráneo dentado	4	15594	-	41,731	0,017527	0,0031843
Intrasinusal	2,5	29516	11,464	23,496	0,012069	0,0017751
Extramaxilar	4	15894	13,315	13,854	0,0097369	0,0010619
Combinado	3,5	14240	25,385	29,699	0,066243	0,0029012

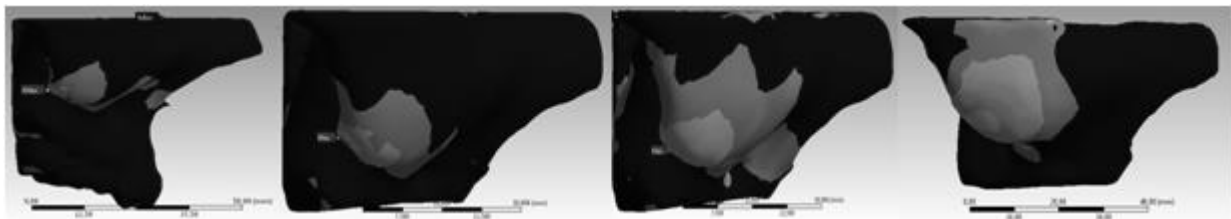


Figura 5- Resultados de esfuerzos en el cráneo (a) dentado, (b) intrasinusal, (c) extramaxilar y (d) combinado.

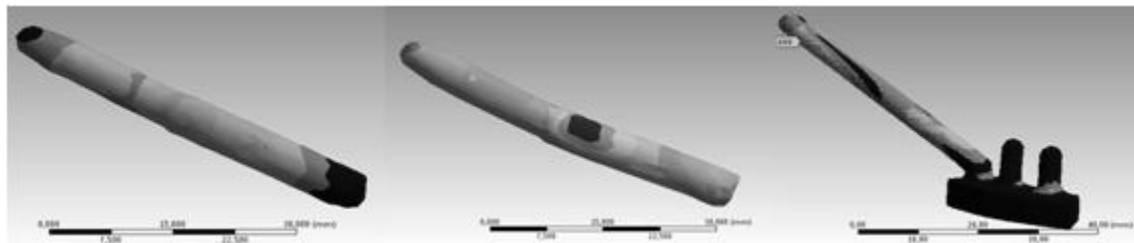


Figura 6- Resultados de esfuerzos en los implantes (a) intrasinusal, (b) extramaxilar y (c) combinado.

4. CONCLUSIONES

El uso de implantes cigomáticos contribuye con la redistribución de esfuerzos en el maxilar de pacientes que han sufrido reabsorción o pérdida de masa ósea en esta zona. En general, los esfuerzos generados son menores que en el modelo de cráneo dentado, y esto se debe a la alta resistencia que tiene el titanio, material con el cual se fabrican los implantes. Las configuraciones sencillas generan esfuerzos menores respecto a la configuración combinada con implantes convencionales, por lo cual estos últimos son más convenientes para garantizar la integridad ósea del cigomático al evitar que se produzca reabsorción por descarga mecánica, y al mismo tiempo evitan cargas rotacionales que puedan provocar la falla del implante en el hueso.

REFERENCIAS

- [1].Ishak, M., Abdul M., Sulaiman, E. & Abu N., Finite element analysis of different surgical approaches in various occlusal loading locations for zygomatic implant placement for the treatment of atrophic maxillae. *International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*, vol. 41, pp. 1077-1089, 2012.
- [2].Stella, J., Warner, M., Sinus slot technique for simplification and improved orientation of zygomaticus dental implants: a technical note. *International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*, vol. 15, pp. 889-893, 2000.
- [3].Wang, M., Qu, X., Cao, M., Wang, D. & Zhang, C., Biomechanical three-dimensional finite element analysis of prostheses retained with/without zygoma implants in maxillectomy patients. *Journal of Biomechanics*, vol. 46, pp. 1155-1161, 2013.
- [4].Nobel Bio Care, *Product Catalog*, pp. 48-51, 2013. Disponible en: <http://www.nobelbiocare.com/en/products-solutions/product-catalog/default.aspx>. Fecha de consulta: Junio 2013.
- [5].Solidworks (version 2012) [software]. (2012), www.solidworks.com.
- [6].Mimics (version 15.0) [software]. (2012), www.materialise.com.
- [7].Ujigawa, K., Kato Y., Kizu Y., Tonogi M & Yamane, G., Three dimensional finite element analysis of zygomatic implants in craniofacial structures, *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, vol. 36, pp. 620-625, 2007.
- [8].Ansys (version 14.0) [software]. (2012), www.ansys.com.

ESTIMACIÓN DE DESCRIPTORES DE LA FUNCIÓN VENTRICULAR DERECHA EN IMÁGENES DE TOMOGRAFÍA CARDIACA

Miguel Vera

Rubén Medina

Antonio Bravo

Atilio del Mar

veramig@gmail.com

rmedina@ula.ve

antonio.j.bravo@gmail.com

atiliodelmar@yahoo.com

Centro de Ingeniería Biomédica y Telemedicina (CIByTel), Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Grupo de Bioingeniería, Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal, Venezuela.

Instituto de Bioingeniería y Diagnóstico Sociedad Anónima (IBIDSA), San Cristóbal 5001, Venezuela.

Oscar Valbuena

valbuenaosc@gmail.com

Laboratorio de Física, Universidad de Los Andes–Táchira, San Cristóbal 5001, Venezuela.

Abstract. *El objetivo de este trabajo es proponer una técnica para estimar ciertos descriptores asociados a la función ventricular derecha en imágenes cardiacas 3-D de tomografía computarizada multicapa (MSCT). Cada imagen cardiaca de MSCT considerada, se procesa utilizando las siguientes etapas: pre-procesamiento, segmentación del ventrículo derecho (RV) y cálculo de ciertos descriptores útiles para la estimación de la función del RV. La etapa de pre-procesamiento se divide en dos fases. En la primera fase, se aplica una técnica de filtrado denominada realce por similaridad. En la segunda fase, se utilizan máquinas de soporte vectorial de mínimos cuadrados (LSSVM) e información a priori, vinculada con la localización de las válvulas del RV, para definir una región de interés que aísla el RV de las estructuras anatómicas circundantes. La etapa de segmentación 3-D del RV, se implementa con base en un algoritmo variacional denominado conjunto de nivel (level set) el cual se inicializa con una iso-esfera sintética. En la última etapa, a partir de la segmentación del RV, se estiman los siguientes descriptores cardiacos: volumen diastólico final, volumen sistólico final, volumen latido y fracción de eyección. El error relativo porcentual es considerado para comparar los resultados obtenidos con respecto a los generados manualmente por un cardiólogo. Los resultados obtenidos, considerando 3 pacientes, son promisorios e indican que los descriptores calculados generan errores menores al 10%.*

Key words: Realce por similaridad, Segmentación del RV y Descriptores cardiacos.

1. Introducción

Para el 2012, en Europa, la mortalidad por enfermedades cardiovasculares (CVD) se ubicó en 47% [1]. En Estados Unidos, 1 de cada 4 muertes se debe a enfermedades cardiacas [1]. En Venezuela, las CVD ocupan el primer lugar entre las 25 principales causas de muerte [2]. Estas estadísticas sugieren la necesidad de suministrar un apoyo clínico a los médicos durante el monitoreo y la cuantificación de la función cardiovascular de pacientes afectados por CVD diagnosticadas usando cualquiera de las modalidades de imagenología cardiaca. En la presente investigación, la modalidad de imagenología cardiaca considerada fue la tomografía computarizada multi-corte (MSCT). Tal modalidad está basada en la adquisición simultánea de varios planos tomográficos usando un sistema de adquisición de múltiples detectores [3].

Adicionalmente, es necesario señalar que la cuantificación de la función cardiaca es una actividad importante en la rutina clínica que puede hacerse con base en la estimación de ciertos descriptores. Los descriptores que fueron considerados, en el presente trabajo, para la estimación de la función cardiaca derecha, fueron: el volumen diastólico final (FDV), el volumen sistólico final (FSV), el volumen latido (SV) y la fracción de eyección (EF). La obtención de tales descriptores requirió de la segmentación del RV y la aplicación de los modelos matemáticos que se presentan a continuación:

1) Volumen latido (SV). Es el volumen eyectado entre la diástole final y la sístole final [4] y puede calcularse usando la ecuación 1.

$$SV = FDV - FSV \quad , \quad (1)$$

donde FDV y FSV se calculan multiplicando las dimensiones del vóxel por el número de vóxeles que conforman el RV segmentado, en diástole final y sístole final, respectivamente.

2) Fracción de eyección (EF). Es un índice global del acortamiento de la fibra de las cámaras ventriculares [4] y se calcula con la ecuación 2.

$$EF = \frac{(FDV - FSV) * 100\%}{FDV} \quad . \quad (2)$$

En [4], se reportan investigaciones que estiman tales descriptores sólo para el ventrículo izquierdo. Adicionalmente, Angelini et al. [5], utilizando imágenes de ultrasonido cardiacas, desarrollan una técnica de denoising, denominada *brushlet analysis*, y un algoritmo basado en *level set* para segmentar ambos ventrículos y luego estimar sus EF . También, Souto et al. [6], desarrollaron un método de segmentación de imágenes de resonancia magnética cardiaca, usando técnicas de umbralización y crecimiento de regiones para estimar la función cardiaca de ambos ventrículos.

Por otra parte, la presente investigación es una extensión del trabajo presentado en [7] y los aportes son: 1) Generación automática de una región de interés usando LSSVM para colocar superficies que aíslan el RV de otras estructuras anatómicas. 2) Uso de un algoritmo basado en *level set* para segmentar el RV. 3) Estimación de descriptores de la función ventricular derecha.

2. Metodología

2.1. Descripción de las bases de datos

Se consideraron bases de datos (DB) cardiacas de MSCT, correspondientes a 3 pacientes. Cada DB posee 20 instantes que representan un ciclo cardiaco completo. Las DB son anisotrópicas y cada

una de sus imágenes es de 512×512 píxeles. En cada DB, un cardiólogo seleccionó los instantes tanto de diástole como de sístole final y generó las EF correspondientes al RV.

2.2. Pre-procesamiento

El pre-procesamiento permitió el acondicionamiento adecuado de los 6 instantes cardiacos seleccionados. A continuación se describen las etapas que se utilizaron para desarrollar esta fase.

1. Etapa de filtrado.

En la figura 1, se ha destacado mediante un recuadro la etapa de filtrado basada en realce por similitud [7]. Este tipo de realce consiste en aplicar a los instantes seleccionados, de manera independiente, un filtro promediador y un filtro *top hat*. En [7] se describe, detalladamente, cada uno de estos filtros. Considerando los volúmenes filtrados, una función de similitud genera un volumen de similitud calculando la suma de las diferencias cuadráticas, intra e inter volumétrica, de los vecinos directos del voxel analizado. Tal volumen de similitud es luego procesado con un filtro Gaussiano, el cual permite obtener un volumen suavizado en el que se preservan los bordes y se realza la información interna a ellos.

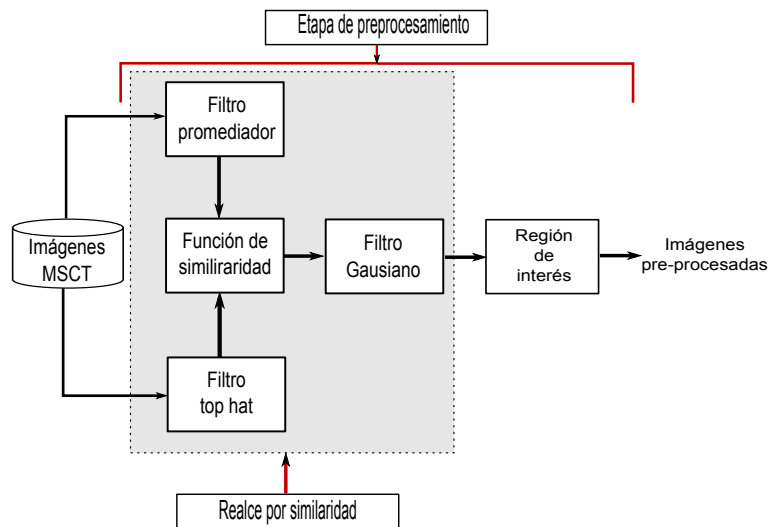


Figura 1: Esquema general para la técnica de pre-procesamiento propuesta.

2. Definición de una región de interés.

La similitud de los niveles de gris de los vóxeles que conforman la arteria pulmonar, la aurícula derecha y el RV, requiere la colocación de planos que faciliten la segmentación del RV. Ello requiere la elección de ciertos puntos de referencia los cuales pueden hacerse coincidir con: la unión de la válvula pulmonar con el RV ($P1$), la unión de la válvula tricúspide con el RV ($P2$) y un punto ubicado en el ápex del RV ($P3$). Estos puntos se muestran en la figura 2 y permiten construir 2 superficies que se denominan planos tricúspide y pulmonar. La colocación automática de tales planos se basó en: A) A partir de las imágenes filtradas con el realce por similitud se generaron imágenes remuestreadas, de tamaño

64×64 , usando una técnica de disminución de resolución espacial, basada en interpolación cúbica. B) Ubicación de los puntos de referencia $P1$, $P2$ y $P3$ en las imágenes remuestreadas. C) Consideración de LSSVM [8] para reconocer tales puntos de referencia. Para ello:

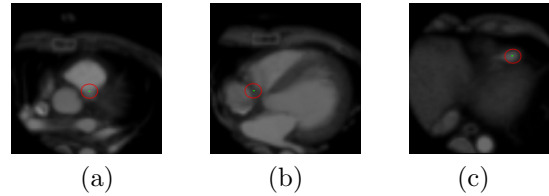


Figura 2: El centro de los círculos muestra la ubicación de los puntos de referencia para los planos: (a) $P1$. (b) $P2$. (c) $P3$.

- Se construyeron los respectivos conjuntos de entrenamiento y validación.
- Las variables que le permiten a las LSSVM aprender la superficie de decisión, se calculan eligiendo radios de 10 píxeles a partir de los cuales se construyen vecindades circulares, que contienen los puntos de referencia y otras que no los contienen. Tales vecindades fueron generadas sobre imágenes de entrenamiento y permitieron la configuración de vectores conformados por los atributos: media, varianza, desviación estándar y mediana.
- Considerando el plano axial de las imágenes de validación, se hizo la detección de los puntos de referencia de la siguiente forma: a) *Detección de $P1$ y $P2$* : Las LSSVM entrenadas para tal fin buscan estos puntos desde el ecuador, de cada DB filtrada, hasta la base de la misma. b) *Detección de $P3$* : La LSSVM entrenada para tal fin busca el punto $P3$ desde el ecuador, de cada DB filtrada, hasta el ápex del RV.
- Las coordenadas producidas por las LSSVM, para cada punto detectado, fueron mapeadas a las imágenes de tamaño original generando imágenes en las que el RV quedó aislado de otras estructuras cardiacas, como lo muestra la figura 3.

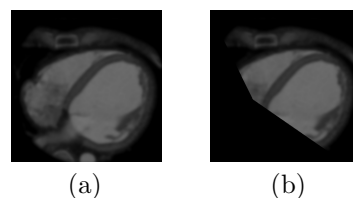


Figura 3: Vista axial para: (a) Imagen filtrada. (b) Región de interés o imagen cortada.

2.3. Segmentación

A fin de obtener la morfología del RV, a las imágenes pre-procesadas les fue aplicado un algoritmo basado en *level set*. Los *level set* fueron introducidos en [9] y deforman estructuras geométricas definidas implícitamente, denominadas interfases, para segmentar objetos de interés. En el espacio 3-D, el *level set* es inicializado usando una isoesfera, ubicada inicialmente en el ecuador de las imágenes filtradas, la cual evoluciona con base en parámetros de suavidad y curvatura permitiendo minimizar una ecuación en derivadas parciales que se resuelve numéricamente [9].

3. Validación

Para validar los resultados se comparan las EF estimadas a partir de las segmentaciones automáticas del RV (AEF), con las EF calculadas por un cardiólogo (MEF). Para efectuar dicha comparación se consideró como métrica el error relativo porcentual (Erp) (ver ecuación 3).

$$Erp = \frac{|MEF - AEF| * 100 \%}{MEF} . \quad (3)$$

4. Resultados

La figura 4, muestra una imagen original y una filtrada con la técnica de realce por similitud. En ella se aprecia como se ha reforzado la información dentro de cada ventrículo cardiaco.

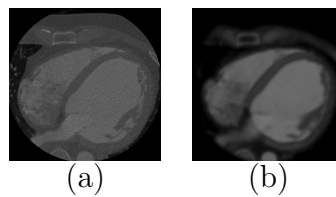


Figura 4: Vista axial para: (a) Imagen original. (b) Imagen filtrada.

La figura 5, muestra segmentaciones 3-D del RV las cuales exhiben un alto grado de suavidad. El costo computacional promedio, empleado para segmentar cada uno de los 6 instantes seleccionados, fue de 3.5 minutos. Tal costo incluye las fases de pre-procesamiento y segmentación por *level set*.

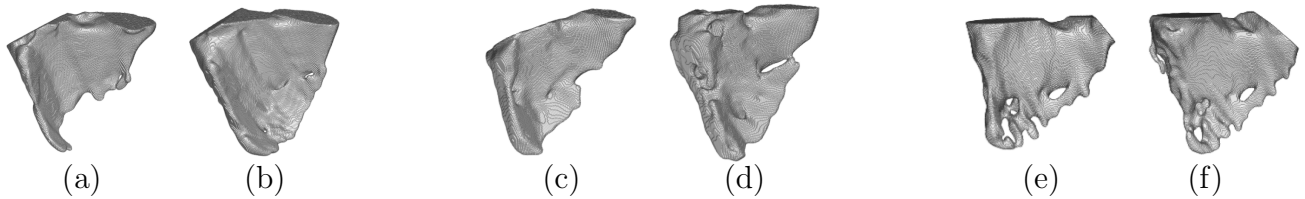


Figura 5: . Segmentaciones 3-D del RV correspondientes a sístole y diástole final, respectivamente, de los 3 pacientes seleccionados. Paciente 1 [Imágenes (a) y (b)]. Paciente 2 [Imágenes (c) y (d)]. Paciente 3 [Imágenes (e) y (f)].

Por otra parte, el cuadro 5 presenta los resultados correspondientes a los descriptores estimados, mediante la técnica propuesta, luego de segmentar el RV. De acuerdo con [10], el rango normal para la EF del RV está comprendido entre 55 % y 67 %. Al analizar el cuadro 1, se puede afirmar entonces que la EF de los pacientes considerados está fuera de los valores normales lo cual indica que se trata de casos patológicos. De acuerdo con el cuadro 5, el Erp promedio es inferior al 10 % lo cual indica una buena concordancia entre los descriptores estimados mediante ambas metodologías.

5. Conclusiones

Se ha presentado una técnica para la estimación de descriptores útiles en la evaluación de la función del RV. Los resultados generaron un error promedio del 9.31 % lo cual permite afirmar que la técnica propuesta estima los descriptores funcionales básicos del RV, con una precisión aceptable. En el futuro, se realizará una validación que considere un número importante de DB.

Cuadro 1: Descriptores y errores relativos porcentuales estimados usando las segmentaciones del RV.

	<i>FSV (ml)</i>	<i>FDV (ml)</i>	<i>SV (ml)</i>	<i>AEF (%)</i>	<i>MEF (%)</i>	<i>Erp (%)</i>
DB_1	95.26	172.81	77.55	44.88	41.64	7.78
DB_2	47.35	73.13	25.78	35.25	39.14	9.94
DB_3	78.78	124.99	46.21	36.97	41.17	10.20
$\mu \pm Desv.estandar$	-	-	-	-	-	9.31 ± 1.33

6. Agradecimiento

Los autores agradecen al Laboratoire de Traitement du Signal et de L'Image de la Université de Rennes 1, en Francia, por suministrar las bases de datos seleccionadas. También, se hace extensivo el agradecimiento al proyecto ECOS-NORDFONACIT PI-20100000299, al Decanato de Investigación de la Universidad Nacional Experimental del Táchira y al CDCHTA de la Universidad de Los Andes, en Venezuela, por el apoyo financiero.

REFERENCIAS

- [1] E. H. Network, European cardiovascular disease statistics, Tech. Rep. Brussels, American Heart Association and European Heart Network (2012).
- [2] MPPS, Anuario de mortalidad, Reporte Técnico 2010 Caracas, Ministerio del Poder Popular para la Salud (Sep. 2010).
- [3] T. Fuchs, M. Kachelriess, W. Kalender, Systems performance multislice spiral computed tomography, *IEEE Engineering in Medicine and Biology* 19 (5) (2000) 63–70.
- [4] A. Frangi, W. Niessen, M. Viergever, Three-dimensional modeling for functional analysis of cardiac images: A review, *IEEE Transactions on Medical Imaging* 20 (1) (2001) 2–25.
- [5] E. Angelini, S. Homma, G. Pearson, J. Holmes, A. Laine, Segmentation of real-time three-dimensional ultrasound for quantification of ventricular function: A clinical study on right and left ventricles, *Ultrasound in medicine and biology* 31 (9) (2005) 1143–1158.
- [6] M. Souto, L. Masip, M. Couto, J. Suarez, A. Martínez, P. Tahoces, J. Carreira, P. Croisille, Quantification of right and left ventricular function in cardiac MR imaging: comparison of semiautomatic and manual segmentation algorithms, *Diagnostics* 3 (2) (2013) 271–282.
- [7] A. Bravo, J. Clemente, M. Vera, J. Avila, R. Medina, An hybrid boundary-region left ventricle segmentation in computed tomography, in: *5th VISAPP*, Angers, France, 2010, pp. 107–114.
- [8] J. Suykens, T. V. Gestel, J. D. Brabanter, *Least Squares Support Vector Machines*, World Scientific Publishing Co., UK, 2002.
- [9] S. Osher, J. Sethian, Fronts propagating with curvature dependent speed: algorithms based on hamilton-jacobi formulations, *Computational Physics* 1 (1988) 17–33.
- [10] C. Lorenz, E. Walker, V. Morgan, S. Klein, T. Graham, Normal human right and left ventricular mass, systolic function, and gender differences by cine magnetic resonance imaging, *Cardiovascular Magnetic Resonance* 1 (1) (1999) 7–21.

GESTURE-GROSS RECOGNITION OF UPPER LIMBS TO PHYSICAL REHABILITATION

Jordan Ojeda

Esmitt Ramírez J.

Francisco Moreno

jordan.ojeda@ciens.ucv.ve , esmitt.ramirez@ciens.ucv.ve , franciscoj.moreno@ciens.ucv.ve

Centro de Computación Gráfica, Escuela de Computación, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Caracas - Venezuela

Omaira Rodríguez

omaira.rodriguez@ciens.ucv.ve , omaira.rodriguez@inabio.edu.ve

Centro de Computación Gráfica / Instituto Nacional de Bioingeniería. Universidad Central de Venezuela

Abstract. *Nowadays, modern computational technologies used in rehabilitation processes have grown considerably in health care centers. These open a broad of new paradigms which improve the rehabilitation process, robotic hardware, virtual reality system and others. Particularly, Virtual Reality systems are notable for having a high interaction with the user based on real-time responsive actions. In rehabilitation, these systems are offered as modern strategies where a patient performs a set of therapy activities recognized as integration tasks through games or simulations. Several health care centers are using these strategies as part of the regular therapy due to the treatment time is less than using the standard ones. If a therapy is focused on upper limbs, a set of specialized gestures are necessary for the total recovery of patients. In this paper we present an effective solution dedicated to capture and recognition of movement of the upper limbs based on gross motor skills. Our proposal integrates corporal gross gestures used as the main user interface in an entire platform for physical rehabilitation of children with motor disabilities in upper limbs. It is designed based on a Microsoft Kinect as a low-cost hardware to capture the motion. Several gestures are achieved to test our proposal given excellent results.*

Key words: physical rehabilitation, gesture recognition, virtual reality, motion capture

1 INTRODUCTION

The body language can be defined as a nonverbal form of communication through any body movement. In Computer Science, gesture recognition is a topic that studies the reading of these movements using algorithms. These gestures recognition algorithms are mainly focus on the

movement of arm, hands, eyes, legs, and others. The main idea is to capture body movements using capture devices and send the acquired data to a computer. Several approaches employed in gesture recognition are used in the Computer Vision research field.

The interpretation of human gestures is a well-known computational problem in Computer Vision field. The GUI (Graphics User Interface) used must be friendly and simple to perform particular movements required by a software application. Based on that, the hardware to capture the gestures has a relation with the GUI as well as the established set of body movement which represent a gesture. For example, a camera can capture the hand movement over a flat surface considering only when fingers draw something over the surface and these movements generate an image in the application.

Nowadays, there are studies dedicated to achieve gesture recognition algorithms for health purpose to improve the quality of certain tasks. A remarkable example is shown in the Physical Rehabilitation field where the low-cost hardware and algorithms accomplish outstanding results in therapy over patients with mobility issues [7]. However, the gesture recognition and the effective calibration between the hardware and the software application is still a challenge to be solved. In this paper, we describe a solution to capture and recognize the movement of upper limbs based on gross motor skills using low-cost hardware with application in the physical rehabilitation therapy. Thus, we define a automaton for gesture recognition of upper limbs based on 3D points captured from the game console hardware Microsoft Kinect[®].

This paper is organized as follows: Section 2 presents a briefly overview in gesture recognition on rehabilitation systems. Next, Section 3 describes our approach proposed in recognition using low-cost hardware, specifically the Microsoft Kinect. In Section 4, we show the obtained experimental results. Finally, Section 5 presents conclusions and future work.

2 GESTURE RECOGNITION ON REHABILITATION SYSTEMS

At the present, many modern health care centers have computational systems based on virtual reality games oriented to the motor training and motor learning through both, fine and gross movement exercises [3]. These centers are focused on accessibility and low-cost hardware in order to reduce costs and spread out the virtual rehabilitation process.

The rehabilitation activities based on gross movements are growing very fast. The gross movement responds the body movements that requires a drastic change of position. Thus, a gross gesture is defined as a movement that demands big amplitude in its execution. Besides, fine gestures are movements with a high precision requirement and a high coordination level.

The gross motor gesture recognition has been employed for many systems as strategy to supply motor exercises. A remarkable example is the system BioTrak [1] which is a platform for training and rehabilitation of many diseases as result of some pathology. This system includes a magnetic tracker which can detect gross gestures from the upper limbs. Another example is shown by the system IREX (Interactive Rehabilitation and Exercise System) [2] which includes a wide range of interactive games focused in gross motor movement for the arms. All these systems are efficient showing good results. Nevertheless, their acquisitions are expensive due to the employed hardware. Therefore, the requirement of low-cost options is necessary. Thus, the hardware provided by the video game consoles emerged as an excellent option because they are designed to obtain the 3D position of game players in real time. Thereby, researches focused on the Microsoft Kinect[®],

Nintendo Wii[®], PlayStation Move[®], and others are outstanding examples.

Particularly, the Microsoft Kinect is a low-cost hardware which captures the gross-movement of a patient as a system player. This tool has been used in various systems for physical rehabilitation under Virtual Reality (VR). In 2004, Sveistrup [3] presents a complete review of several systems based on VR to motor rehabilitation. Recently, Cameirão et al. [4] developed a Kinect-based tool for the rehabilitation of motor deficits of upper extremities (Rehabilitation Gaming System - RGS) after a brain lesion due to stroke. In addition, researches like those made by Hayes et al. [5] and Lange et al. [6], show platforms of video games for rehabilitation using the Kinect as a rehabilitation tool.

In this paper we present effective machinery for gross gestures recognition in upper limbs, oriented to physical rehabilitation, using a Microsoft Kinect. Our development is part of a solution based on virtual rehabilitation designed and developed by our research group [7].

3 KINECT-BASED GESTURE RECOGNITION APPROACH

Our approach is based on a platform which allows managing the connection between the Microsoft Kinect and the software application, even monitoring the hardware activity and its associated errors. With this architecture, it is possible maintains a configuration for a stable gesture recognition given the error originated by the device.

To the input data detection, a class named Skeleton is created to allow the easy access from the application. This class manages a set of joints or connection between bones as shown in Fig. 1a. Then, the verification of a body positions as 3D points in a time k is always possible due to it has a unique identification tracking for a patient. Note that, the application could have several patients detected but only one is consider as the main patient. Accordingly, this main patient can be isolated from the environment captured, allowing a more dependable gesture detection.

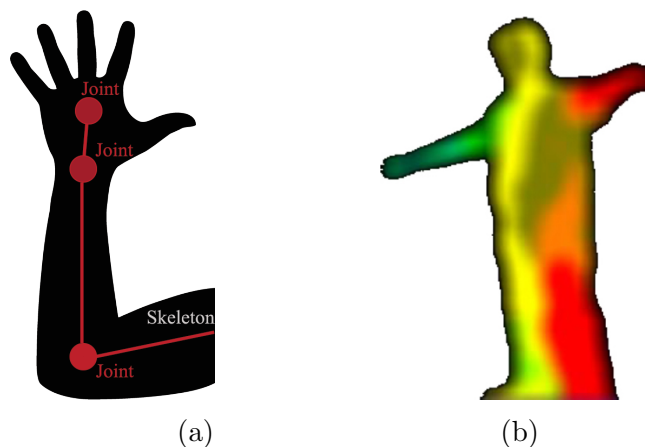


Figure 1: Representation of the Skeleton with (a) his joints and (b) the complete silhouette.

The Kinect captures two different data images on each frame: a color RGB image and a depth image, representing the distance device-patient. These image are pre-processed to make a silhouette or contour of the patient, and to draw the 3D spacial position of a patient.

In order to raise the feedback and giving to the patient a best correspondence between the virtual space and real world as a connection, a silhouette is drawn. Using the depth image, an

algorithm iterates over all pixels uncompressing their values and normalized to range $[0, 1]$. The silhouette represents the body of the patient including a chromatic behavior that depends of the distance between the user and the Kinect. Figure 1b shows an example of such a silhouette.

The gesture-gross recognition machinery of upper limbs is divided in three stages called as Controller, Gesture and Deployment.

3.1 Controller

The Controller stage handles the event generation given by the state changes and manages the data capture from hardware. This stage verified the connectivity of the Kinect with the system and its operational status. Also, it contains all essential procedures for the correct working of Kinect including the images stream detection, error management and Skeleton building.

3.2 Gesture

This stage control the user behavior, detecting all matches over predefined gestures in the system. At this point, the platform handles 2 structures: pose and gestures. A pose can be defined as a set of condition referred to the position of skeleton joints that can be verified in a time k . On the other side, gesture is a set of poses performed with compliance in a specific order. The Fig. 2 shows an example of the "good bye" gesture using the right arm formed by 4 postures.



Figure 2: An example of the "good bye" gesture composed by 4 poses (from left to right).

Generally, the definition of a pose requires some global conditions; these should be common at least for consecutive poses that form a gesture. This guarantees that exist a completed checking in the verification process between a pose and the next of them. A gesture can be in one of three possible states: pause, failure or success. If a pose had being performed, its state changes to success and the platform proceeds to evaluate the next pose according to the definition order. Similarly, if just a first condition (i.e. a base condition) had being achieved, the state changes to pause, allowing the platform verify this condition again.

Figure 3 shows an example using 3 poses to define a gesture. The first pose was achieved successfully. If the second pose is success the gesture machinery will verify the third one, otherwise the gesture changes its status to pause. While the gesture is in pause state, the process will continue checking the current pose for a number of iterations i . If the $i > MAX_ITER$, where MAX_ITER represents a maximum number of iterations, then the gesture changes to failure.

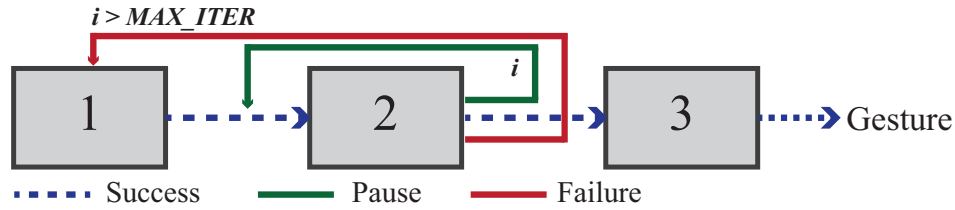


Figure 3: Execution process of three poses of a gesture and their states.

3.3 Deployment

In our approach, the application extracts color image stream (for each frame) and a depth image stream from the hardware. Both are processed to obtain images that can be entries for other algorithms or simply deployed.

To increase the feedback, the silhouette of the patient drawn is based on a depth color scale. The depth image is mapped to a color palette where colors are assigned according the depth value of each pixel. An example of the colored body silhouette can be seen in Fig. 1b. Also, a Gaussian smoothing algorithm is applied to improve the quality of the silhouette.

Despite of that our system is capable to process all body captured by the Kinect, we only focus on the upper limbs where the gestures and poses are defined.

4 EXPERIMENTS AND RESULTS

The system developed is based on C# programming language, using the framework XNA provided by Microsoft to implement the interaction with the Kinect under Windows operating system. To perform our tests, the data is obtained through the evaluation of several position captures of a right hand around one minute by test. The fundamental goal is to verify the error grade between the position of the skeleton joint and the patient real position. This error corresponds to the error detection and interpretation of a gesture owing to their deterministic characteristic definition and verification of it.

The analysis of 4 postures were considered for verification of our approach as a rehabilitation activity. Each of them was accomplished by a patient who holds a specified position for 1 min holding as best as possible the same position since starting. It is important considers the inherent error itself provided by the Kinect in detection and mobility problems of patient on remaining an static position.

It was possible to determine a measure called *precision error* which represents the difference between an static position and the average of several captures made by the Kinect for a patient. For tests, this precision error was performed to the first posture. The evaluated gesture consists in holding the right arm extended in lateral form with a mean height. Considering 30 fps as frame rate of the Kinect, a total of 1.800 points were captured (30 frames \times 60s) with a standard deviation $\sigma_x = 0.1185$ and $\sigma_y = 0.2490$ which are acceptable considering the ends points and the number of these.

Based on the gesture definition, the data detection could have huge influence for their occurrence because errors with major deviations could generate state changing, and as a consequence the restarting of the verification process.

We test the limits of the skeleton defined in section 3.2, storing the minimum and maximum reached possible position for a patient. This limits making a boundary of action which is adjusted for each patient with different mobility issues (limitations). This characteristic adds dynamism to the approach proposed.

5 CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In this paper, we present a simple and effective machinery for the gesture-gross recognition of upper limbs for physical rehabilitation using the Microsoft Kinect as an acquisition device. An automaton state to control and manage a posture based on different poses was developed. Also, the data interpretation acquired from the device was performed. In order to study our solution precision, a quantitative evaluation over the gestures is performed showing a high precision in the data captured and interpreted. Thus, it is possible to verify the functionality during the corporal movement of a patient placed in front of the Kinect.

Our tests are achieved over different gestures with a high degree of assertion. However, in some gestures where data detection is imprecise, due to very fast movements or obstructions during capture, they are considered as limitations of our approach but are isolated cases. For future work, adding new parameters will offer greater adaptability and flexibility in the platform to embrace a wider range of motion detection applications. Other applications can be benefited with our gesture recognition system due to the extensibility and dynamism. Also, it would be possible to add more precision and versatility with technologies as XB1 or Leap Motion device.

REFERENCES

- [1] BIENETEC, *BioTrak*. Retrieved from <http://www.biotraksuite.com>, 2013.
- [2] GESTURETEK INC., *IREX*. Retrieved from <http://bit.ly/i0KA16>, 2013.
- [3] SVEISTRUP, H., Motor rehabilitation using virtual reality. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, pp. 1-10, 2004.
- [4] CAMEIRÃO, M., BERMÚDEZ, S., DUARTE, E., & VERSCHURE, P., Virtual reality based rehabilitation speeds up functional recovery of the upper extremities after stroke: A randomized controlled pilot study in the acute phase of stroke using the Rehabilitation Gaming System. *Restorative Neurology and Neuroscience*, vol. 29, pp. 287-298, 2011.
- [5] HAYES, A., DUKES, P., & HODGES, L., *A Virtual Environment for Post-Stroke Motor Rehabilitation*. Clemson University. Retrieved from <http://bit.ly/GQ72lt>, 2011.
- [6] LANGE, B., SKIP, R., & CHANG, C-Y., Markerless Full Body Tracking: Depth-Sensing Technology within Virtual Environments. In Proceedings of the *Interservice/Industry Training, Simulation and Education Conference (I/ITSEC)*, number 11363, 2011.
- [7] MORENO, F., OJEDA, J., RAMÍREZ, E., MENA, C., RODRÍGUEZ, O., RANGEL, J., & ÁLVAREZ, S., Un Framework para la Rehabilitación Física en Miembros Superiores con Realidad Virtual. In Proceedings of the *1st Venezuelan National Conference in Computing, Informatics, and Systems (CoNCISa)*, pp. 77-84, 2013.

Detección de Zonas de Activación en Datos fMRI Mediante Umbralización del Mapa Estadístico Basada en el Modelo Gaussiano Generalizado

Blanca Guillén

blanca@unet.edu.ve

Grupo de Bioingeniería, Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal, Venezuela

José Luis Paredes

Rubén Medina

paredesj@ula.ve

rmedina@ula.ve

Grupo de Ingeniería Biomédica, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela

Abstract. *En este trabajo se propone un método para la detección de voxels activados en datos fMRI el cual explota la condición de poca densidad de la señal BOLD tanto en el dominio temporal como en el dominio espacial. En el dominio temporal el método propuesto combina el modelo lineal general (GLM) con el método de desviación absoluta mínima (LAD) regularizado por la pseudo norma l_0 . En el dominio espacial la detección de activaciones se lleva a cabo mediante un proceso de umbralización del mapa estadístico, en el cual el valor del umbral es determinado bajo la suposición de un modelo Gaussiano Generalizado sobre el vector de parámetros espaciales. El método propuesto fue evaluado sobre una base de datos sintéticos en la cual el conjunto de activaciones verdadero es conocido a priori. Los resultados obtenidos demuestran que el método es capaz de detectar el conjunto de voxels activados con bastante precisión en los conjuntos de datos con niveles de ruido moderado, mientras que en los casos donde el nivel de ruido es alto sigue siendo bastante competitivo.*

Key words: fMRI, LAD regularizado por l_0 , modelo Gaussiano Generalizado.

1 INTRODUCCIÓN

La imaginología por resonancia magnética funcional (fMRI) basada en el cambio del contraste dependiente del nivel de oxígeno en la sangre o contraste BOLD es una técnica no invasiva para estudiar la actividad cerebral [1]. En la última década ha habido un interés creciente en el análisis de datos fMRI enmarcado en el contexto de la teoría de representación de señales poco densas mediante la incorporación de información conocida *a priori* como es la poca densidad de la señal

BOLD [2]. Precisamente dentro de este marco en [2] se propone un método para detectar voxels activados ante un estímulo particular explotando la condición de poca densidad de la señal BOLD tanto en el dominio temporal como en el dominio espacial. Bajo este enfoque, la señal fMRI observada en cada voxel es considerada una combinación lineal de unos pocos elementos de un diccionario apropiado. Posteriormente, a partir del conjunto de parámetros estimados y con el fin de evaluar el efecto de un estímulo particular, es generado un mapa estadístico en el cual la intensidad de cada voxel es igual al valor del parámetro asociado al estímulo de interés para dicho voxel. La detección de voxels activados se lleva a cabo sometiendo dicho mapa a un proceso de detección por umbral, donde el valor del umbral se determina explotando el conocimiento previo sobre la poca densidad espacial del conjunto de activaciones, en el sentido que sólo un número muy reducido del conjunto total de voxels que conforman un volumen cerebral es activado por un estímulo particular. En este trabajo la determinación del umbral espacial se lleva a cabo suponiendo que la distribución del vector de parámetros espaciales se ajusta a un modelo Gaussiano Generalizado (GG); la razón para optar por este modelo se explica más adelante. Finalmente, el método propuesto es aplicado a una base de datos sintéticos y los resultados obtenidos son analizados con base en el número de falsos positivos y falsos negativos detectados.

2 BASES TEÓRICAS

2.1 Detección de Activaciones en el Dominio Temporal

Dada la serie de tiempo fMRI observada en el j -ésimo voxel, \mathbf{y}_j , se supone que:

$$\mathbf{y}_j \approx \sum_{l=1}^L \beta_{l_j} \mathbf{x}_l = \mathbf{X} \boldsymbol{\beta}_j \quad (1)$$

donde el vector de parámetros $\boldsymbol{\beta}_j = [\beta_{1_j} \ \beta_{2_j} \ \dots \ \beta_{L_j}]^T$ es poco denso en el sentido que la mayoría de sus componentes tiene valores nulos (o muy pequeños); y los vectores columna $\mathbf{x}_l \in \mathbb{R}^M$ del diccionario \mathbf{X} son series de tiempo que modelan tanto los estímulos presentes en el experimento como los efectos que generan confusión. Si bien hay disponible una cantidad importante de métodos que permiten determinar la solución del problema (1), en este trabajo se optó por el método ℓ_0 -LAD, descrito con detalle en [2]. La solución del problema (1) mediante el estimador ℓ_0 -LAD es:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_j = \arg \min_{\boldsymbol{\beta}_j} \|\mathbf{y}_j - \mathbf{X} \boldsymbol{\beta}_j\|_1 + \tau \|\boldsymbol{\beta}_j\|_0 \quad (2)$$

donde $\|\boldsymbol{\beta}_j\|_0$ denota la pseudo norma ℓ_0 que cuenta el número de entradas no nulas de $\boldsymbol{\beta}_j$, $\|\cdot\|_1$ denota la norma ℓ_1 , y τ es el parámetro de regularización que equilibra el conflicto de minimizar el término de ajuste del error induciendo a la vez una solución $\boldsymbol{\beta}_j$ poco densa [3]. La selección del método ℓ_0 -LAD se realizó en atención a los siguientes factores: i) no requiere conocimiento previo sobre el número de entradas no nulas de $\boldsymbol{\beta}_j$, lo cual equivaldría a conocer el número de estímulos que activan un voxel; ii) las técnicas utilizadas por otros métodos para determinar el parámetro de regularización τ suelen ser complejas (por ejemplo, validación cruzada) mientras que el método ℓ_0 -LAD utiliza un enfoque de continuación, el cual ajusta de manera progresiva dicho parámetro; iii) la pseudo norma ℓ_0 induce un nivel de densidad menor (es decir, un número menor de entradas no nulas) que la norma ℓ_1 , utilizada por la gran mayoría de los métodos disponibles; y iv) la

robustez de la norma ℓ_1 ante la presencia de ruido de colas más pesadas que las Gaussianas, como es el caso del ruido *Rician* propio de las imágenes de resonancia magnética [1].

2.2 Detección de Activaciones en el Dominio Espacial

En el dominio espacial la detección de voxeles activados se lleva a cabo sometiendo el mapa estadístico a un proceso de detección por umbral, donde el mapa estadístico es un volumen cerebral en el cual el valor de cada voxel es igual al valor del parámetro asociado al estímulo de interés para dicho voxel. Es decir, fijado un estímulo particular (por ejemplo, \mathbf{x}_l), las intensidades del mapa estadístico están dadas por el vector de parámetros espaciales:

$$z_j = \hat{\beta}_{lj}, \quad j = 1, \dots, N \quad (3)$$

De este modo, el j -ésimo voxel del mapa estadístico está relacionado unívocamente con el valor estimado $\hat{\beta}_{lj}$ obtenido mediante el método ℓ_0 -LAD.

Regularmente, los parámetros del GLM: $\mathbf{y}_j = \mathbf{X}_j\boldsymbol{\beta}_j + \mathbf{e}$, donde \mathbf{e} denota el vector de errores, son estimados mediante mínimos cuadrados, lo cual conduce al modelo Gaussiano como el modelo estadístico teórico asociado al conjunto de parámetros espaciales, facilitando, en consecuencia, la determinación del umbral [4]. En contraste, la estimación de parámetros de (1) mediante (2) sólo garantiza previas Laplacianas sobre el vector de parámetros estimados a nivel temporal, pero se desconoce el comportamiento estadístico a nivel espacial. No obstante, el conocimiento *a priori* sobre la poca densidad de las activaciones en el dominio espacial, aunado a pruebas experimentales en las cuales se ha evidenciado que las colas de la distribución estimada del conjunto de parámetros espaciales asociados a diferentes estímulos de la base de datos PBAIC 2007 son más pesadas que las de una distribución Gaussiana, pero en general, no tan pesadas como las de una distribución Laplaciana, sugieren la factibilidad de adoptar un modelo estadístico más general, como el modelo Gaussiano Generalizado, cuya función de densidad viene dada por [5]:

$$\mathcal{GG}(x; \mu, \sigma, \rho) = \frac{p}{2\sigma\Gamma(1/\rho)} e^{-\left(\frac{|x-\mu|}{\sigma}\right)^\rho} \quad (4)$$

donde $\Gamma(\cdot)$ denota a la función Gamma, μ al parámetro de localización, σ al parámetro de escala y $\rho > 0$ es el parámetro de forma de la función de distribución. El parámetro ρ controla la tasa de decaimiento de la función; mientras más pequeño sea más puntiaguda es la función, por lo cual el valor de ρ define la pesadez de las colas de la distribución. Esta familia de funciones de distribución incluye a la Gaussiana cuando $\rho = 2$ y a la función de distribución Laplaciana cuando $\rho = 1$ [5].

3 METODOLOGÍA

3.1 Bases de Datos fMRI Reales y Sintéticos

La base de datos fMRI reales utilizada en esta investigación fue proporcionada por *Pittsburgh Brain Activity Interpretation Competition 2007* (PBAIC 2007), ver <http://pbc.lrdc.pitt.edu/>. Las imágenes cerebrales fueron adquiridas con un escáner Siemens durante un experimento fMRI mientras tres sujetos estaban inmersos en un juego de realidad virtual. El conjunto de datos fMRI de cada sujeto consta de tres corridas cada una de las cuales contiene 704 volúmenes cerebrales.

Además, la base de datos incluye, para cada sujeto y las corridas 1 y 2, 24 series de tiempo adicionales, denominadas vectores de características, que describen las experiencias (estímulos) vividas por los sujetos.

La base de datos fMRI sintéticos utilizada en este trabajo, y descrita en [2], fue generada superponiendo un estímulo sintético a series de tiempo de voxels no activados. Esto es, la serie de tiempo sintética \mathbf{y}_{sint} , de un voxel cualquiera, está dada por: $y_{sint}[m] = b s[m] + y_{na}[m]$, $m = 1, \dots, M$, donde $b > 0$ es la magnitud de la activación, \mathbf{s} es la serie de tiempo del estímulo, y \mathbf{y}_{na} es una serie de tiempo extraída de un voxel no activado de la base de datos PBAIC 2007. El parámetro b es un indicador del nivel de activación del voxel, de modo que un valor de $b = 0$ indica que el voxel no ha sido activado. La base de datos consta de 4 grupos: g1, g2, g3 y g4, cada uno de los cuales a su vez consta de 20 conjuntos. Los grupos difieren en el nivel de activación, cuya magnitud es $b = 1$, para g1; $b = 2$, para g2; $b = 3$ para g3; y $b = 4$, para g4. Del mismo modo, en vez de intentar modelar la geometría de la corteza cerebral se diseñó un volumen sintético, el cual está conformado por 4 rebanadas, cada una de las cuales consta de 20×20 voxels y está dotada de una “zona de activación” de forma diferente, como se ilustra en la Fig. 2.

3.2 Diccionario y Selección de Parámetros

Dado que la señal fMRI está conformada, en general, por la señal BOLD (que constituye la componente de interés), los *confounds* que surgen debido a procesos físicos y fisiológicos (respiración, ritmo cardíaco, entre otros) propios del sujeto en estudio, y ruido aleatorio, tiene sentido incorporar al diccionario señales o átomos que modelen tanto la señal de interés como los *confounds*. Desde esta perspectiva, dado un conjunto de datos fMRI, se propone un diccionario compuesto por la función de respuesta hemodinámica esperada de cada uno de los estímulos involucrados en el experimento, así como un conjunto de funciones que permitan modelar los *confounds*. En esta investigación, como predictores de los estímulos se utilizaron, además del estímulo \mathbf{s} , los vectores de características: *Arousal*, *Dog*, *Faces*, *FruitsVegetables*, *Hits*, *Instructions*, *Interior-Exterior*, *SearchFruit*, *SearchPeople*, *SearchWeapons*, *Valence*, *Velocity*, y *WeaponsTools* de la base de datos PBAIC 2007. Por otro lado, los *confounds* fueron modelados mediante un conjunto de 13 bases DCT, donde el número de bases está dado por la expresión: $2 \cdot M \cdot TR$, con $M = 500$ el número de volúmenes adquiridos, y $TR = 1.75$ s el tiempo de repetición.

Todos los conjuntos de datos descritos anteriormente fueron analizados con el método propuesto con el fin de identificar los voxels activados por el estímulo \mathbf{s} y, posteriormente, a partir de los resultados del análisis y el conocimiento del conjunto de activaciones verdadero se evaluó el desempeño del método. Para cada conjunto de datos, los parámetros del método ℓ_0 -LAD fueron seleccionados como en [2]. A partir del conjunto de estimaciones, se generó el mapa estadístico, en el cual la intensidad de cada voxel se corresponde con el valor $z_j = \hat{\beta}_{1j}$. Posteriormente, bajo la suposición de previas Gaussianas Generalizadas sobre las entradas del vector \mathbf{z} , y fijada una probabilidad de falsa alarma del 5%, se estimó el parámetro de umbral θ utilizando las funciones **paramp** y **qnormp** del paquete de software **normalp** [6], las cuales estiman, respectivamente, los parámetros μ , σ y ρ , y el cuantil (umbral) de la distribución Gaussiana Generalizada para el vector de muestras \mathbf{z} dado. Finalmente, el mapa estadístico fue sometido al proceso de umbralización, mediante el cual cada voxel fue clasificado como activado si $z_j > \theta$, y como no activado en caso contrario, generando de este modo el mapa de activaciones.

4 Resultados

En la figura 1 se muestra el número de falsos positivos (izq.) y falsos negativos (centro), para todos los conjuntos y todos los grupos analizados, así como el promedio de falsos positivos y negativos (der.) por grupo. Como puede apreciarse, el grupo 1 es el que exhibe el peor comportamiento, ocasionado por el bajo nivel de activación asignado a este grupo. Es claro que para los grupos 2, 3 y 4 el desempeño del método mejora considerablemente, con la consecuente reducción en el número de falsos positivos y negativos. Dicho comportamiento está relacionado directamente con la relación señal a ruido (dependiente del nivel de activación) de cada uno de estos grupos, a saber: -16.9604dB para g_1 , -10.9398dB para g_2 , -7.42dB para g_3 , y -4.9207dB para g_4 . Más aún, en el caso de los grupos 3 y 4 el desempeño del método es excelente, llegando a identificar el conjunto real de voxeles activados en casi todos los conjuntos.

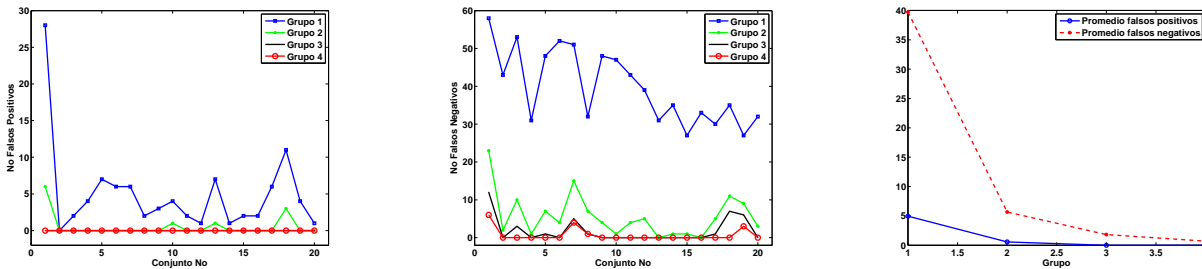


Figura 1: Falsos positivos (izq.) y falsos negativos (centro) por grupo para cada uno de los conjuntos. Der. Promedio de falsos positivos y falsos negativos por grupo.

En la figura 2 se muestran solapados los mapas de activaciones verdadero y estimado para el estímulo s , obtenidos al analizar los conjuntos 1, 13 y 20 de todos los grupos con el método propuesto. Los voxeles en blanco corresponden a las activaciones verdaderas, mientras que los grises corresponden a las activaciones detectadas por el método propuesto. La selección de estos conjuntos particulares se realizó evaluando el nivel de respuesta al análisis, de cada conjunto, respecto del número de falsos positivos y negativos. Es decir, el conjunto 1 reporta el mayor número de falsos positivos y negativos en todos los grupos; el 13 es uno de los que reporta el menor número tanto de falsos positivos como negativos; mientras que para el conjunto 20 de cada grupo el número de falsos positivos y negativos se ubica dentro del promedio. A partir de estos mapas es claro que el método detecta adecuadamente el conjunto de voxeles activados por el estímulo s cuando $b \geq 2$ (o el SNR es superior a -10.9398dB), manteniendo el número de falsos positivos y negativos dentro del margen de error permitido, salvo para el conjunto 1, cuyo nivel de ruido enmascara a la señal de interés.

5 Conclusiones

En este trabajo se presentó una versión modificada del método para la detección de activaciones en datos fMRI propuesto en [2]. Dicha modificación corresponde a la determinación del umbral de activación espacial, el cual en esta versión se obtiene adoptando un modelo Gaussiano Generalizado para el vector de parámetros espaciales \mathbf{z} . Con el fin de validar los resultados, el método modificado fue aplicado al conjunto de datos sintéticos descritos en la sección 3.1. Los resultados obtenidos

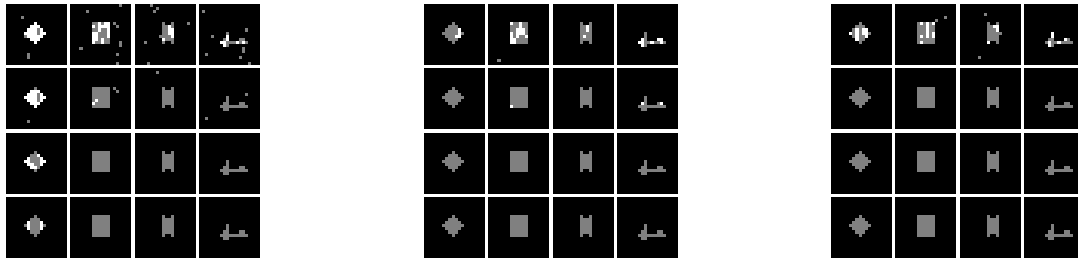


Figura 2: Mapa de activaciones para el estímulo s , cada fila corresponde a un grupo, numerados de 1 a 4 de arriba hacia abajo. (izq.) Conjunto 1, (centro) Conjunto 20, (der.) Conjunto 13.

demuestran que la determinación del umbral de activaciones mediante la suposición de previas gaussianas generalizadas sobre el conjunto de parámetros espaciales es un enfoque efectivo para la detección de activaciones a nivel espacial. De hecho, puede observarse que, en general, el método es capaz de detectar el conjunto de activaciones verdadero en el caso de los grupos 3 y 4, mientras que para los grupos 1 y 2 sigue siendo bastante competitivo. Finalmente, cabe destacar que el parámetro de forma arrojado por el software **normalp** para la casi totalidad de los conjuntos analizados fue cercano a 1, lo cual confirma la factibilidad del modelo Laplaciano sobre \mathbf{z} propuesto en [2].

Agradecimientos

Los autores agradecen al Vicerrectorado Académico de la Universidad Nacional Experimental del Táchira y al proyecto ECOS-NORD-FONACIT PI-20100000299 por el apoyo financiero.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Lindquist. The Statistical Analysis of fMRI Data. *Statistical Science*, 23(4):439–464, 2008.
- [2] B. Guillén, J. L. Paredes, and R. Medina. Detección de Zonas de Activación en fMRI Mediante Modelos Temporal-Espacial que Promueven Representación Poco Densa de la Señal BOLD. In *Memorias XI Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, pages 7816–7819, 2012.
- [3] E. G. Larsson and Y. Selén. Linear regression with a sparse parameter vector. *IEEE Trans. on Signal Proc.*, 55(2):451–460, 2007.
- [4] K. J. Friston, A. P. Holmes, K. J. Worsley, J-P. Poline, C. D. Frith, and R. S. J. Frackowiak. Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*, 2:189–210, 1995.
- [5] Y. Bazi, L. Bruzzone, and F. Melgani. Image thresholding based on the EM algorithm and the generalized Gaussian distribution. *Pattern Recognition*, 40(2):619–634, 2007.
- [6] Angelo Mineo and Mariantonietta Ruggieri. A software tool for the exponential power distribution: The normalp package. *Journal of Statistical Software*, 12(4):1–24, 2005.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A LOW-COST REHABILITATION DATA GLOVE

Jordan Ojeda
Esmitt Ramírez J.
Christiam Mena

jordan.ojeda@ciens.ucv.ve , esmitt.ramirez@ciens.ucv.ve , christiam.mena@ciens.ucv.ve

Centro de Computación Gráfica, Escuela de Computación, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Caracas - Venezuela

Omaira Rodríguez

omaira.rodriguez@ciens.ucv.ve , omaira.rodriguez@inabio.edu.ve

Centro de Computación Gráfica / Instituto Nacional de Bioingeniería. Universidad Central de Venezuela

Abstract. *A stroke may cause disabilities such as dysfunctions of motor skills. Particularly, many patients present chronic deficits in upper limbs, specifically in hands. The main treatment for this kind of affection is the physical rehabilitation therapy which consists in a set of physical activities to recover the complete mobility of affected limbs. Nowadays, one of the treatments based on modern technologies is the usage of rehabilitation data gloves. It consists in a device connected to computer sending information of all finger movements and their spatial position. There are many devices which have been used in rehabilitation systems focused on retraining and learning fine motor skills. In Latin America, few companies are dedicated to producing and distributing rehabilitation data gloves, which make these devices expensive and difficult to acquire. In this paper we propose the design and development of a low-cost rehabilitation data glove that achieves all functionalities for therapeutic usage. The hardware of our proposal is based on low-cost materials and software is based on gesture recognition. The rehabilitation data glove allows the detection of flexion/extension degrees for each finger, determining finger positions of a patient in a given time. Our solution incorporates an API to provide the detection of gestures. Results show a precise and real-time capture of the movement.*

Key words: low-cost device, rehabilitation glove, gesture recognition, computer vision

1 INTRODUCTION

Computer-based technologies are widely used in today's medical applications. Particularly, medical rehabilitation has pioneered the use of virtual reality for treatments. As a result, it is of

great interest to study the impact of these techniques on patients in worldwide health care centers. The main goal is to study the positive influence of these techniques over the rehabilitation process. Thereby, haptic devices have been created to support exercises on fine and gross motor skills on patients. A remarkable example of those devices is known as data glove.

A data glove is a glove which captures fingers and hand spatial positions. It is used to recognize and measure finger movement (i.e. *dexterity*). With this, a process of gesture recognition is applied to allow the establishment of therapeutic strategies focused in the fine motor skills. There are several data gloves in the market offering several characteristics and features. Generally, these are expensive and dependent of a particular library. In this paper we presented the design and development of a hardware/software architecture for a low-cost data glove for rehabilitation.

Our proposal is an improvement in design and software development of our previous work [8]. The data glove built has a more comfortable and ergonomic design given more flexibility in the movement of wrist and hand. Also, the detection algorithm was upgraded to offer a more precise capture of data to determine the movements of fingers.

The organization of this paper is as follows: Section 2 briefly presents the definition of data gloves and its usage on rehabilitation processes. The Section 3 describes in detail our approach for the design and development of a low-cost rehabilitation data glove. In Section 4, tests and results are presented. Finally, conclusions and future work are presented in Section 5.

2 DATA GLOVES IN REHABILITATION SYSTEMS

The incorporation of new virtual reality technologies for tracking of medical affections has increased significantly in several worldwide medical centers [1]. On physical rehabilitation, methods based on fine (coordination of movements without any drastic position change) and gross motor skills (oppositely, big position changes), have combined traditional techniques and virtual reality approaches. A basic example of fine motor skills is picking up objects between the thumb and finger, or taking a pencil to write carefully.

Many approaches in virtual reality employed specialized hardware and software as input/output. In order to capture the movements of fine motor skills, data gloves hardware are commonly used. Data gloves are employed as haptic and acquisition devices of dynamic data to create constant feedback. With this, a data glove constitutes a highly recommended alternative on the patient rehabilitation therapy. This factor has allowed the growth in the industry of data glove production, which offer different features. Commercial data gloves use motion-sensing fibers and motion analyzers, being expensive for the consumer market. Several brands and models are available in market such as DataGlove, Power Glove, VPL Glove, MIT LED, Sayre Glove, 5DT Data Glove, and others. Similarly, research as performed by Han [2], Tongrod et al. [3], Adnan et al. [4] and Temoche et al. [8] are few examples of home-made and low-cost data glove.

Low-cost data gloves as acquisition devices have a number of advantages in the physical rehabilitation of patients. Franchi et. al. [5] developed a system based on rehabilitation for post stroke patients and people suffering from orthopedic hand diseases. In that solution, a glove with four web cameras for its detection and recognition was employed. Similarly, Huber et al. [6] presented a PlayStation 3-based hand physical rehabilitation system for children with hemiplegia due to perinatal brain injury or later childhood stroke.

In this paper we propose the design and development of a low-cost data glove focused on

rehabilitation as an upgrading of the work developed in [8]. Also, the data glove is part of a multidisciplinary research in physical rehabilitation, see [7] for more information.

3 LOW-COST REHABILITATION DATA GLOVE

Our data glove construction hardware use low-cost materials to minimize the final cost of assembly. For best user comfort, the web camera used for image detection is placed along the arm/hand axis orientation to obtain a compacted space without impact over of functionality. Also, a colored background was added below marks to increase the quality of detection. Besides, the glove hold more gripping points to ensure better docking of the cords with respect to the postures. Figure 1 shows a representation of the data glove developed, where a webcam is used focusing directly over a mirror at an angle of 45° in order to capture the five marks (each for finger) placed along the wrist.

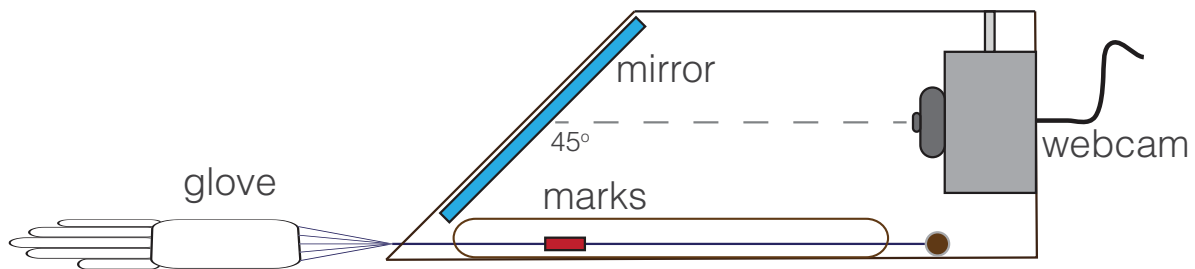


Figure 1: Representation of the low-cost rehabilitation glove performed.

The image processing algorithm (software) was implemented using the C# programming language. To capture images from webcam the Aforge library (<http://www.aforgenet.com>) was used to lessen complexity on pattern detections.

3.1 Scheme

Once the image is captured by the webcam, the next step is to determine the position of fingers marks on each cord. First, the acquired image is resized (from large to low resolution) and color filtered, in order to find the pattern which determines the mark positions. This color filtering is made applying a nonlinear operation known as gamma correction, with $\gamma = 0.5$. Next, the algorithm defines a RGB color range to filter the tonality of marks (red color). Then, it computes the filter as the color range between $[100, 255]$ to red channel, and the range $[0, 95]$ to green and blue channel. On the image it is possible to distinguish the presence of regions that satisfy the filter condition. Thereby, a size region constraint also is applied (based on the rectangle shape of marks). Finally, the algorithm returns a vector of rectangles with marker positions. Figure 2 shows the stage sequence of the algorithm.

3.2 Detection algorithm

The movements of marks represent certain spatial 3D position of fingers. When a consecutive set of movements is achieved in a certain order, these are considered as the posture. For example, when the index and middle fingers are raised and parted, while the other fingers are clenched,

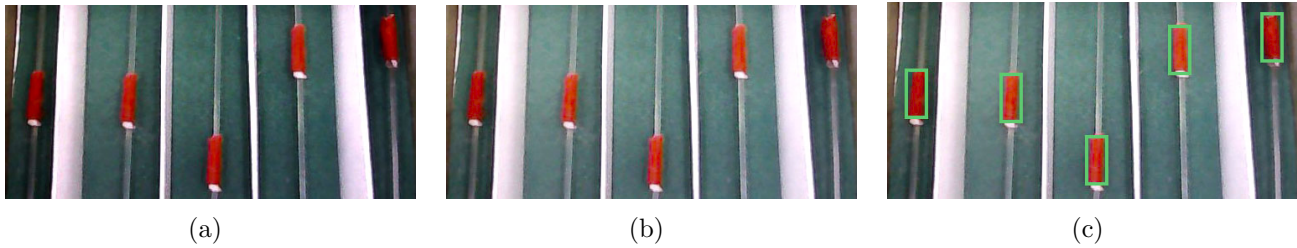


Figure 2: Steps in the image processing where (a) the image is resized, after (b) the image is corrected using gamma and finally, (c) the color marks are recognized.

the *V sign* is formed as a posture of hand gesture to complete the detection process. This detection passed through two phases: gesture container and automaton process, both managed by a controller. The controller handles all operations to recognition of input images from webcam until the detection of postures and gestures. It makes a correspondence between each finger and each obtained mark. Therefore, the controller allows the extraction of a relative position of each detected finger to determine its grade of flexion/extension.

3.3 Gesture container

The gesture container is responsible for the control of postures and gestures. Formally, a posture is defined as the set of values associated to flexion/extension of each finger. These values are in a normalized range to ease the generation of recognition rules taking into account the boundaries.

In this way, a gesture is a sequence of postures whose orderly occurrence might be detected and reported to the main application. For instance, flexing the index finger, after the middle and finally the fourth finger, holding the remainders fingers extended, can be defined as a gesture in a period of time t . Therefore, an array of postures is initialized depending of the expected gesture. Next, this sequence is added to the automaton process to constantly evaluate its occurrence.

3.4 Automaton process

Basically, the automaton process is the responsible to detect the gestures and postures within it. The process to interpret a posture begins with capture of data obtained by the controller. Naturally, the raw data acquired has noise that would be cleaned. The clean process is performed taking an average of four images in a row. Then to check the occurrence of a posture, a set of temporary images are used to establish ranges of flexion/extension on each finger.

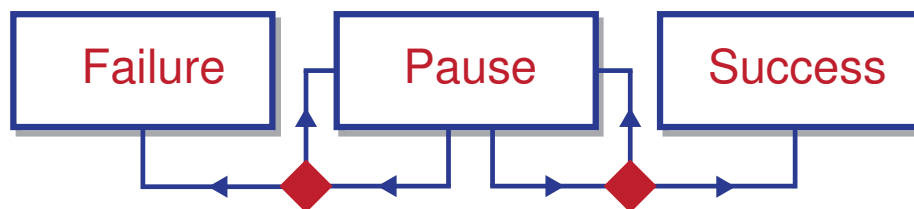


Figure 3: States in the gesture recognition accomplish by the automaton process.

The gesture interpretation considers three execution states: failure, pause and success, as shown

in Fig. 3. Gesture recognition starts with the detection of the first posture. This is done through the analysis and comparison from the current position to the first position to define the gesture.

Given the verification of a posture, the gesture enters in a state of pause. In this state, it is awaiting for the next occurrence of next posture. If in a period of time p there is no occurrence of expected posture, then the gesture goes to failure state and its detection in next iterations begin with the initial gesture. When all postures which compose a gesture are detected, it passes to success state. This event is the final step in the automaton process, and the main application is notified to take precise actions.

4 EXPERIMENTS AND RESULTS

The software developed in our proposal is always measuring the flexion/extension of finger on each instant of time t captured. The goal is to determine the precision and the response in real-time of values obtained because it will be used over interactive applications. To do that, the software generates a graph which represents these values over the time.

The Fig. 4(a) shows the set of values captured C in a sequence of time, exactly for 25 takes of webcam (x-axis). The detection algorithm report the status of each finger (from little finger to thumb) where the 0 value represents the maximum extension (minimum flexion) and the 1 value represents the opposite in y-axis. Each capture $C(t + 1)$ is obtained 0.5s after the capture $C(t)$.

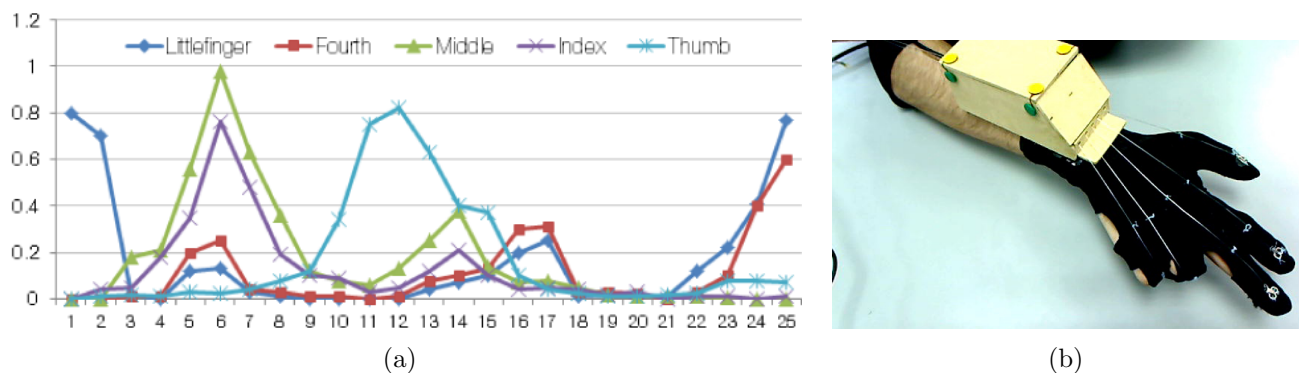


Figure 4: An example of positions captured with (a) its associated graph and (b) its hand posture.

The application shows the graph in a dynamic way. The graph is updated while as time progresses. Figure 4(b) represents a position during the takes between (21,25), see Fig. 4(a), where the fourth and little finger are clenched and other totally extended.

The new hardware design offers a more comfortable location being lighter and smaller than its predecessor. Excluding the camera, the original weight was 62g and our approach 37g. If the hardware is enclosing in a rectangular volume shape, its dimension is 11cm × 5cm × 5.7cm (volume = 313.5) against 13cm × 10cm × 5.5cm (volume = 715) of previous version. This design allows free movement, only constrained by the USB cable of the camera, around the wrist and forearm.

5 CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

We presented the design and development of a low-cost rehabilitation data glove used for interactive applications in rehabilitation therapy. Our approach offers a solution in hardware and

software to manage and control the flexion/extension of each finger. This solution was developed to be used in activities of fine motor skills with application to physical rehabilitation.

Our tests are based on measuring the precision of pattern position recognition over the data glove. Performed postures and reported values are in good agreement. The algorithm offers high precision gesture recognition for rehabilitation where the data glove is a primary tool.

In the future, we plan to extend the functionality of the data glove including time parameters to the gesture definition. Also, to define a gesture taking into account particular requirements for its recognition, e.g. define a parameter of *velocity per posture* during the gestures execution.

Similarly, we proposed to increase the hardware quality including resistant springs which incorporate better feedback during the rehabilitation session, as current cord material tends to loose elasticity with use.

REFERENCES

- [1] BIENETEC, *BioTrak*. Retrieved from <http://www.biotraksuite.com>, 2013.
- [2] HAN, Y., A low-cost visual motion data glove as an input device to interpret human hand gestures. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, issue 2, pp. 501-509, 2010.
- [3] TONGROD, N., KERDCHAROEN, T., WATTHANAWISUTH, N. & TUANTRANONT, A., A low-cost data-glove for Human computer interaction based on ink-jet printed sensors and ZigBee networks. In Proceedings on the *International Symposium on Wearable Computers (ISWC)*, pp. 1-2, 2010.
- [4] ADNAN, N., WAN, K., SHAHRIMAN, A.B., ZAABA, S.K., BASAH, S.N., RAZLAN, Z.M., HAZRY, D., NASIR, M., RUDZUAN, M.N., & AZIZ, A.A., Measurement of the Flexible Bending Force of the Index and Middle Fingers for Virtual Interaction. *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 388-394, 2012.
- [5] FRANCHI, D., MAURIZI, A., & PLACIDI, G., A numerical hand model for a virtual glove rehabilitation system. In Proceedings of the *IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications MeMeA*, pp. 41-44 2009.
- [6] HUBER, M., RABIN, B., DOCAN, C., BURDEA, G., NWOSU, M.E., ABDELBAKY, M., & GOLOMB, M.R., PlayStation 3-based tele-rehabilitation for children with hemiplegia. In Proceedings of the *Virtual Rehabilitation Conference*, pp. 105-112, 2008.
- [7] MORENO, F., OJEDA, J., RAMÍREZ, E., MENA, C., RODRÍGUEZ, O., RANGEL, J., & ÁLVAREZ, S., Un Framework para la Rehabilitación Física en Miembros Superiores con Realidad Virtual. In Proceedings of the *1st Venezuelan National Conference in Computing, Informatics, and Systems (CoNCISa)*, pp. 77-84, 2013.
- [8] TEMOCHE, P., RAMÍREZ, E., & RODRÍGUEZ, O., A Low-Cost Data Glove for Virtual Reality. In Proceedings of the *XI International Congress of Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences (CIMENICS)*, pp. TCG 31-36, 2012.

EVOLUTION RULES OF DETERMINISTIC CELLULAR AUTOMATA FOR MULTICHANNEL SEGMENTATION OF BRAIN TUMORS IN MRI

Antonio Rueda Toicen

antonio.rueda@ciens.ucv.ve

Centro de Computación Gráfica, Escuela de Computación, Universidad Central de Venezuela, Ciudad Universitaria, Av. Los Ilustres, Los Chaguaramos. Caracas, Venezuela
Centro de Visualización Médica, Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela, Sebuacán. Caracas, Venezuela.

Rhadamés Carmona

rhadames.carmona@ciens.ucv.ve

Centro de Computación Gráfica, Escuela de Computación, Universidad Central de Venezuela, Ciudad Universitaria, Av. Los Ilustres, Los Chaguaramos. Caracas, Venezuela.

Miguel Martín Landrove

mglmrtn@yahoo.com

Centro de Visualización Médica, Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela, Sebuacán. Caracas, Venezuela.

Centro de Física Molecular y Médica, Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Ciudad Universitaria, Av. Los Ilustres, Los Chaguaramos. Caracas, Venezuela

Centro de Diagnóstico Docente Las Mercedes, Las Mercedes. Caracas, Venezuela

Wuillian Torres

wtorres@fii.gob.ve

Fundación Instituto de Ingeniería para la Investigación y Desarrollo Tecnológico, Centro de Procesamiento Digital de Imágenes, Altos de Sartenejas. Miranda, Venezuela.

Abstract: *Image segmentation is the partitioning of an image in groups of pixels or voxels that share common characteristics. High sensitivity and high precision segmentations of cerebral tumors in magnetic resonance images are necessary for the safe planning of radiosurgical treatment. GrowCut is an image segmentation method based in a cellular automaton that simulates the competitive growth of various bacteria colonies in a multidimensional cell space, with a direct correspondence to the voxels of a volume. We present a group of automata evolution rules for image segmentation that are derived from GrowCut, and a quantitative comparison of the segmentations of brain tumors in multichannel magnetic resonance images achieved through these rules in GPU implementations.*

Keywords: Cellular Automata, Computer Vision, Segmentation, GPU, Image Processing

1. INTRODUCTION

A deterministic cellular automaton is a dynamic model represented by an array of cells that evolve through a succession of states t . In the automata considered, each one of these cells is in a particular state S , characterized by a strength level θ , a label L , and a digital level descriptor \vec{I} [1]. The automaton evolves in the space of an N dimensional image. In the case of co-registered multimodal volumes of magnetic resonance images, the vector \vec{I} is constituted by various image channels at each voxel. At each evolution step, a function is applied simultaneously in all the cells of the automaton. This function evaluates each cell to determine its next state, considering the current states of its neighboring cells. Neighborhood systems considered are the 3D Von Neumann and 3D Moore neighborhoods [2]. The evolution of the automaton can be described as the competitive colonization of the cell space in the image, where each cell is attacked by its neighbors, with strength of attack equal to the product of the neighbor's current strength and a term that's inversely proportional to the digital level distance between the current cell and its attacking neighbor. The manner in which strength of attack is calculated makes regions with high homogeneity in their digital level descriptors highly likely to be colonized by the same label. The automaton starts its evolution through the definition of a set of cells with label and strength, called seeds, which can be determined in a supervised, or unsupervised manner, as described in other works by the authors [2], [3]. After a set of seed cells have been defined, the automaton starts its evolution as defined in Fig. 1a. We present a modification to this algorithm (see Fig. 1b) that reduces computation time, and modifications to attack strength penalization rules [4], with a quantitative comparison of segmentation quality achieved.

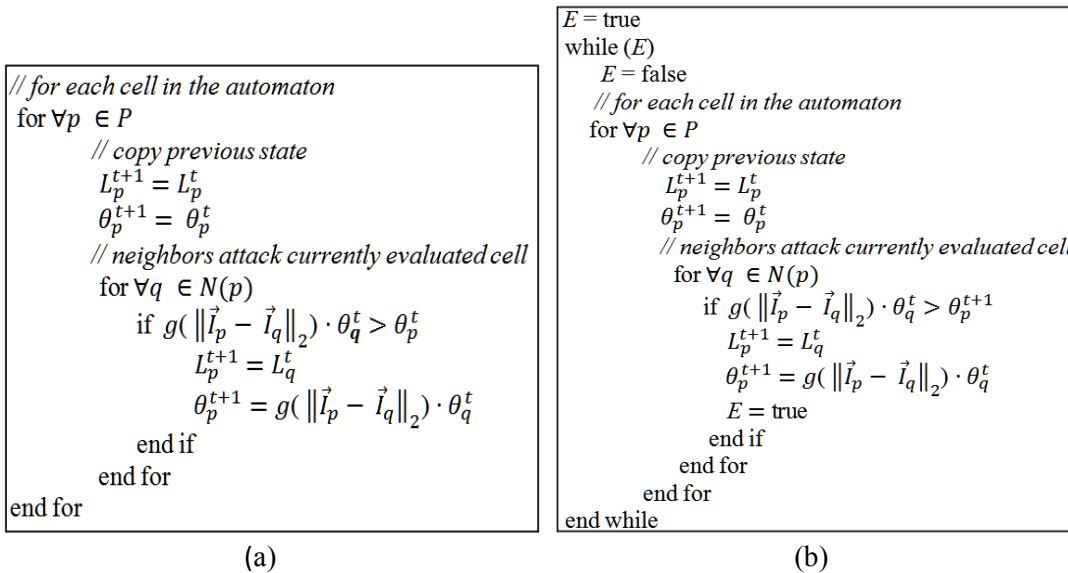


Figure 1 – Automaton's Evolution Rule. a) "GrowCut", as defined by Vezhnevets et al. [1]. The criterion to determine which conquering neighbor cell q assigns label to the currently evaluated cell p in $t + 1$ is $g(\|\vec{I}_p - \vec{I}_q\|_2) \cdot \theta_q^t > \theta_p^t$, which makes the *last* conquering cell evaluated be the one that assigns label and strength to the cell p . b) "Corrected GrowCut". The evaluation criterion to determine conquering cell is replaced by $g(\|\vec{I}_p - \vec{I}_q\|_2) \cdot \theta_q^t > \theta_p^{t+1}$, which makes the *strongest* conquering cell evaluated be the one that assigns label and strength to the cell p . A convergence criterion is expressed as the state where no cell in the automaton updates its strength and label.

2. PENALIZATION TO STRENGTH OF ATTACK

The automaton's evolution rule can be modified to consider the mean and standard deviation in the digital levels of the seed cells. Kim et al. [4] proposed an exponential penalization to the strength of an attack performed by a cell whose digital level is more than a standard deviation away from the mean of the digital level of its seed cells, this corresponds to the case where $n=1$, in Eq. 1. The purpose of this penalization is to make elements considered atypical for their label class less likely to propagate their assigned label. However, the Central Limit Theorem guarantees that at least 31.8% of the cells whose digital levels follow a normal distribution have digital levels that are more than a standard deviation away from their label's mean, making this exponential penalization excessive when cells with high heterogeneity in their digital levels share a label [2]. We propose the alternative criteria to penalize strength of attack, shown in Eq. (1)-(3), $n \in \mathbb{R}$ and represents the number of standard deviations on which to start penalizing strength of attack Eq. (1) shows an exponential penalty, Eq. (2) shows a linear penalty, and Eq. (3) shows a constant penalty, with $c_1, c_2 \in [0, 1]$, $c_1 > c_2$.

$$g^*(x, \mu L_q, \sigma L_q) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{x}{\max \|\vec{l}\|_2} \right) & \text{if } \|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2 < n * \sigma L_q \\ \left(1 - \left(\frac{x}{\max \|\vec{l}\|_2} \right) \right) \left(e^{(-n * (\|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2) - \sigma L_q)} \right) & \text{if } \|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2 \geq n * \sigma L_q \end{cases} \quad (1)$$

$$g^*(x, \mu L_q, \sigma L_q) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{x}{\max \|\vec{l}\|_2} \right) & \text{if } \|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2 < n * \sigma L_q \\ \left(1 - \left(\frac{x}{\max \|\vec{l}\|_2} \right) \right) \left(\frac{n * \sigma L_q}{\|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2} \right) & \text{if } \|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2 \geq n * \sigma L_q \end{cases} \quad (2)$$

$$g^*(x, \mu L_q, \sigma L_q) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{x}{\max \|\vec{l}\|_2} \right) & \text{if } \|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2 < n * \sigma L_q \\ 1 - \left(\frac{x}{\max \|\vec{l}\|_2} \right) * c_1 & \text{if } (\|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2 \geq n * \sigma L_q) \wedge (\|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2 < (n + 1) * \sigma L_q) \\ 1 - \left(\frac{x}{\max \|\vec{l}\|_2} \right) * c_2 & \text{if } \|\vec{l}_q - \mu L_q\|_2 \geq (n + 1) * \sigma L_q \end{cases} \quad (3)$$

3. TESTS AND RESULTS

We tested 10 high grade clinical gliomata, and 10 high grade simulated gliomata produced via TumorSim [5], [6]. The human-labeled clinical datasets were curated by adding a fourth class, representing healthy brain tissue, to their ground truth files. This fourth class, represented as light gray in Fig. 2b and Fig. 2c, is added to produce representative means and standard deviations of the classes used to label non-pathological tissue and empty voxels. This fourth class allows the automata to appropriately penalize atypical attacks occurring in these image regions.

The segmentation seeds used are chosen from the ground truth with a uniform probability distribution. Seed indices, for each dataset, are the same in every automaton variation considered and represent 5% of the true cells corresponding to each label. We consider four labels: tumor,

edema, healthy brain tissue, and empty voxels. Tests were performed using the 3D Von Neumann neighborhood. Parameters for constant penalization to strength of attack were $c_1 = 0.99$, $c_2 = 0.95$. The automata evolution rules that consider penalties use the conquering cell evaluation criterion shown in Figure 1b.

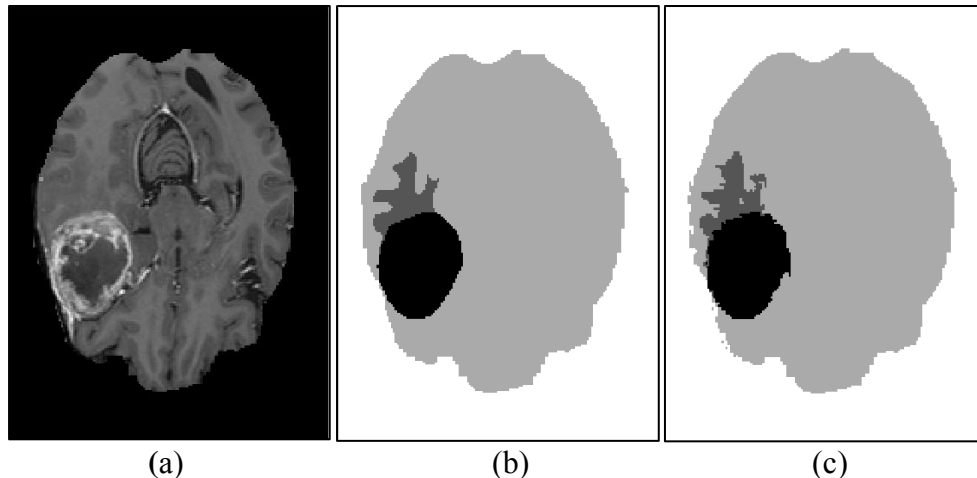


Figure 2 - BRATS High Grade Glioma 0001, slice 79. a) T1 channel, with gadolinium contrast agent. b) Ground truth, according to human expert, curated by adding a healthy brain tissue class. This hand-labelled dataset has smooth contours, a common segmentation bias in human raters that is unrepresentative of the real frontiers of tumors, which are characteristically rough. c) Segmentation obtained using automaton evolution rule with constant penalty and $n = 3$.

Programs were implemented using Matlab 2013a, with Parallel Computing and Image Processing toolboxes. Tests were performed in a computer with an Intel i7 processor, 8 GB of RAM, and an Nvidia GTX 650 GPU. The CUDA implementations of the evolution rules represent each cell in the automaton as a separate thread, and use a 2-kernel schema to resolve race conditions [2]. The complete Matlab code and CUDA kernels used for these tests, alongside curated datasets and descriptive results, can be obtained through the main author's ResearchGate profile [7].

Table 1. Results with simulation data: upper rows show mean Dice Similarity Coefficient for tumor and edema, HG0001 to HG0010, lower rows show mean evolution steps and execution time in seconds.

	Vezhnevets Growcut	Corrected Growcut	Exp. Penalty $n=1$ (Kim)	Exp. Penalty $n=2$	Exp. Penalty $n=3$	Linear Penalty $n=1$	Linear Penalty $n=2$	Linear Penalty $n=3$	Const. Penalty $n=1$	Const. Penalty $n=2$	Const. Penalty $n=3$
Tumor	.9497	.9497	.9081	.9482	.9500	.9307	.9488	.9503	.9508	.9505	.9503
Edema	.8318	.8318	.7735	.8388	.8334	.8052	.8412	.8328	.8422	.8358	.8321
Steps	23.5	14.3	50.9	16.6	15.4	24.8	14.9	14.8	13.7	13.5	13.7
Time	1.27	0.77	4.47	1.43	1.34	2.08	1.26	1.25	1.18	1.16	1.18

Table 2. Results with clinical data: upper rows show mean Dice Similarity Coefficient for tumor and edema, HG0001 to HG0010, lower rows show mean evolution steps and execution time in seconds.

	Vezhnevets Growcut	Corrected Growcut	Exp. Penalty $n=1$ (Kim)	Exp. Penalty $n=2$	Exp. Penalty $n=3$	Linear Penalty $n=1$	Linear Penalty $n=2$	Linear Penalty $n=3$	Const. Penalty $n=1$	Const. Penalty $n=2$	Const. Penalty $n=3$
Tumor	.9257	.9257	.8578	.9211	.9237	.8266	.9210	.9236	.9260	.9266	.9259
Edema	.8861	.8861	.7867	.8735	.8778	.7552	.8729	.8777	.8781	.8855	.8848
Steps	25.2	14.4	45.6	24.6	20.9	56.9	22.6	20.1	14.6	14.9	15.9
Time	0.79	0.44	2.25	1.25	1.08	2.78	1.11	1.02	0.71	0.72	0.78

Segmentation quality results in Tables 1-2 are expressed in the Dice Similarity Coefficient, which is equivalent to the F1-measure [2], and represents the harmonic mean of precision and sensitivity scores.

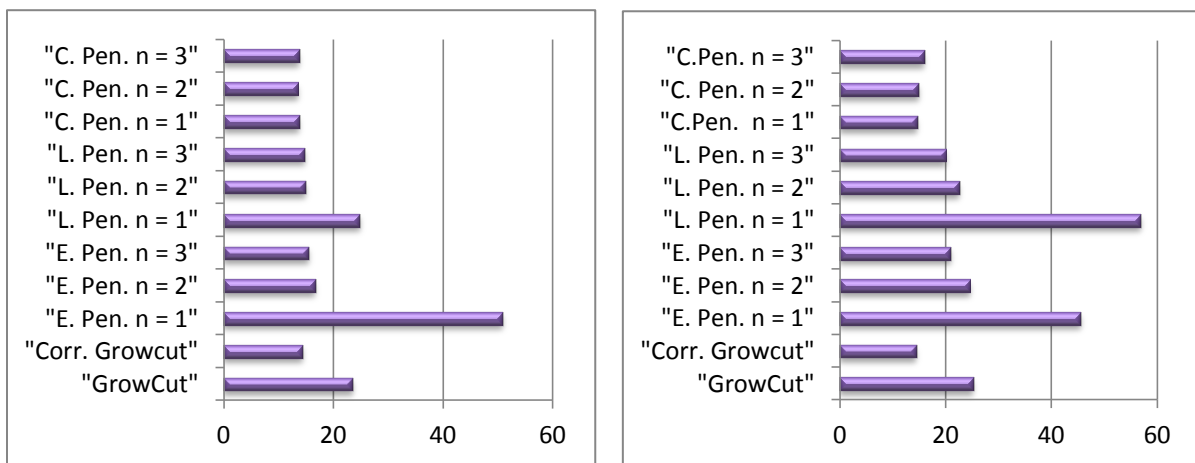


Figure 3 – Mean evolution steps to segment gliomata from BRATS 2012 - HG0001 to HG0010. (a) Simulated data. (b) Clinical data.

The proposed modification to the conquering cell evaluation criterion in the GrowCut evolution rule, shown in Figure 1b, reduces the steps required for the automaton to achieve convergence about 40%, as shown in Tables 1-2 and Fig. 3, for both the simulated and clinical data. Tables 1 and 2 show that the proposed evolution rules with penalization improve the Dice Similarity Coefficient metric result about 5% to 10% compared to the rule by Kim et al. [4], and reduce evolution steps up to 75%, when $n > 1$. In the simulated and clinical datasets, the evolution rule with constant penalty to strength of attack shows a slightly superior Dice metric for tumor with $n \geq 1$. In the simulated datasets, the edema class was best segmented using the evolution rule with constant penalty and $n=1$, however this doesn't appear reflected in the results for clinical data, probably due to the human rater bias discussed in Figure 2.

4. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

Deterministic cellular automata derived from GrowCut exhibit high segmentation quality of tumoral tissue and cerebral edema in the multichannel MRI high grade gliomata considered.

Response time is in the order of seconds in current generation consumer level GPUs, and, in the tests performed, is improved about 40% with the proposed modification to the conquering cell criterion. The proposed automata evolution rules with penalization to strength of attack produce segmentations that are qualitatively and quantitatively different from the ones obtained through unpenalized evolution. The proposed penalized automata evolution rules show a notable improvement in segmentation quality (about 5 to 10%) and reduce necessary evolution steps (up to 75%) to the previous method [4]. Of particular interest is an optimal combination of segmentations obtained through various automata evolution rules using a methodology that estimates rater bias and variance, like STAPLE [8].

REFERENCES

- [1]. Vezhnevets, V. & Konouchine, V., Growcut - Interactive Multi-Label N-D Image Segmentation by Cellular Automata. *Proceedings of Graphicon*, 2005.
- [2]. Rueda Toicen, A., *Segmentación Multicanal de Tumores Cerebrales en Imagenología de Resonancia Magnética con Autómatas Celulares Paralelizados en GPU*, Trabajo Especial de Grado, Biblioteca Alonso Gamero, Universidad Central de Venezuela, 2013.
- [3]. Torres, W. & Rueda Toicen, A., Unsupervised Segmentation of Multispectral Images with Cellular Automata, *Proceedings of CIMENICS XII*, 2014.
- [4]. Kim, E., Shen, T., & Huang, X., A Parallel Cellular Automata with Label Priors for Interactive Brain Tumor Segmentation. *IEEE 23rd International Symposium on Computer-Based Medical Systems Conference Publications*, pp. 232–237, 2010.
- [5]. Brain tumor image data used in this work were obtained from the *MICCAI 2012 Challenge on Multimodal Brain Tumor Segmentation* (<http://www.imm.dtu.dk/projects/BRATS2012>) organized by Menze, B., Jakab, A., Bauer, S., Reyes, M., Prastawa, M., & Van Leemput, K. The challenge database contains fully anonymized images from the following institutions: ETH Zurich, University of Bern, University of Debrecen, and University of Utah.
- [6]. Prastawa, M., Bullitt, E., & Gerig, G., Simulation of Brain Tumors in MR Images for Evaluation of Segmentation Efficacy. *Medical Image Analysis (MedIA)*, vol. 13, n. 2, pp. 297–311, 2009.
- [7]. Rueda Toicen, A., ResearchGate code repository.
https://www.researchgate.net/profile/Antonio_Rueda2
- [8]. Warfield, S., Zou, K., & Wells W. Simultaneous Truth and Performance Level Estimation (STAPLE): An Algorithm for the Validation of Image Segmentation. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 23, n. 7, pp. 903–921, July 2004.

UNSUPERVISED SEGMENTATION OF MULTISPECTRAL IMAGES WITH CELLULAR AUTOMATA

Wuillian Torres

wtorres@fii.gob.ve

Centro de Procesamiento Digital de Imágenes, Instituto de Ingeniería

Urb. Monte Elena II, Sartenejas, Baruta, Caracas-Venezuela.

Laboratorio de Computación Gráfica y Geometría Aplicada, Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Caracas. Venezuela.

Antonio Rueda Toicen

antonio.rueda.toicen@gmail.com

Centro de Computación Gráfica, Escuela de Computación, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Caracas. Venezuela

Abstract. *Multispectral images acquired by satellites are used to study phenomena on the Earth's surface. Unsupervised classification techniques analyze multispectral image content without considering prior knowledge of the observed terrain; this is done using techniques which group pixels that have similar statistics of digital level distribution in the various image channels. In this paper, we propose a methodology for unsupervised classification based on a deterministic cellular automaton. The automaton is initialized in an unsupervised manner by setting seed cells, selected according to two criteria: to be representative of the spatial distribution of the dominant elements in the image, and to take into account the diversity of spectral signatures in the image. The automaton's evolution is based on an attack rule that is applied simultaneously to all its cells. Among the noteworthy advantages of deterministic cellular automata for multispectral processing of satellite imagery is the consideration of topological information in the image via seed positioning, and the ability to modify the scale of the study. The segmentation algorithm was tested on images acquired by the Venezuelan Miranda satellite.*

Keywords: Cellular automata, Unsupervised segmentation, Object-oriented classification, Multispectral image

1. INTRODUCTION

Unsupervised classification of multispectral satellite images facilitates the analysis of the Earth's surface without prior knowledge of the observed terrain; this is done using techniques that group pixels with similar digital level distribution among the different channels of the image. For this task, the most commonly used algorithms are Isodata and K-means [1]. These algorithms perform pixel-based processing and their computation time is dependent on the number of pixels considered, which negatively impacts their response time in images with high spatial resolution. In these images, it is commonly preferred to use object-oriented classification techniques. Spatial segmentation is the first step of object oriented classification, this is done grouping pixels with similar spectral signature; the produced segments characterize homogenous elements in the image, which are then manually pieced together to form an object that's relevant to a particular geographical study. Recent versions of the ENVI image processing software [2] have functionality which allows an interactive performance of this procedure through the manual selection of spectral thresholds. This manual process is time-consuming and prone to operator errors, producing oversegmentation of the multispectral image, or the undesired elimination of segments whose scale is relevant to the scale of the study. We present a methodology of unsupervised segmentation, based in deterministic cellular automata that includes the automatic configuring of its initial state and the elimination of segments with an area inferior to the one that is relevant to the study's scale. We applied the proposed algorithm to the image shown in Figure 1, which depicts fields in Turén, Portuguesa state, Venezuela; the image was acquired by the Miranda satellite, by the MSS2 sensor, on 04/03/2013.



Figure 1 – Multispectral image of Turén, Portuguesa state, Venezuela, acquired by the Miranda satellite. Shown in true color at left and near-infrared color at right.

2. DETERMINISTIC CELLULAR AUTOMATA FOR IMAGE SEGMENTATION

A deterministic cellular automaton is a dynamic model composed by an array of cells that evolves through a succession of states t . In the automata considered, each one of these cells is in a

particular state characterized by a strength level θ and a label L [3]. At each evolution step, a function is applied simultaneously in all of the automaton's cells. This function evaluates each cell to determine its next state, taking into consideration the current states of its neighboring cells. The state S_p , of the currently evaluated cell p , evolves under the influence of each of its neighbors q , each one characterized by a state S_q , as shown in the Algorithm 1. The automaton's evolution can be described as the competitive colonization of the cell space in the image, where each cell is attacked by its neighbors with a strength that is the product of the neighbor's current strength and a term that's inversely proportional to the distance in digital levels between the current cell and its attacking neighbor. The way that attack strength is calculated, makes regions of high homogeneity in digital level likely to be colonized by the same label. We use a modification of the GrowCut evolution rule; it has an attack strength evaluation difference with respect to the original rule that brings a significant reduction in computation time, and a qualitative effect on the obtained segmentation. These differences, and other applicable automata evolution rules, are mentioned in detail in other works by the authors [4], [5].

```

E = true
while (E)
    E = false
    // for each cell in the automaton
    for  $\forall p \in P$ 
        // copy previous state
         $L_p^{t+1} = L_p^t$ 
         $\theta_p^{t+1} = \theta_p^t$ 
        // neighbors attack currently evaluated cell
        for  $\forall q \in N(p)$ 
            if  $g(\|I_p - I_q\|_2) \cdot \theta_q^t > \theta_p^{t+1}$ 
                 $L_p^{t+1} = L_q^t$ 
                 $\theta_p^{t+1} = g(\|I_p - I_q\|_2) \cdot \theta_q^t$ 
            end if
        end for
    end for
end while

```

Algorithm 1 – Automaton's Evolution Rule Used in Example

3. UNSUPERVISED DEFINITION OF THE AUTOMATON'S INITIAL STATE.

The automaton is initialized with seed cells, which have a label L different from *null* and strength $\vartheta > 0$. Apart from the seed cells, the rest of the automaton's cells have label L equal to *null* and strength $\vartheta = 0$. To achieve a high segmentation quality, seed cells must be selected following 2 criteria:

- 1) Seed cells must be representative of the spatial distribution of salient elements in the image.
- 2) Seed cells must be representative of the diversity of spectral signatures present in the image.

The proposed method for the selection of seed cells does a sampling in the domain of N

channels of multispectral images. The N-dimensional space was subdivided into regions according to the distribution of the predominant digital levels in the image. The selection procedure is the following:

1) Pixels are categorized based in the histogram of the multichannel sum of their digital levels, as shown in Figure 2a. This discriminates image regions according to their brightness. The cells with less bright regions, like water bodies, have a relatively low sum, while the brightest, like bare soil, have a relatively high sum. Figure 2b illustrates this discrimination in a bi-dimensional (2 band) case, the blue and red lines represent the spectral levels where the bands B_1 and B_2 sum the values P_1 and P_2 , respectively.

2) The pixels that share a sum value are now discriminated according to the digital level that dominates each band of the image. In the bi-dimensional case shown in Figure 2b, the region R2 corresponds to pixels with similar digital levels in the 2 bands considered. The region R1 groups pixels where the band 1 has the higher digital level, the region R3 groups pixels where the band 2 has the higher digital level.

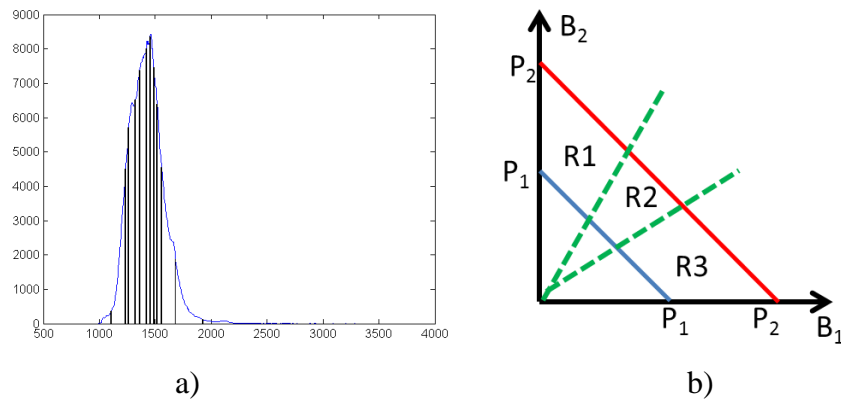


Figure 2 – Seed selection a) Histogram of the sum of bands. The horizontal axis shows the value of the sum of the digital levels in the bands. The vertical axis shows the amount of cells that share the corresponding sum. Black lines indicate the ranges of sum values selected as representative of the digital level distribution. b) Regions of seeds (R_1 , R_2 , R_3), obtained when considering two bands (B_1 , B_2).

To illustrate the seed selection process in multispectral images, three of the bands of the image presented in Figure 1 were used. As shown in Figure 2a, multi-band digital levels are added and ranges are chosen in a way that is representative of the diverse digital level distribution of the predominant elements in the image, in this example, the ranges correspond to local maxima in the histogram.

At the second phase of the seed selection procedure, we consider the pixels whose sums of bands correspond to the selected ranges. Considering digital levels in three bands, four regions can be identified: the region where the three bands have similar digital levels and another three where one of the bands has a predominant digital level. Figure 4a shows the distribution of seeds in the spectral domain; parallel planes correspond to the sums of components, the pixels on each of these planes are grouped with respect to the predominant band. The localization of seeds in the spatial domain is shown in Figure 4b as dots. Each of these seeds receives a label according to the region where its spectral signature is located; in the example in the Figure 4b, the seeds are distributed in 18 spectral regions, corresponding to 18 labels.

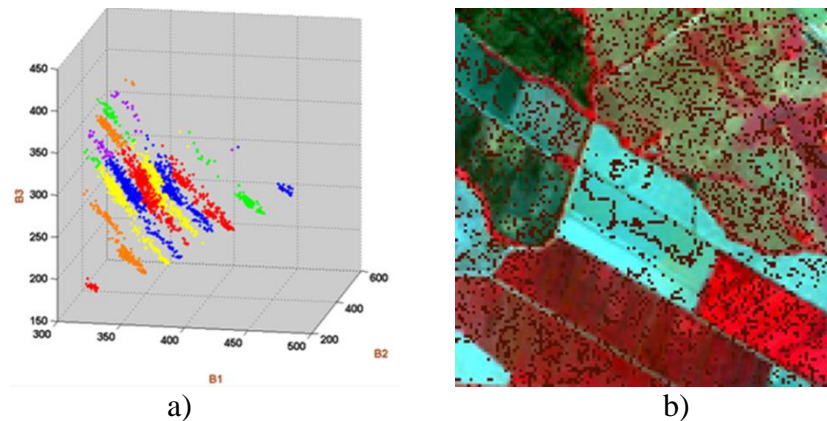


Figure 4- a) Distribution of the seeds in the spectral domain of the image. b) Localization of the seeds in the spatial domain of the image.

Figure 5a shows the seeds obtained from the processing of the multispectral image of Turén shown in Figure 1. In this example, 101175 seeds, corresponding to 10.1% of the pixels in the image, were assigned 46 distinct labels. The image is segmented when the automaton converges after 91 evolution steps. Figure 5b shows the final label distribution; the segmented image has 27171 segments, a significant amount of these segments has individual area that's below a desired scale of study of 150 pixels. To eliminate over-segmentation, the automaton's evolution is reinitiated using the following procedure:

- 1) The segments with area inferior to the desired scale of the study are identified; in this example we select those that have less than 150 pixels.
- 2) The state of the cells in these segments is modified reassigning the cell's existing labels to *null* and their strengths to 0.
- 3) The automaton's evolution is reinitiated from this state.

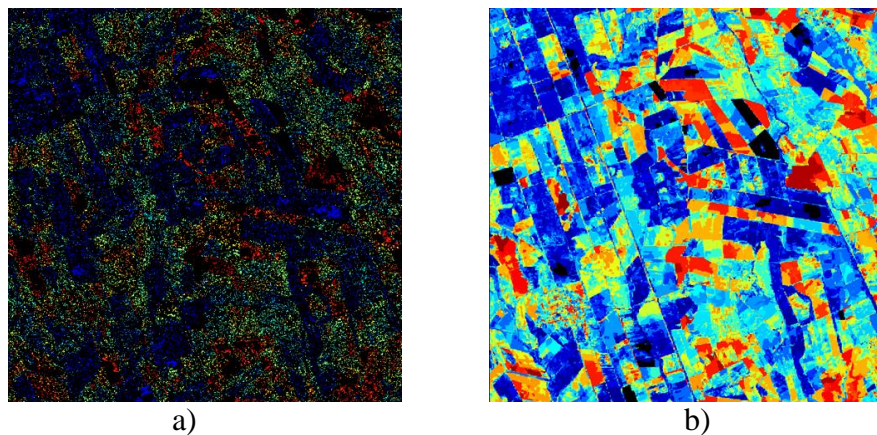


Figure 5- a) Initial automaton's configuration ($t = 0$) showing seed positioning b) Segmentation at $t = 91$.

4. ASSIGNMENT OF SPECTRAL SIGNATURE

With the purpose of using the segmentation result obtained as input for an object-oriented classification process, each segment receives a single spectral signature to its contained cells. Each cell has an N-dimensional vector that is composed by the digital levels of every band

considered. The spectral signature of a segment is obtained by finding the centroid of the N -dimensional vectors formed by the digital levels in the group of pixels in the segment. The centroid is the vector positioned at the least distance to all the other vectors in the segment. Figure 6a shows the vector a as the representative centroid of the pixels a, b, c, d, e .

Figure 6b shows the segmented image obtained, this time with 1593 segments. To ease its interpretation, a color palette was used where each segment contains the average color of the false color in near infrared shown in the Figure 1.

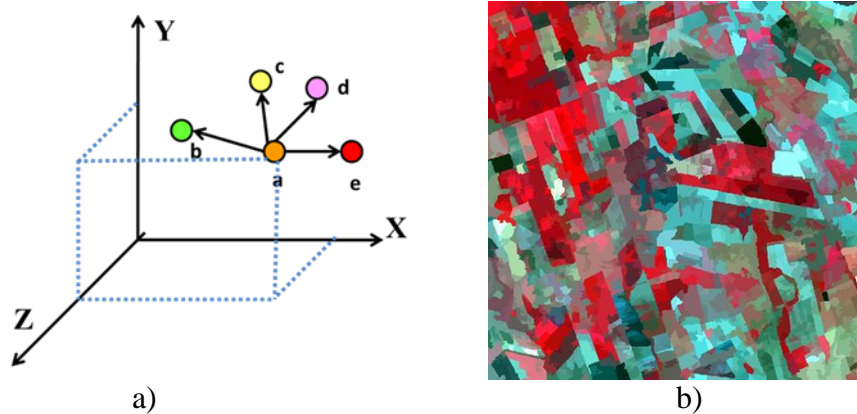


Figure 6- a) Centroid, the spectral signature a becomes the representative signature for its segment. b) Segmented image using centroids as colors, the segments with area inferior to 150 cells have been eliminated through competitive evolution.

5. CONCLUSIONS

Unsupervised segmentation through deterministic cellular automata, using seeds determined via an analysis of multispectral information, is presented as a powerful tool to segment images of high spatial resolution. Commercially available systems that provide object-oriented classification functionality require manual participation of the user to determine thresholds that reduce the over-segmentation of the image and reduce the loss of segments that are important for the particular study. Our proposed methodology allows the automatic creation of segments that are appropriate for the scale of the study, reducing necessary user interaction

REFERENCES

- [1].B. Tso and P. Marher, Classification Methods for Remotely Sensed Data, CRC Press, pp. 61-78, 2009.
- [2].ENVI, Feature Extraction Module, Official Documentation, Exelis, 2012.
- [3].V. Vezhnevets and V. Konouchine, Growcut - Interactive Multi-Label N-D Image Segmentation by Cellular Automata, in Proceedings of Graphicon, 2005.
- [4].A. Rueda Toicen, R. Carmona, M. Martín Landrove, W. Torres, Evolution Rules of Deterministic Cellular Automata for Segmentation of Brain Tumors in MRI, *Proceedings of CIMENICS 2014*, 2014.
- [5].A. Rueda Toicen, Segmentación Multicanal de Tumores Cerebrales en Imagenología de Resonancia Magnética con Autómatas Celulares Paralelizados en GPU, trabajo especial de grado, Biblioteca Alonso Gamero, Universidad Central de Venezuela, 2013

ESTIMACIÓN DEL MOVIMIENTO CARDIACO MEDIANTE FLUJO ÓPTICO USANDO LA NORMA L1 EN UN MODELO POCO DENSO

Ibarra Emiro

Medina Ruben

emiroji@gmail.com

rmedina@ula.ve

Centro de Ingeniería Biomédica y Telemedicina (CIByTEL), Universidad de Los Andes
Av. Don Tulio Mérida - Venezuela.

Resumen. *El análisis de la función cardiaca a partir del procesamiento de imágenes médicas es un tópico de gran interés clínico, que consiste en identificar desordenes o anomalías en el movimiento de las paredes del ventrículo izquierdo para diagnosticar si un paciente presenta daño isquémico en una determinada región del miocardio. De acuerdo a experimentos previos, se ha demostrado que los algoritmos clásicos de flujo óptico como el propuesto por Horn y Schunck y el propuesto por Lucas y Kanade permiten realizar la estimación del movimiento cardiaco. Sin embargo, en los últimos años ha surgido una propuesta para estimar el flujo óptico con mayor precisión, la cual consiste en trasladar la estimación a un nuevo dominio o diccionario, en donde la magnitud de los vectores de velocidad que representa el movimiento sea poco densa, para de esta manera estimar el flujo óptico realizando una minimización basada en la norma L1. Los resultados obtenidos con este método en imágenes sintéticas, demuestran la efectividad del mismo para estimar el movimiento en una secuencia de imágenes, por lo que es indispensable estudiar cual de los diccionarios es el más apropiado para que la representación del flujo óptico sea poco densa en secuencias de imágenes de resonancia magnética, y usar este diccionario, para estimar el movimiento del ventrículo izquierdo y compararlo con otros algoritmos clásicos de estimación del flujo óptico.*

Palabras Claves: Flujo óptico, Movimiento cardiaco, Procesamiento de Imágenes, Norma L1.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación del movimiento cardiaco, permite detectar desordenes en el movimiento de las paredes del ventrículo como la disminución del esfuerzo transmural (entre paredes) y la disminución de la torsión del ventrículo izquierdo, que son indicadores importantes de la

presencia de daño isquémico sobre determinada región del miocardio [1]. Por lo tanto, es de gran interés diseñar un algoritmo que permita detectar con una alta precisión el movimiento cardiaco de un paciente mediante el procesamiento de imágenes cardiacas de resonancia magnética. En este sentido, existen métodos basados en flujo óptico que permiten estimar el movimiento cardiaco a partir de una secuencia imágenes cardiacas 2D [2 - 4], sin embargo los algoritmos implementados generan errores significativos a la hora de realizar la estimación del movimiento.

Como parte de esta investigación se realizó un estudio previo [5] en donde se evaluó el algoritmo de Shen y Wu [6], el cual estima el flujo óptico usando la norma L1 en un modelo poco denso, observando resultados muy favorables en la estimación del movimiento para distintas secuencias de imágenes sintéticas, sin embargo al aplicarlo a una secuencia de imágenes de resonancia magnética 4D (3D+tiempo) los resultados fueron desfavorables en comparación a los obtenidos por otros dos algoritmos clásicos de estimación de flujo óptico como son el algoritmo de Horn and Shunck [7] y el algoritmo de Lucas y Kanade [8] el cual está basado en la norma L2. No obstante, recientemente se incorporaron modificaciones al algoritmo que han permitido lograr mejoras significativas en la estimación del movimiento cardiaco. En tal sentido, el objetivo de este trabajo es presentar dichas mejoras como un aporte al estado del arte. Para ello se describe brevemente las bases teóricas del método en estudio, luego se validará el método usando imágenes sintéticas y finalmente se mostrarán los resultados obtenidos al estimar el movimiento del ventrículo izquierdo en una secuencia de imágenes de resonancia magnética 4D.

2. EL FLUJO ÓPTICO COMO UN MODELO POCO DENSO

El flujo óptico es una técnica que permite estimar el movimiento de un objeto a través de la cuantificación de los cambios en las intensidades asociadas a las imágenes de una secuencia temporal, fundamentado en la hipótesis que establece que si la iluminación permanece constante, el cambio del tono de gris se debe al movimiento aparente de los objetos [7], la ecuación de restricción del flujo óptico aplicada a cada píxel (p_i) de la imagen para un tiempo t , puede representarse como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x & \mathbf{E}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = -\mathbf{E}_t \quad (1)$$

Donde \mathbf{u} y \mathbf{v} son vectores de longitud n (siendo n el número de píxeles en una imagen de la secuencia) que representan la magnitud del vector de velocidad o flujo óptico en “ x ” e “ y ” respectivamente, \mathbf{E}_x y \mathbf{E}_y son matrices diagonales de dimensión $n \times n$ y hacen referencia a las derivadas parciales de la intensidad de brillo con respecto a “ x ” e “ y ” respectivamente, \mathbf{E}_t es un vector de longitud $n \times n$ que representa las derivadas parciales de la intensidad de brillo con respecto a t .

En el modelo propuesto por Shen y Wu [6] se consideran los coeficientes de las magnitudes (\mathbf{u} y \mathbf{v}) del campo vectorial del flujo óptico, como simples imágenes las cuales al trasladarse a un nuevo dominio o base como la Transformada Discreta del Coseno (TDC) o la Transformada Haar Wavelet (THW), producen una nueva imagen cuya energía se concentra en pocos átomos,

es decir, la mayor parte de los coeficientes obtenidos al representar las imágenes en estas nuevas bases son cercanos o igual a cero, haciendo que el flujo óptico pueda representarse como un modelo poco denso. En este sentido, si llamamos \mathbf{W} a la matriz (tamaño $n \times n$) que contiene las bases o diccionario en donde el flujo óptico es poco denso, entonces podemos representar los vectores de magnitud en “ x ” e “ y ” del flujo óptico como $\mathbf{u} = \mathbf{W} \times \mathbf{S}_u$ y $\mathbf{v} = \mathbf{W} \times \mathbf{S}_v$ respectivamente, siendo los vectores \mathbf{S}_u y \mathbf{S}_v la representación poco densa del flujo óptico en el nuevo dominio, de esta manera (1) puede ser re-escrita como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x & \mathbf{E}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_u \\ \mathbf{S}_v \end{bmatrix} = -\mathbf{E}_t \quad (2)$$

De acuerdo con la teoría de *Compressive Sensing* [9], una señal poco densa se puede reconstruir a partir de un conjunto de proyecciones aleatorias con alta probabilidad, aplicando la minimización de la norma L1, ya que esta induce una repuesta poco densa o *sparse*. Basados en esta teoría Shen y Wu plantean la solución de (2) como: Sea $\mathbf{y} = -\mathbf{E}_t$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_x & \mathbf{E}_y \end{bmatrix}$,

$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W} \end{bmatrix}$ y $\mathbf{S} = [\mathbf{S}_u \quad \mathbf{S}_v]^T$ luego:

$$\mathbf{S}^* = \arg \min \|\mathbf{S}\|_1 \quad \text{sujeto a} \quad \mathbf{y} = \mathbf{ABS} \quad (3)$$

Donde $[\mathbf{u} \quad \mathbf{v}]^T = \mathbf{BS}^*$, por otra parte, si se considera el error que se produce debido a la aproximación que se realiza para la estimación de las derivadas parciales de primer orden (\mathbf{E}_x , \mathbf{E}_y y \mathbf{E}_t), el problema planteado en (3) se convierte en

$$\mathbf{S}^* = \arg \min \|\mathbf{y} - \mathbf{ABS}\|_2 + \lambda \|\mathbf{S}\|_1 \quad \text{sujeto a} \quad \mathbf{y} = \mathbf{ABS} + \mathbf{e} \quad (4)$$

Donde λ es un coeficiente de regularización y \mathbf{e} representa el error producido por la estimación de las derivadas parciales.

3. ESTUDIO DEL FLUJO ÓPTICO COMO MODELO POCO DENSO EN IMÁGENES SINTÉTICAS

Una de las condiciones necesarias para realizar la estimación del flujo óptico utilizando un modelo poco denso recae en que las magnitudes en “ x ” e “ y ” de los vectores de flujo óptico deben ser *sparse* en el nuevo dominio al cual se traslada el problema. Para validar esta condición, se utilizó una secuencia de imágenes sintéticas cuyo flujo óptico se muestra en la Fig. 1.a, en donde al aplicar la THW en los niveles 1 y 2 a la magnitud en “ x ” de los vectores del flujo óptico real se obtiene que ésta representación es menos *sparse* con respecto a la originada al aplicar la THW nivel 3 y la TDC, como lo demuestra la Fig. 1, en donde se observa que la THW nivel 3 y la TDC tienen un menor número de muestras diferentes de cero (es importante destacar que el comportamiento obtenido por la magnitud en “ y ” de los vectores del flujo óptico real es similar al obtenido para la magnitud en “ x ”). En consecuencia, al aplicar el algoritmo usando como

diccionario la THW en los niveles 1 y 2 el flujo óptico obtenido no corresponde al real, incrementando el error en la estimación (Error Promedio en Magnitud (EPM) y el Error Promedio en Angulo (EPA)), como se aprecia en la Fig. 1.b y en la Fig. 1.c, mientras que al usar los diccionarios de la THW nivel 3 y la DCT es posible estimar con mayor precisión el flujo óptico tal como se muestra en la Fig. 1.d y en la Fig. 1.e, en estos dos casos los errores de estimación son menores.

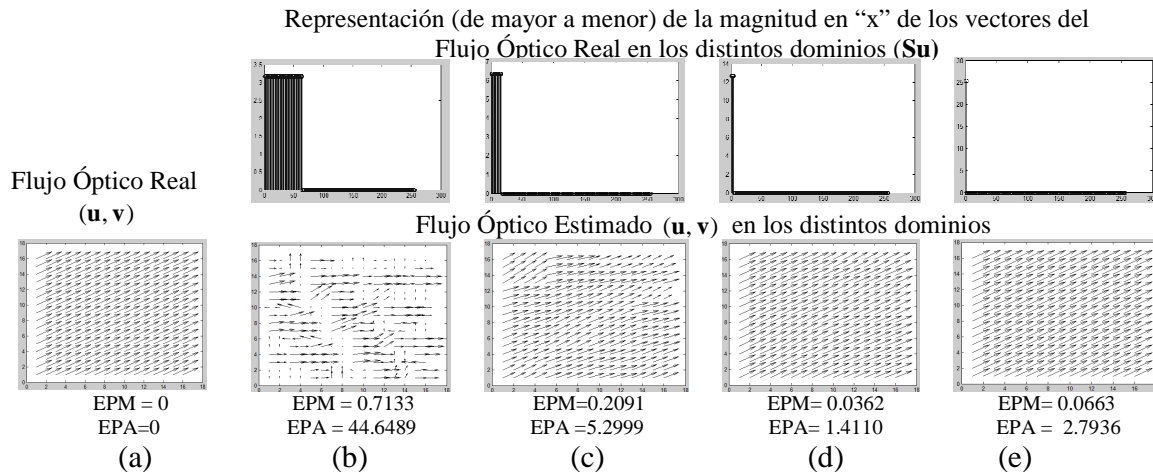


Figura 1- Flujo Óptico: (a) Real, (b) En el dominio de la THW Nivel 1, (c) En el dominio de la THW Nivel 2, (d) En el dominio de la THW Nivel 3, (e) En el dominio de la TDC.

Por otra parte, en un estudio previo a esta investigación [5] se demostró el desempeño del algoritmo basado en el modelo *sparse*, con respecto a los algoritmos de Horn y Shunck y de Lucas y Kanade Piramidal para distintas secuencias de imágenes sintéticas. En dicho trabajo la aplicación del algoritmo se realizó dividiendo las imágenes de la secuencia en bloques 8x8 no solapados y utilizando solo el diccionario de la TDC; por lo tanto, aquí nos concentraremos en comparar el desempeño del algoritmo al utilizar el diccionario de la THW nivel 3, y modificando el procesamiento de bloque-por-bloque (bloques no solapados) por un esquema que involucra bloques solapados, en donde el flujo óptico final es el resultado de un promedio ponderado entre los píxeles que se solapan. En la tabla 1 se muestran los errores obtenidos en la estimación del flujo óptico usando bloques solapados en las secuencias MysineB y MysineC, aquí observamos que para ambos diccionarios los errores en la estimación son similares a los obtenidos en [5] lo que nos permite validar el algoritmo bajo este esquema de procesamiento.

Tabla 1. Errores en la estimación del flujo óptico usando el modelo poco denso

Error	Secuencia MysineB		Secuencia MysineC	
	TDC	THW	TDC	THW
EPM (%)	1.50	1.48	0.43	0.71
EPA (°)	0.7394	0.7488	0.0328	0.0247

3. ESTIMACIÓN DEL MOVIMIENTO CARDIACO

Antes de implementar el método en la estimación del movimiento en el ventrículo izquierdo, es necesario comprobar que la magnitud de los vectores de flujo óptico generado por el movimiento cardiaco, presente un comportamiento poco denso en el nuevo dominio establecido

por el diccionario. Para ello, tomando como referencia el flujo óptico producido por el algoritmo de Horn y Shunck, el cual ha sido previamente validado en la estimación del movimiento cardiaco [4], se aplicó la TDC a dicho flujo óptico. Como resultado, los vectores de flujo óptico \mathbf{u} y \mathbf{v} en el nuevo dominio generan una representación *sparse* con muy pocas muestras distintas de cero como se ilustra en la Fig. 2. En consecuencia es posible aplicar (4) a la secuencia de imágenes de resonancia magnética cardiacas para estimar el movimiento del ventrículo izquierdo.

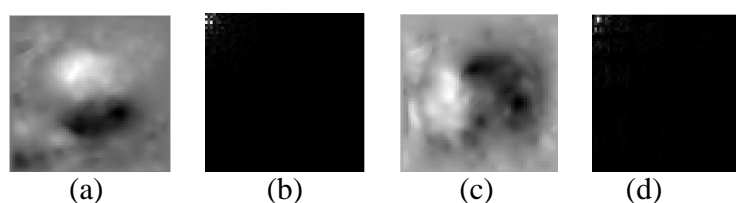


Figura 2- Magnitud en “ x ” e “ y ” del Flujo Óptico del ventrículo izquierdo al final de diástole en MRI aplicando el algoritmo de Horn and Shunck y trasladado al dominio de la TDC (a) \mathbf{u} (b) S_u (c) \mathbf{v} (d) S_v

En la Figura 3.a se muestra la estimación del flujo óptico a nivel del ventrículo izquierdo al final de diástole, usando el modelo *sparse* con bloques solapados y considerando el diccionario de la TDC. Al comparar estos resultados con los obtenidos por los algoritmos clásicos de Horn y Shunck (Fig. 3.b) y Lucas y Kanade (Fig. 3.c), observamos que para los tres casos el campo vectorial es similar y el sentido de los vectores de flujo óptico indican que las paredes del ventrículo izquierdo presentan un movimiento hacia el exterior de la cavidad ventricular, lo cual concuerda con el movimiento fisiológico del corazón al final de la diástole. Basados en esta comparación cualitativa, podemos aseverar que al incluir el procesamiento de bloques solapados en el algoritmo del modelo *sparse* se logra mejorar los resultados en la estimación del movimiento cardiaco. Sin embargo, no es factible afirmar cual de los tres métodos presentan resultados más precisos, pues al no conocer el flujo óptico real de dichas secuencias se hace imposible cuantificar los errores en la estimación.

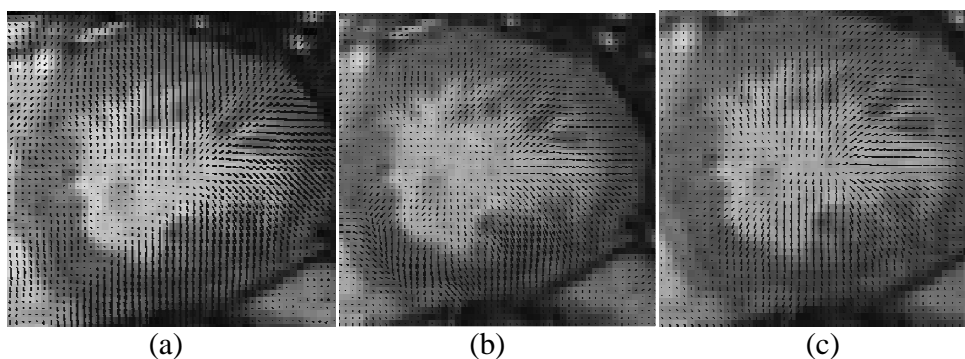


Figura 3- Estimación del Flujo Óptico en el ventrículo izquierdo al final de diástole en MRI usando: (a) Modelo *sparse* con diccionario TDC (b) Horn y Shunck (c) Lucas y Kanade

4. CONCLUSION

Las pruebas realizadas en imágenes sintéticas, muestran que al utilizar un diccionario en el cual el flujo óptico tenga una representación con mayor esparsidad, se incrementa la precisión en

la estimación del flujo óptico. Por su parte, la estimación del flujo óptico en la secuencia de imágenes de resonancia magnética usando el esquema de procesamiento de bloques solapados permite lograr mejoras significativas con respecto al esquema de bloques no solapados mostrados en [5]. Sin embargo, es importante mencionar que el uso de bloques solapados representa un mayor costo computacional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo cuenta con el apoyo del CDCHT, DAP y Vicerrectorado Administrativo de la Universidad de Los Andes, así como del Proyecto ECOS-NORD PI-20100000299.

REFERENCIAS

- [1].Bravo, A., Mantilla, J., Clemente, M., Vera, M., and Medina, R. Left ventricle segmentation and motion analysis in multi-slice computerized tomography, in *Biomedical Image Analysis and Machine Learning Technologies: Applications And Techniques*, F., G. and E., R., eds, pp 307-322, 2010.
- [2].Sühling M. et al. Myocardial Motion Analysis From B-Mode Echocardiograms, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol 14, pp 525-536, 2005.
- [3].Macan T. et al, 3D cardiac motion estimation by point-constrained optical flow, *2nd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, pp 255–259, 2001.
- [4].Ibarra E., Salas R, Medina R. y Garreau M., Estimación del movimiento cardiaco en imágenes de resonancia magnética usando un algoritmo basado en flujo óptico, *IV Congreso Venezolano de Bioingeniería*, 2012
- [5].Ibarra E., Medina R. Sparse Based Optical Flow Estimation in Cardiac Magnetic Resonance Images, *9th International Seminar on Medical Information Processing and Analysis*, 2013
- [6].Shen, X. and Wu, Y., Sparsity model for robust optical flow estimation at motion discontinuities, *In 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2456-2463, 2010.
- [7].Horn, B. K. and Schunck, B. G., Determining optical flow, *Artificial Intelligence*, vol 17, pp. 185-204, 1981.
- [8].Lucas, B. D. and Kanade T., An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *In Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 674-679, 1981
- [9]. Donoho, D., Compressed sensing, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, pp. 489-509, 2006

MRI SPATIAL DISTORTION EVALUATION AND ASSESSMENT FOR STEREOTACTIC RADIOSURGERY

José Mielgo

mielgosez@gmail.com

Departamento de Física, Universidad Simón Bolívar, Altos de Sartenejas, Miranda - Venezuela.

Miguel Martín-Landrove

mglmrtn@yahoo.com

Centro de Física Molecular y Médica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Centro de Visualización Médica, Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela, Sebucán and Centro de Diagnóstico Docente Las Mercedes, Las Mercedes, Caracas - Venezuela.

Wuillian Torres

wtorres@fii.gob.ve

Fundación Instituto de Ingeniería para la Investigación y Desarrollo Tecnológico, Centro de Procesamiento Digital de Imágenes, Altos de Sartenejas, Miranda - Venezuela.

Abstract. *Gamma Knife intracranial stereotactic radiosurgery is a high precision radiosurgery which requires a high degree of accuracy in target localization by means of medical imaging. In particular, MRI introduces spatial distortions due to antennae's RF inhomogeneity and brain's inhomogeneous tissue magnetization. Gamma Knife equipment rely almost exclusively on MRI for target localization, so the generation of an atlas of MRI spatial distortion could be very useful to decide if an additional CT stereotactic acquisition is necessary. In the present work, an image registration method is proposed to evaluate the spatial distortion map in MR images assuming that CT images are less distorted than MR images and can be used as a suitable template for image registration. Initially, MR and CT images are registered by means of a rigid transformation computed through an Iterative Closest Point algorithm using the external or fiducial marks present in both stereotactic data sets as input data. Further registration is performed by non-rigid transformations based on quadratic B-Spline thin plate-like function using as similarity function the normalized mutual information. Results indicate relatively high spatial distortions in skull bone–encephalic mass and corpus callosum–encephalic mass interfaces where a local magnetic field gradient due to tissue inhomogeneity is present. Therefore, for lesions located in those zones it is mandatory to have a stereotactic CT*

acquisition. Future work is addressed to develop an appropriate atlas of patient dependent MRI spatial distortion.

Keywords: MRI spatial distortion, non-rigid registration, stereotactic radiosurgery, B-spline thin plate function

1. INTRODUCTION

Gamma Knife stereotactic radiosurgery is a high precision procedure with a limit of 0.3 mm. Nevertheless, that precision would be worthless without the accuracy in target localization by means of medical imaging. In particular, MRI introduces some spatial distortions due to antennae's RF inhomogeneity and brain's inhomogeneous tissue magnetization. Although the first kind of spatial distortion can be determined separately with adequate phantoms [1,2] and images can be corrected accordingly, the second one is patient and magnetic field strength dependent and only spatial distortion estimation is possible [3 - 5]. Modern Gamma Knife equipment rely almost exclusively on MRI for target localization [6] so the generation of an anatomical atlas of MRI spatial distortion could be very useful to decide if an additional CT stereotactic acquisition is necessary, depending on the lesion localization. It is generally accepted that CT images are less distorted than MR images and can be used as a suitable template for image registration, including both rigid and non-rigid transformations. A two-step procedure is proposed: first, MR and CT images are 3D registered by means of successive rigid transformations, i.e., rotations and translations, through the Iterative Closest Point (ICP) algorithm [7 - 9] using the external or fiducial marks present in both stereotactic data sets as input data. As a second step, non-rigid transformations are determined by finding the control point configuration in a quadratic B-Spline thin plate-like function that maximize the normalized mutual information [10-12].

2. MATERIALS AND METHODS

Images were acquired with a 64 slices helical CT scanner and two MRI scanners with magnetic field intensities of 1.5 and 3 Tesla, in order to compare field dependence on MRI distortions. In all images, a stereotactic frame was used holding a marker box specific for each image modality, i.e. CT and MRI. Images were first registered using external reference points by means of rigid transformations and later by mutual information maximization using non rigid Thin Plate B-splines transformations

2.1 Fiducial markers rigid registration

To apply the ICP algorithm [8,9], two sets of points are defined: P_{CT} composed of n elements, $\{p_{CT,i}\}_{i=1}^n$ and P_{MRI} composed of m elements, $\{p_{MRI,i}\}_{i=1}^m$ which correspond to fiducial or external marker points over the stereotactic marker box. The optimization procedure that registers both data sets consists in the minimization of the following quantity

$$S = \sum_{i=1}^m |p_{MRI,i} - \min(p_{MRI,i}, P_{CT})|^2 \quad (1)$$

where $\min(p_{MRI,i}, P_{CT})$ is the closest point to $p_{MRI,i}$ within the set P_{CT} . Initially, a starting CT points set is defined as

$$P_{CT,0} = \left\{ \min(p_{MRI,i}, P_{CT}) \right\}_{i=1}^m \quad (2)$$

which means that equation (1) is calculated to obtain an initial value S_0 . A rigid transformation is performed to bring MRI points, P_{MRI} , to CT points, $P_{CT,0}$, given by a rotation matrix R combined with a translation by a vector b

$$P_{MRI,1} = P_{MRI,0}R + b \rightarrow P_{CT,0} \quad (3)$$

Parameters in equation (3) can be estimated by least squares methods or by quaternions [7]. The process can be repeated iteratively yielding sequences $P_{MRI,(n)}$, $P_{CT,(n)}$ and $S_{(n)}$; it ends when the following condition $S_{(n+1)} - S_{(n)} < \varepsilon$ is fulfilled. The results of such a procedure are shown in Figure 1.

2.2 Non rigid registration

Non rigid registration is performed using a Thin Plate B spline transformation [11,12] that uses as control points a regular grid of size $n_x \times n_y$ set upon each image slice. The transformation can be stated formally as the tensor product

$$T(u(x, y), v(x, y)) = T(P) = \sum_{f=0}^3 \sum_{c=0}^3 B_f(u) B_c(v) p_{t+f, j+c} \quad (4)$$

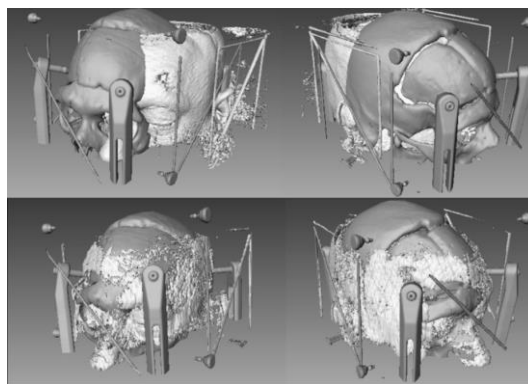


Figure 1 – Rigid registration. Top, unregistered MRI (light grey) and CT (dark grey) images, (b) registered images.

where $p_{i,j}$ are the control points over the grid, u , v are the displacements and B_n are cubic B-splines [11,12]. In order to obtain the parameters in equation (5), a cost function must be defined to guarantee a Thin Plate condition during the optimization procedure, i.e. the displacements are relatively small, a situation which is expected in the practice. The cost function can be defined as

$$F = -NMI + \lambda F_{smooth} \quad (5)$$

where NMI is the normalized mutual information function [10] and F_{smooth} is defined as [13]

$$F_{smooth} = \frac{1}{A} \int_0^x \int_0^y \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial f^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial c^2} \right) + 2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial fc} \right) \right] df dc \quad (6)$$

where $T(f(X,Y),c(X,Y))$ is the non-rigid transformation. The optimization procedure consists in attaining a global minimum for the cost function F , which corresponds to maximum mutual information, and it is performed by the gradient descent method.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Some results are shown in Figure 2 for brainstem region and in Figure 3 for the sella turcica region at different magnetic fields, 1.5 and 3 T. Maximum average distortions are summarized in Table 1. Analysis of Figure 2 shows that maximum distortions occur perpendicularly in regions where possible changes in tissue nuclear magnetic properties are present, due to the interface between brain tissue and cerebrospinal fluid, as expected.

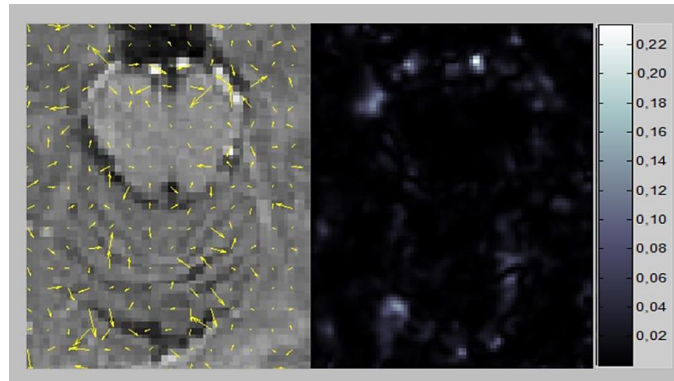


Figure 2 – Distortions at the brainstem for a 1.5 T MRI. Left, distortion vector map, indicated by arrows; right, distortion intensity map, the lateral scale is in millimeters.

In the case of Figure 3, which is a comparison between 1.5 and 3 T images for the sella turcica region, again show that maximum distortions occur at tissue interfaces, but the magnitude is greater the higher the magnetic field, about a factor of two as should be expected for the magnetic field value. This is not a necessary result, because local magnetic field gradients and correspondingly, distortions, depend on the actual patient positioning in the MRI system, which determines the demagnetization factors for all tissue volumes in the skull. Analysis of Table 1 indicates that in general, at 3 Tesla, the distortions are greater than for 1.5 Tesla, but not necessarily the double of it. Variations among different patients are possibly related to patient positioning, i.e. different demagnetization factors, instead of specific variations in magnetic susceptibilities.

Table 1. Maximum distortions

Anatomic region	Maximum average distortion (mm) 1.5 T	Maximum average distortion (mm) 3 T
Whole image	0.10	0.47 ± 0.08
Sella turcica	0.37 ± 0.16	0.82 ± 0.13
Brainstem	0.12 ± 0.14	0.15 ± 0.05

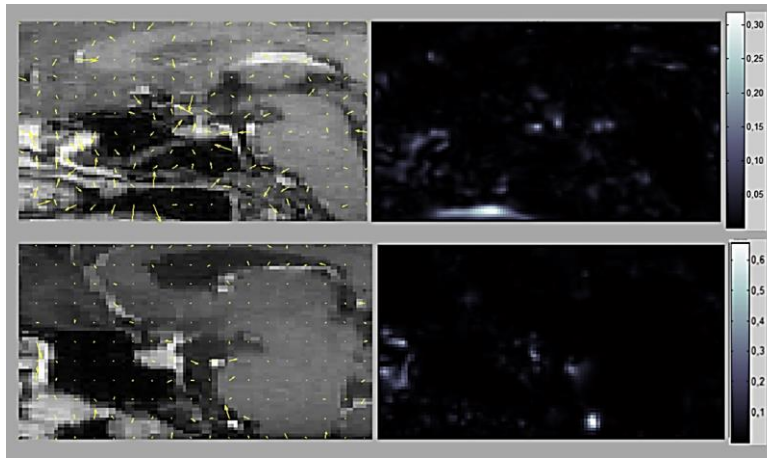


Figure 3 – Comparison of distortions in coronal MR images for the anatomical region of sella turcica, pituitary gland and optic chiasm in different patients, at 1.5 T, top, and 3 T, bottom. Left, distortion vector map, indicated by arrows; right, distortion intensity map, lateral scale is in millimeters. Notice that mayor distortions occur at tissue interfaces.

4. CONCLUSIONS

The proposed two-step method for image registration allows for the determination of patient induced distortions in MRI images. The method can be easily integrated as a routine evaluation of accuracy in Gamma Knife radiosurgery when both, CT and MR images are obtained. Also, distortion information can be used to establish an atlas data set for only MRI based treatments.

Acknowledgements

We would like to thank the Stereotactic Gamma Knife Unit at the Centro de Diagnóstico Docente Las Mercedes, Caracas, for the images and support given to this research.

REFERENCES

- [1].Mack, A., Czempel, H., Kreiner, H.J., Dürr, G. & Wowra, B., Quality assurance in stereotactic space. A system test for verifying the accuracy of aim in radiosurgery. *Medical Physics*, vol. 29, n. 4, pp. 561-568, 2002.

- [2].Mack, A., Wolff, R., Scheib, S., Rieker, M., Wetz, D., Mack, G., Kreiner, H.J., Pilatus, U., Zanella, F.E., Böttcher, H.D. & Seifert, V., Analyzing 3-tesla magnetic resonance imaging units for implementation in radiosurgery. *Journal of Neurosurgery*, vol. 102, pp. 158-164, 2005.
- [3].Sumanaweera, T.S., Adler, J.R.Jr., Napel, S. & Glover, G.H., Characterization of spatial distortion in magnetic resonance imaging and its implications for stereotactic surgery. *Neurosurgery*, vol. 35, n. 4, pp. 696-704, 1994.
- [4].Moerland, M., Beersma, R., Bhagwandien, R., Wijrdeman, H.K. & Bakker, C.J.G., Analysis and correction of geometric distortions in 1.5 T magnetic resonance images for use in radiotherapy treatment planning. *Physics in Medicine and Biology*, vol. 40, n. 10, pp. 1651-1664, 1995.
- [5].Wang, H., Balter, J. & Cao, Y., Patient-induced susceptibility effect on geometric distortion of clinical brain MRI for radiation treatment planning on a 3T scanner. *Physics in Medicine and Biology*, vol. 58, n. 3, pp. 465-477, 2013.
- [6].Prabhakar, R., Julka, P.K., Ganesh, T., Munshi, A., Joshi, R.C. & Rath, G.K., Feasibility of using MRI alone for 3D radiation treatment planning in brain tumors. *Japanese Journal of Clinical Oncology*, vol. 37, n. 6, pp. 405-411, 2007.
- [7].Horn, B.K.P., Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 4, pp. 629-642, 1987.
- [8].Besl, P.J. & McKay, N.D., A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, n. 2, pp. 239-256, 1992.
- [9].Zhang, Z., Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, vol. 13, n. 12, pp. 119-152, 1994.
- [10].Pluim, J.P.W., Maintz, J.B.A. & Viergever, M.A., Mutual-information-based registration of medical images: a survey. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 22, n. 8, pp. 986-1004, 2003.
- [11].Klein, S., Staring, M. & Pluim, J.P.W., Evaluation of Optimization Methods for Nonrigid Medical Image Registration Using Mutual Information and B-Splines. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, n. 1, pp. 2879-2890, 2007.
- [12].Prautzsch, H., Boehm, W. & Paluszny, M., *Bézier and B-Splines Techniques*, Springer-Verlag, 2002.
- [13].Rueckert, D., Sonoda, L.I., Hayes, C., Hill, D.L., Leach, M.O. & Hawkes, D.J., Nonrigid registration using free-form deformations: Application to breast MR images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 18, n. 8, pp.712-721, 1999.

"SOFTWARE PARA EL RECONOCIMIENTO DE PATRONES DE TRAYECTORIAS ATÍPICAS EN VIDEOS DE VIGILANCIA. CASO DE ESTUDIO: UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DEL TÁCHIRA"

Giancarlo Colmenares

Deiby Ramos

Marcel M. Molina M.

gcolmen@unet.edu.ve

deiby.ramos@gmail.com

mmolina@unet.edu.ve

Departamento de Ingeniería en Informática, Universidad Nacional Experimental del Táchira
Av. Universidad, Sector Paramillo, San Cristóbal-Venezuela

Abstract. *Es común encontrar cámaras de video en lugares con gran afluencia de personas, desde grandes edificaciones hasta tiendas de productos, en lugares públicos y privados; generalmente éstas están integradas a sistemas de análisis y monitoreo, controlados por personal dedicado. El análisis y monitoreo puede ser tedioso y consumir mucho tiempo, además de que el personal puede ser no confiable. De la misma manera que la visión por computador asiste a las máquinas en el reconocimiento del ambiente, el aprendizaje de patrones se apoya en la inteligencia artificial, usando algoritmos de aprendizaje como método de reconocimiento. El reconocimiento de comportamientos o patrones, es la intención de dar a las máquinas la capacidad de discernir eventos, en tal sentido, la presente investigación pretende reconocer personas en movimiento sobre secuencias de video en primer lugar, para continuar con el aprendizaje de las rutas correspondientes a las trayectorias de movimiento identificadas, para finalmente determinar patrones de movimiento atípicos en estas trayectorias. Las secuencias de video capturadas corresponden a localidades específicas de la Universidad Nacional Experimental del Táchira. La investigación se dividió en dos etapas: la primera consistió en la recolección y tratamiento de los videos para detectar los movimientos y rutas tomadas por las personas; y la segunda consistió en transformar la información de estas rutas en datos compatibles con los algoritmos de aprendizaje supervisado utilizados. Para la primera etapa, se implementó la funcionalidad de comparación entre regiones de imágenes representativas de personas, a través del algoritmo Template Matching, la plantilla es seleccionada cada vez que es detectada una persona en una escena de la secuencia para luego realizar una comparación con nuevas detecciones que son proporcionadas por el algoritmo a fin de detectar las trayectorias individuales; a efectos de minimizar el tiempo de procesamiento, superpuesta en las imágenes de*

los videos se trazó una cuadrícula sobre la cual se marcan las rutas detectadas. Se realizó un nuevo programa para generar rutas aleatorias ficticias dentro del espacio de los videos para simular personas con comportamiento fuera de lo regular dentro del espacio estudiado; estas rutas ficticias aunque generadas automáticamente mantienen la misma distribución de longitud que las reales obtenidas directamente del video. De esta manera, será posible indicarle a los algoritmos de aprendizaje cuales trayectorias son de personas que comúnmente transitan por la zona estudiada, y cuales corresponden a rutas atípicas en el mismo entorno. Los datos de las trayectorias se formatearon de manera tal que pudieran ser usados por el algoritmo de aprendizaje, para la investigación se utilizó una Máquina de Soporte Vectorial y una red neuronal, ambas configuradas para entrenarse organizando los datos en 10 folds (pliegues) para la diferenciación de las rutas reales de las ficticias; los modelos obtenidos permitieron clasificar correctamente más del 99% de las trayectorias probadas.

Keywords: Reconocimiento de patrones, Video vigilancia, *Template Matching*, SVM.

1. INTRODUCCIÓN

En gran parte de las situaciones en las que se utilizan cámaras de video para la vigilancia, el análisis y monitoreo deben ser realizados con un tiempo de respuesta razonable, además deben estar sujetos a la menor cantidad posible de fallos. Esta tarea monótona puede llegar a ser tediosa y consumir mucho tiempo, además de que el personal puede ser no confiable. La visión por computador es una herramienta trascendente en diferentes áreas de investigación y análisis, a tal punto, que se realizan estudios de secuencias de videos, en busca de características y patrones, sobre objetos definidos para aportar soluciones automatizadas a incógnitas científicas o procesos que dependen de intervención humana, como es el caso de la vigilancia pasiva; según Basu *et al.* [1], los cuatro mejores enfoques conocidos para el reconocimiento de patrones son: *template matching*, *statistical classification*, *syntactic or structural matching*, y *neural networks*.

No todos los aportes realizados por este tipo de investigaciones contemplan comportamientos o patrones atípicos en los análisis propuestos, y por ende las soluciones para aplicaciones como manejo automatizado de vehículos o seguimiento de video para vigilancia, pueden detectar y analizar comportamientos regulares, sin embargo no podrán atender otros escenarios. Es por ello que el análisis debe considerar tanto patrones regulares como atípicos y construir modelos predictivos de comportamiento del objeto en estudio, ya que de esta manera permitirá a las soluciones ser más consistentes en la atención a situaciones.

Por ello, se plantea el diseño de un software de visión por computador que permita el reconocimiento de patrones a partir del seguimiento de trayectorias atípicas, a través de una red neuronal, que satisfará los requerimientos en las áreas de investigación anteriormente mencionadas, permitiendo la elaboración de modelos predictivos de movimiento, y de facto aplicaciones más robustas.

2. DESARROLLO

La presente investigación propone la elaboración de un software funcional para la detección de patrones atípicos en secuencias de video, es así que para el desarrollo del mismo se utilizaron conjuntamente la metodología de desarrollo en espiral y la metodología propuesta por Branch, J. y Olague, G. (2001) [2] para abordar problemas de visión por computador. A continuación se presentan las fases del desarrollo.

2.1. Fase de Detección

Se utilizaron descriptores HOG de la Biblioteca de Visión por Computador EmguCV en Lenguaje C# para realizar la detección y el seguimiento de los objetos de estudio, en este caso las personas en el video de vigilancia. Como se observa en la Fig. 1, la técnica aplicada tiene la capacidad de reconocer una persona en una escena de manera eficaz.



Figura 1 - Detección de personas a través de HOG's.

Esta técnica se basa en el uso de una máquina de soporte vectorial implícita que se configura a través del método *SetSVMDetector*, cuyo vector de detección lo proporciona por defecto la biblioteca a través de una función llamada *GetDefaultPeopleDetector*. Para esto, es necesaria la elaboración de un prototipo capaz de dibujar rectángulos que corresponden a las personas presentes en la secuencia de video a procesar. Es importante acotar que las dimensiones de los rectángulos pueden variar significativamente dependiendo de la distancia de enfoque que tenga la cámara de la que provienen las secuencias de video. Asimismo, estos rectángulos son parte de los datos que se usan en primer lugar en la fase de construcción de trayectorias.

2.2. Fase de Construcción de Trayectorias

Luego de construir la porción de software capaz de detectar personas en secuencias de video, es necesario obtener datos relacionados con las trayectorias que siguen dichas personas dentro de las secuencias. Para ello es necesario, construir una solución a partir del prototipo creado en la fase de detección. Cabe mencionar que los datos correspondientes a las trayectorias constituyen la fuente de datos para el procesamiento que se realiza en la fase de reconocimiento de patrones.

2.2.1 Seguimiento de las Personas usando algoritmo de *Template Matching*

Esta alternativa se lleva a cabo, a través del procesamiento de la porción de la imagen que corresponde a los rectángulos proporcionados por la fase de detección los cuales representan la posición parcial de todas las personas que se encuentren dentro de una escena específica.

Se agrega al prototipo la funcionalidad de comparación entre regiones de imágenes representativas de las personas, a través de un algoritmo de *Template Matching*, el cual se encarga de comparar imágenes basándose en los datos (píxeles) que se encuentran en una plantilla. Esta plantilla es seleccionada cada vez que es detectada una persona en una escena de la secuencia. Luego se realiza una comparación con nuevas detecciones que son proporcionadas por el algoritmo de detección. El seguimiento es posible gracias a la naturaleza secuencial de los videos.

Por otra parte, cabe destacar que el *Template Matching* fue configurado con un grado de tolerancia de 0.75 en el rango [0 – 1]. Siendo 1 el grado de menos tolerancia para la correlación.

Se selecciona este grado de tolerancia luego de haber realizado múltiples evaluaciones sobre varios valores, siendo éste el que obtiene mejor rendimiento en la correlación.

2.2.2 Diseñar cuadrícula bidimensional asociada a cada escena de la secuencia de video

Una vez que se conocen las restricciones de los algoritmos utilizados en la fase de reconocimiento de patrones, se propone diseñar una cuadrícula dentro de cada escena, cuyo objetivo es agrupar regiones de pixeles. De esta manera, cada celda de la cuadrícula tiene un conjunto de regiones detectadas representando una persona.



Figura 2 - Cuadrícula propuesta para manejar las detecciones.

En la Fig. 2, se observa la cuadrícula dibujada sobre una escena específica. Las dimensiones de cada celda son de tamaño variable, obedeciendo a un arreglo bidimensional conformado por 20 filas y 20 columnas. Para lograr una distribución uniforme de los pixeles de la imagen, es necesario ajustarlos a cada celda, se define una constante MAX_GRILLA que corresponde al máximo valor tanto de las filas como las columnas. Además, otras dos: MAX_WIDTH y MAX_HEIGHT que corresponden al ancho y alto en pixeles de la imagen procesada.

2.2.3 Construcción de las trayectorias como códigos a partir de las posiciones sobre el arreglo bidimensional

Para determinar el comportamiento de las personas de acuerdo a las trayectorias que siguen durante una secuencia de videos, se codifica cada movimiento posicionado en el arreglo bidimensional como una acción con respecto al movimiento inmediatamente anterior. En la tabla 1, se ilustran los códigos correspondientes a los posibles movimientos realizados por una persona en una secuencia de video.

Tabla 1. Cuadro Representativo de los códigos que conforman una trayectoria.

1: arriba a la izquierda	2: arriba	3: arriba a la derecha
4: izquierda	5: se mantuvo	6: derecha
7: abajo a la izquierda	8: abajo	9: abajo a la derecha

Por ejemplo: si la trayectoria de una persona está representada por las siguientes posiciones (*fila, columna*) en el arreglo bidimensional: (0, 0), (1,0), (2,0), (2, 1), (2, 2), (1, 1) y tomando en cuenta que los movimientos son secuenciales, entonces la trayectoria se codifica como: 0 – 0 – 8 – 8 – 6 – 6 – 3; del mismo modo, se agregan la fila y la columna que representan el origen de la trayectoria.

Por otra parte, los algoritmos de inteligencia artificial demandan trayectorias típicas y trayectorias atípicas, denominadas casos positivos y negativos, respectivamente. Para la

investigación se utilizaron los videos de vigilancia proporcionados por la Universidad Nacional Experimental del Táchira, y la información extraída fue etiquetada como trayectorias típicas. Del mismo modo, para las trayectorias atípicas se propone la generación automática de trayectorias circulares, trayectorias aleatorias y trayectorias de retorno. Cada una de estas trayectorias se etiqueta como un caso inválido.

Para efectos de la generación de los modelos, se tomó en cuenta que la longitud de las trayectorias atípicas estuviera dada por la distribución de la longitud de las trayectorias típicas (reales), estas totalizaron 744, de las cuales 382 están en el rango de [0-10] movimientos, 107 en el rango de [11-20] movimientos, y 255 en el rango de [21-30] movimientos. El número de trayectorias atípicas construidas, distribuidas según su longitud, se presenta en la tabla 2, donde se observa una distribución de longitud (movimientos) correlacionada con las trayectorias típicas, de esta manera se tienen 1501 trayectorias atípicas para esta fase.

Tabla 2. Distribución de la longitud de las trayectorias atípicas.

Long. de la tray.	Cantidad	Porcentaje	Forma aleatoria
0-10	770	51,344	Círculos, Retorno, movimientos aleatorios.
11-20	215	14,3817	Círculos, Retorno, movimientos aleatorios.
21-30	516	34,2741	Círculos, Retorno, movimientos aleatorios.

2.3. Fase de Reconocimiento de Patrones

Esta última fase de la investigación hace uso de los datos generados por las fases de detección y construcción de trayectorias a través de la herramienta *Weka* de aprendizaje automático para la generación de modelos.

Después de realizar la configuración inicial del conjunto de datos, se generaron dos modelos, uno utilizando una red neuronal y otro con el algoritmo de aprendizaje automático SMOReg (SMO - *Sequential Minimal Optimization*) el cual representa una Máquina de Soporte Vectorial. Para ambos casos se utilizaron dos configuraciones para la validación, por un lado la división de los datos en un subconjunto para entrenamiento y otro para la evaluación del mismo, 80% y 20%, respectivamente; por otro lado, se usó el *Cross Validation* con un valor por defecto de 10 *Folds*, es decir, que se separan los datos en 10 subconjuntos de tamaño $n/10$, siendo n el tamaño del conjunto de dato; en este tipo de validación, se usan 9 subconjuntos para el entrenamiento y uno para la evaluación, este proceso se repite 10 veces intercambiando los subconjuntos y se toma una precisión media.

3. RESULTADOS

Los datos utilizados en esta fase de pruebas están compuestos por: a) el conjunto inicial de trayectorias típicas detectadas y construidas, y b) las trayectorias atípicas construidas automáticamente. El resumen de los resultados obtenidos con los datos de prueba se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de variables obtenidas para los modelos generados en la fase de pruebas.

	PerceptronMultilayer		SMOReg	
	Split	Cross-validation	Split	Cross-validation
FACTOR DE EVALUACION	80% - 20%	10 Folds	80% - 20%	10 Folds
Error medio absoluto	0.0011	0.0013	0.0797	0.0784
Número total de instancias	449	2244	449	2244

Los resultados presentados en la tabla 4 corresponden al comportamiento de los algoritmos con respecto al ajuste (1 - error absoluto), los cuales permiten observar más fácilmente cual tuvo mejor rendimiento al generar los modelos con los datos utilizados durante ambas fases de prueba.

Tabla 4. Valor de ajuste de los modelos generados en la fase de pruebas

	Algoritmo			
	PerceptronMultilayer		SMOReg	
	Split	Cross-validation	Split	Cross-validation
Factor de evaluación	80%	10 Folds	80%	10 Folds
Ajuste del modelo generado	0.9989	0.9987	0.9203	0.9216

4. CONCLUSIONES

Se creó un software capaz de detectar y hacer un seguimiento sobre personas que se encuentren en secuencias de video. Además, se obtienen datos correspondientes a las trayectorias seguidas por las personas en diferentes secuencias para crear un *pool* para el reconocimiento de patrones tanto típicos como atípicos sobre estas trayectorias a través de la librería de aprendizaje automático *Weka*.

Es necesario acotar que los tiempos de detección son 500 milisegundos por *frame* procesado, de esta manera, la obtención de los datos que corresponden a las trayectorias de las personas se hace también en poco tiempo, lo que permite realizar la detección sobre secuencias de video en tiempo real.

De esta manera, se construyó un prototipo funcional capaz de etiquetar trayectorias a partir de un entrenamiento previo con trayectorias suministradas o detectadas a partir del módulo de detección.

Finalmente, al realizar el análisis de los resultados se observó que el algoritmo *Perceptron Multilayer* tiene un porcentaje superior de precisión sobre el algoritmo SMOReg (99% y 92%), respectivamente) para el conjunto de datos utilizado en la fase de pruebas. Los resultados obtenidos en la clasificación de las trayectorias permiten señalar que los algoritmos seleccionados se adaptan a los datos utilizados según el formato que se definió para los mismos.

REFERENCIAS

- [1] Basu J., Bhattacharyya D., Tai Hoon K. Use of Artificial Neural Network in Pattern Recognition. [Revista en Línea]. Disponible: http://www.sersc.org/journals/IJSEIA/vol4_no2_2010/3.pdf, 2010.
- [2] Branch, J., & Olague, G. La visión por computador. Revista Dyna (133), 2001.
- [3] Makris D., Ellis T. Visual Learning in Surveillance Systems. Learning paths of the 3D scene. [Documento en Línea]. Disponible: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.20.5638&rep=rep1&type=pdf>, 2001.
- [4] Min H., Saad A., Mubarak S. Detecting Global Motion Patterns in Complex Videos. [Documento en Línea]. Disponible: http://www.eecs.ucf.edu/~sali/Publications/2008_ICPR_SuperTracks.pdf, 2008.
- [5] Zhu Q., Avidan S., Yeh M., Cheng K. Fast Human Detection Using a Cascade of Histograms of Oriented Gradients. [Documento en Línea]. Disponible: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.68.6232>, 2006.

SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES DERMATOSCÓPICAS EN EL ESPACIO CIELAB UTILIZANDO FILTROS MORFOLÓGICOS SML

Wuilian J. Torres

wtorres@fii.gob.ve

Centro de Procesamiento Digital de Imágenes, Fundación Instituto de Ingeniería y Laboratorio de Computación Gráfica y Geometría Aplicada, Escuela de Matemática, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria, Av. Los Estadios, Los Chaguaramos, Caracas-Venezuela

Miguel Martín-Landrove

mglmrtn@yahoo.com

Centro de Física Molecular y Médica. Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria, Av. Los Estadios, Los Chaguaramos, Caracas-Venezuela.

Centro de Diagnóstico Docente Las Mercedes. Caracas, Venezuela

Mayerith Torreyes

Miguel López

mayerith@hotmail.com

miguelalejandrolb@yahoo.com

Hospital Militar Dr. Carlos Arvelo. Caracas, Venezuela, Caracas-Venezuela

Resumen. El análisis de las imágenes obtenidas por un dermatoscopio tiene como finalidad identificar y extender el diagnóstico visual estándar de las lesiones pigmentadas y no pigmentadas. El especialista, al analizar las imágenes en este contexto, incorpora un alto grado de subjetividad que trae como consecuencia la posibilidad de tener diversos diagnósticos a partir del análisis visual de la imagen. El objetivo de este trabajo es proponer un método de segmentación automático utilizando operadores de la morfología matemática en imágenes multicanal. Estos operadores se fundamentan en un esquema de ordenamiento vectorial que se ha denominado Suma, Máximo y Lexicográfico (SML). La segmentación se realiza en el espacio de colores CIELab previa identificación de los parámetros que caracterizan las lesiones. Los resultados fueron evaluados sobre una colección de 120 imágenes adquiridas en pacientes que consultaron por lesiones pigmentadas en la piel.

Palabras Clave: Imagen, Morfología matemática, segmentación, dermatoscopia, melanoma.

1. INTRODUCCIÓN

El melanoma maligno es un tumor originado en los melanocitos usualmente localizados en epidermis, dermis, ojo o epitelio mucoso. Es menos frecuente que otros cánceres de piel, pero más letal. El dermatólogo utiliza la dermatoscopia, una técnica no invasiva para la detección temprana del cáncer de piel, la cual incrementa la sensibilidad en el diagnóstico del melanoma de un 60 a un 90% aproximadamente. Se requiere de formación y entrenamiento adecuado para el dominio de esta técnica [1]. Los trabajos orientados a la utilización del computador para el diagnóstico de las lesiones en la piel se ejecutan en tres fases: la delimitación de la lesión, la identificación de parámetros de clasificación y el diagnóstico. Las imágenes dermatoscópicas presentan algunas deficiencias que complican la segmentación; por ejemplo, la iluminación no uniforme, la presencia de artefactos como los pelos, restos de la sustancia interface como alcohol o gel de ultrasonido utilizados para disminuir la reflexión de la luz, poco contraste entre la piel y la lesión, etc.. Aparte de esto, los melanomas presentan apariencias muy disímiles por influencia del color, forma, tamaño, fragmentación, presencia de redes, etc.

Este trabajo se enfoca en la segmentación de las imágenes para delimitar las lesiones presentes en ella; se hace un pre-procesamiento con operadores morfológicos clásicos para filtrar la presencia de pelos y otros artefactos propios de estas imágenes. Seguidamente, un filtro morfológico multicanal denominado SML es utilizado para reducir la variabilidad de la imagen y resaltar los bordes de la lesión, sin modificar los colores presentes en la imagen. Para identificar los parámetros característicos que permiten diferenciar las diferentes tonalidades de la piel y de la lesión, se utiliza el espacio de colores CIE Lab, caracterizado por facilitar una mayor uniformidad en la percepción de colores que son ligeramente diferentes. A partir de estos parámetros, se determinan las fronteras de las lesiones presentes en la imagen.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se dispone de una biblioteca de 120 imágenes dermatoscópicas; adquiridas utilizando un video dermatoscopio computarizado con luz polarizada, el cual utiliza lentes con factores de magnificación de 20 a 70x y algunos ejemplos se muestran en la Figura 1.

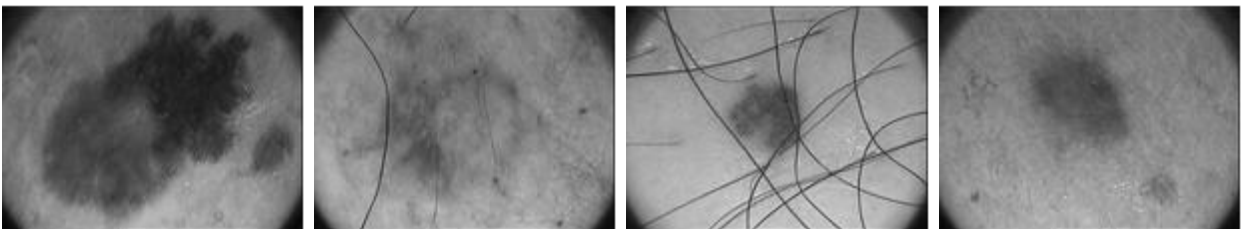


Figura 1 - Imágenes dermatoscópicas. a) Asimetría, red de pigmentos atípica, pigmentación irregular y proyecciones. b) Asimetría, pigmentación irregular, color rosa, proyecciones y regresión. c) Lesión simétrica, glóbulos marrones y puntos negros de distribución regular. d) Patrón homogéneo. Coloración gris azul

Para el análisis de cada una de ellas sigue el mismo procedimiento: Pre-procesamiento, enmascaramiento de pelos y del borde de la imagen, filtrado morfológico, transformación al espacio CIE Lab, determinación de umbrales y segmentación de la lesión.

2.1. Pre procesamiento

La presencia de los pelos se reduce mediante filtros morfológicos; para destacar los elementos que presentan un color oscuro se aplica el operador bottom-hat con un elemento estructurante de dimensión 7x7 en el espacio RGB. Sobre este resultado, se establece un umbral y se consideran los elementos que presentan forma alargada para generar una máscara de los pelos presentes en la imagen. La Figura 2 presenta el resultado de este procesamiento sobre la imagen mostrada en la Fig 1c.

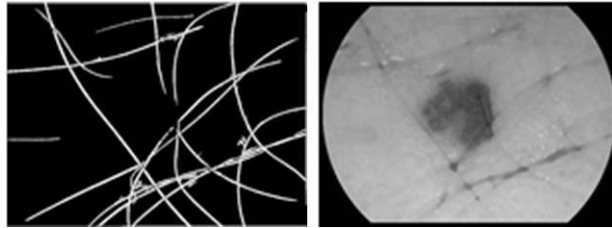


Figura 2 - Detección de pelos y enmascaramiento después de aplicar el filtro morfológico Bottom-Hat.

2.2. Morfología matemática SML

La Morfología Matemática (MM) se fundamenta en la teoría de los retículos completos que se define como un conjunto parcialmente ordenado dotado de un ínfimo y un supremo. Para el análisis de cada píxel de la imagen, se consideran los vecinos delimitados espacialmente por una estructura geométrica de referencia denominada Elemento Estructurante (EE). Para establecer los operadores morfológicos en las imágenes en tonos de gris, los niveles digitales de los píxeles cubiertos por el EE se ordenan naturalmente de acuerdo a su valor, asignando al píxel de salida el menor de ellos en el caso de la erosión, o el máximo en el caso de la dilatación. Estas dos operaciones constituyen los operadores elementales de la MM. En las imágenes multidimensionales, no es posible establecer un orden absoluto de los píxeles-vector por lo que diversos autores han propuesto diferentes esquemas de ordenamiento: marginal, lexicográfico, reducido, parcial, entrelazamiento de bits, Pareto, etc., [2-5]. Dada esta dificultad, se propone en este trabajo utilizar el esquema propuesto por los autores para el ordenamiento de los píxeles-vector que se ha denominado Suma-Máximo-Lexicográfico (SML) [6]. Bajo este esquema de ordenamiento, los píxeles-vector primero se agrupan utilizando como criterio la suma de los valores de sus componentes. Para establecer un orden entre los píxeles-vector que tiene igual suma, sus componentes se ordenan en forma decreciente, y en base a sus valores máximos, se establece el orden entre ellos. Al final, los vectores que mantienen la igualdad se ordenan siguiendo el orden lexicográfico. Una vez desarrollado el algoritmo para ordenar los vectores, se pueden programar los operadores morfológicos.

La Figura 3 resume el esquema de ordenamiento SML en imágenes color; en la Fig. 3a se presentan tres grupos de vectores que poseen el mismo valor promedio. Los que se encuentra mas cerca del origen son menores a los más alejados. En la Fig. 3b se muestra la forma en que son ordenados los vectores para uno de los tres grupos obtenidos con la primera condición; los vectores localizados en el centro del plano son menores a los que se encuentran en su periferia. Los vectores iguales bajo la condición precedente, se ordenan desde el centro de cada segmento

hacia el vértice, la Fig. 3c ilustra esta consideración, los vectores en color azul son inferiores a los de color magenta. Para obtener un orden total, los vectores que aún no han podido ser ordenados se comparan utilizando el orden lexicográfico, asignando la prioridad en la misma secuencia que se presenta cada componente. Una vez establecido un esquema de ordenamiento total entre vectores, se definen los operadores morfológicos elementales: la erosión y la dilatación.

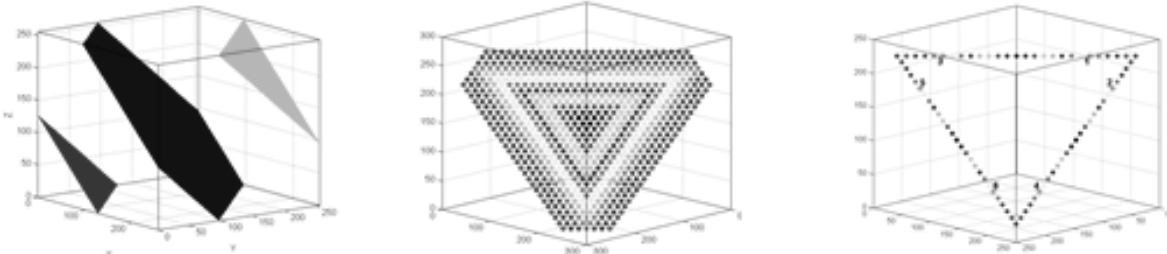


Figura. 3. Ordenamiento vectorial SML, caso 3D. a) ordenamiento por la suma. b) orden por el primer máximo c) orden por el segundo máximo y lexicográfico

2.3. El espacio de colores CIElab

Las imágenes adquiridas por el dermatoscopio están en formato jpeg 24 bits en el espacio RGB (Red, Green, Blue). En este espacio, la alta correlación entre los canales hace difícil separar de manera automática la lesión del resto de la piel, pues no es posible establecer parámetros que caractericen los colores respectivos [7]. Los melanomas típicamente tienen un color marrón a negro, pero también pueden ser rojos y azulados. En 1976, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) introduce el espacio de colores perceptual Lab, formado por una componente de luminancia (L) y dos componentes de crominancia (a , b). Su principal característica es la posibilidad de representar todos los colores visibles y su uniformidad desde el punto de vista de la percepción por el ojo humano.

En el espacio CIELab la componente L corresponde a la luminancia entre negro y blanco; el eje a considera la percepción del verde al rojo, los valores positivos corresponden al rojo y los negativos al verde; la componente b codifica la sensación del azul al amarillo, con valores negativos para el azul y positivos para el amarillo; los tonos de gris corresponden a los valores de L donde $a=b=0$. El análisis de las imágenes disponibles permitió establecer los umbrales característicos para cada uno de los canales L , a y b . En la Fig. 4, se presenta a la derecha el canal L , en el centro el canal a y a la izquierda el canal b , seguidos con sus respectivos histogramas. Se identifica un umbral U_L para el canal L debajo del cual se tienen los colores oscuros característicos de una lesión. Para el canal a se establece un umbral U_a a partir del cual se encuentran las tonalidades rojizas presentes en la lesión, mientras que los valores debajo del umbral U_b del canal b permiten identificar las lesiones con tonos azulados.

2.4. Segmentación

Se procedió al análisis del comportamiento de las imágenes en el espacio CIELab con el fin de establecer los criterios para la segmentación. En particular, en la imagen correspondiente al canal L , las lesiones poseen niveles digitales inferiores a 60, sin embargo no permiten definir con precisión su delimitación. Las imágenes de lesiones donde predomina la coloración rojiza, presentan valores positivos en la componente a , la lesión toma valores superiores a 10; en la

mayor parte de los casos se puede detectar un umbral entre este valor y el máximo del histograma. En el histograma de la componente **a** que se muestra en la Fig. 4, centro, puede observarse este umbral cerca de 8. En estas imágenes, la componente **b** no aporta una característica que facilite la segmentación. Bajo estas condiciones se obtienen los píxeles que destacan la lesión, y mediante diversos filtros morfológicos se conservan los más relevantes. La Figura 5 muestra la máscara obtenida para delimitar la lesión presente en la Fig. 1d y el borde sobre la imagen

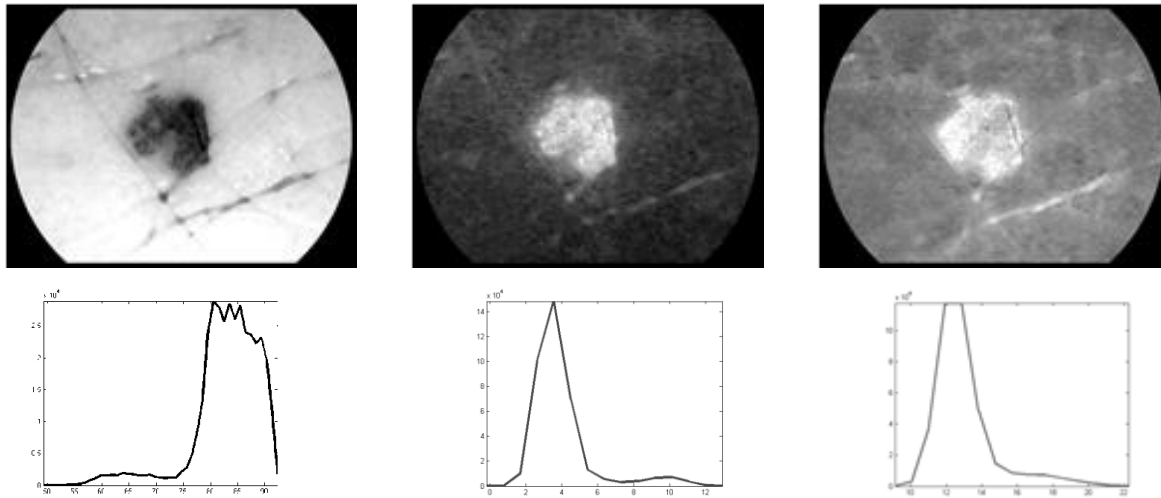


Figura 4. Imágenes de los canales L, a, b y sus histogramas

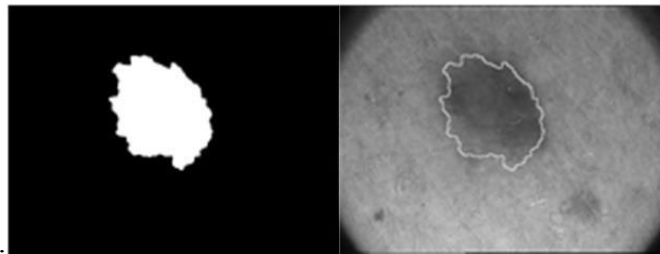


Figura 5 - Segmentación de la imagen en la Fig. 1d

3. RESULTADOS

La Figura 6 muestra la delimitación de la lesión en una serie de imágenes que presentan características diversas, tomadas de una galería de 120 imágenes. Se consiguió que más del 90% de las delimitaciones obtenidas presenta un resultado satisfactorio. La segmentación obtenida constituye el primer paso para el logro de un análisis detallado de la lesión con la finalidad de clasificar las lesiones de acuerdo a su grado de malignidad.

4. CONCLUSIONES

La segmentación automática de las imágenes dermatoscópicas se enfrenta a un grado de complejidad importante por la diversidad de tonalidades presentes en las lesiones, muchas veces semejantes al color de la piel. También, es corriente contar con la presencia de artefactos que

dificultan la tarea, como los pelos, presencia de gel, iluminación no uniforme, etc. Es bien conocido el hecho de que la delimitación de las lesiones realizada por los especialistas dependerá de su experiencia y su capacidad de percibir cambios sutiles en la tonalidad de los colores. Este trabajo introduce un método de segmentación que pretende reducir esta subjetividad.

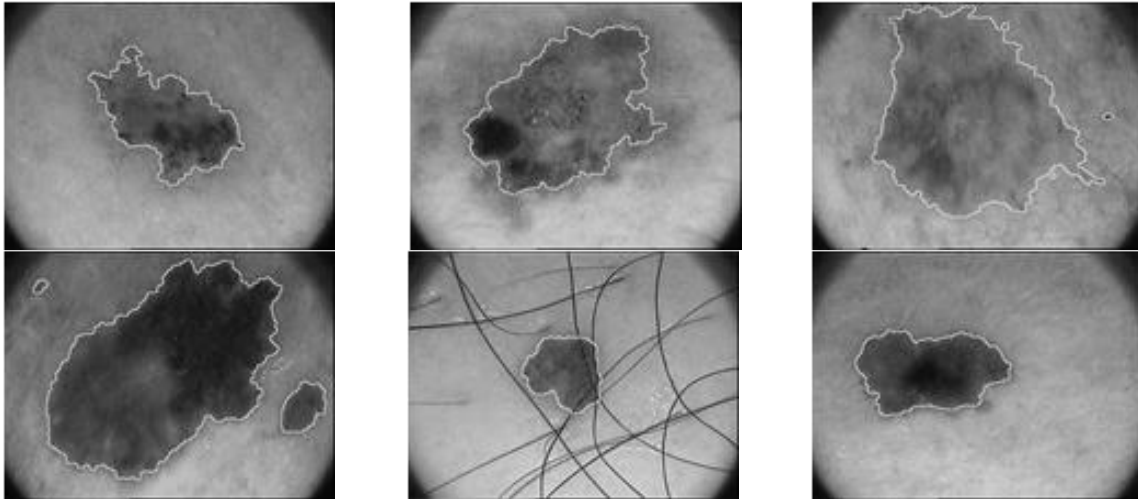


Figura 6. Segmentación de imágenes dermatológicas

REFERENCIAS

- [1]. Menzies, S., K. Crotty, McCarthy, W., Frequency and morphological characteristics of invasive melanomas lacking specific surface microscopic features. *Arch Dermatol*, vol. 10, pp. 1178-82, 1996.
- [2]. Aptoula, E., Lefevre, S. A comparative study on multivariate mathematical morphology. *Pattern Recognition*, 40, pp. 2914-2929, 2007.
- [3]. Aptoula, E., Lefevre, S., On lexico-graphical ordering in multivariate mathematical morphology, *Pattern Recognition Letters* 29, 2, pp. 109-118, 2008.
- [4]. Chanussot, J., Lambert, P., Entrelacement de Bits et "Space Filling Curves": une Extension des Filtrés de Rang aux Images Couleur, GRETSI, Grenoble, 1997.
- [5]. Köppen, M., Nowack, Ch., Rösel, G., Pareto-Morphology for Color Image Processing: A Comparative Study of Multivariate Morphologies, *Pattern Recognition and Image Analysis*, Vol. 10, No. 4, pp. 478-491, 2000.
- [6]. Torres, W., Un Método de Ordenamiento Vectorial para el Análisis de imágenes multidimensionales, II Simposio Científico y Tecnológico en Computación, pp. 40-44, 2012
- [7]. Silva, C., Marcal, A., Pereira, M., Mendonça, T., Rozeira, J., Separability analysis of color clases on dermatoscopic images, *ICIAR*, pp. 268-277, 2012.

TISSUE CLASSIFICATION IN ONCOLOGICAL PET/CT IMAGES

Jhonalbert Aponte

jhonalbert182@hotmail.com

Hospital Oncológico Luis Razetti, Caracas - Venezuela.

David Grande

davidgrandemazo@gmail.com

Centro de Física Molecular y Médica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Caracas – Venezuela.

Wuilian Torres

wtorres@fii.gob.ve

Fundación Instituto de Ingeniería para la Investigación y Desarrollo Tecnológico, Centro de Procesamiento Digital de Imágenes, Altos de Sartenejas, Miranda - Venezuela.

Miguel Martín-Landrove

mglmrtn@yahoo.com

Centro de Física Molecular y Médica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Centro de Visualización Médica, Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela, Sebucán and Centro de Diagnóstico Docente Las Mercedes, Las Mercedes, Caracas - Venezuela.

Abstract. *Oncological PET/CT is a powerful combination of molecular and structural imaging that allows for early full body cancer disease detection and further treatment and disease evolution monitoring. Recently, oncological PET/CT has been proposed in the assessment of image tumor contouring for treatment planning what implies the need for a confident method for image integration or fusion. In the present work, tumor PET/CT images are analyzed by a segmentation method, k-means clustering, combining the information coming from PET images, through the Standardized Uptake Value (SUV), and CT image information, through the CT number or linear attenuation coefficient, allowing for tissue classification and image segmentation. Results are used for Gross Target Volume (GTV) assessment as a guide in medical practice for SUV level selection in image tumor contouring in targeted treatment applications, such as radiation therapy. Also, SUV distributions for different tumor lesions are obtained and used to assess reference values in diagnostic PET/CT.*

Keywords: Oncological PET/CT, k-means, image fusion, tumor contouring, SUV distribution.

1. INTRODUCTION

Positron Emission Tomography (PET) is a diagnostic imaging technique that reveals physiological and chemical processes within the organism. It is essentially based on the detection and measurement of the spatial distribution of an intravenously administered positron emitter radiopharmaceutical and depending upon its pharmacokinetics, it can measure the metabolic activity on tissue. The most commonly used radiopharmaceutical to track down metabolism is Fluorodeoxyglucose or ^{18}F -FDG and for this reason it is used to detect tumor activity. The image registration and fusion of PET with Computed Tomography (CT) or PET/CT gives anatomical as well as molecular information that can be used to assess tumor activity and its spatial localization. In current oncological PET/CT, the leading information is the Standardized Uptake Value [1] or SUV which is a measure of the degree of metabolic activity within the tumor lesion while changes in the linear attenuation coefficient or CT number (CTn) measured in tomographic images are seldom considered. Furthermore, SUV spatial distribution is usually affected by PET low image quality compared to CT and its use for radiotherapy treatment planning should be addressed carefully if the tumor lesion has to be located properly [2, 3]. A reasonable approach is to consider all the information, i.e. SUV and CTn, in equal terms so the final result should depend on specific tissue characteristics and not on the arbitrary combination of PET and CT information separately. In the present work, a balanced approach is proposed that combines in equal terms both the SUV and CTn information in order to classify tissue in tumor lesions. The procedure is carried on by a cluster image segmentation algorithm, k means [4], which allows for the classification of image voxels depending on the proximity of voxel properties (SUV, CTn)

2. MATERIALS AND METHODS

Image acquisition were performed on hybrid PET/CT scanners for which PET and CT images are hardware registered, i.e. PET and CT slices are correlated by the hardware setup of the equipment. Patient movement distorts this correlation and some registration correction has to be done to obtain acceptable images for the purpose of image segmentation and analysis. Only oncological whole body PET/CT studies were used in this work. For each case, axial PET and CT slices that include the tumor lesion were selected and in order to consider only information coming from the patient, and for each axial slice, a mask to define the body contour was applied. Since CT image is the one that exhibits the best spatial resolution, all axial contour masks were generated with this data and applied to the registered PET slices. Registration tuning to correct for patient movement were performed as follows: for the hardware registered images, joint histograms and mutual information [5] were calculated; afterwards small rigid transformations were performed on the registered images to check if the original mutual information, i.e. for hardware registered images, corresponds to a maximum. If that is indeed the case, the 3-dimensional hardware registered image set is accepted for analysis; otherwise it should be transformed to reach a maximum in mutual information. In the present work, only registered images for which the displacement in the rigid transformation was below the voxel size were accepted. This is not a very restrictive condition since patient movement is generally under control in radiotherapy treatment. In Figure 1, joint histograms for different tumor lesions are shown.

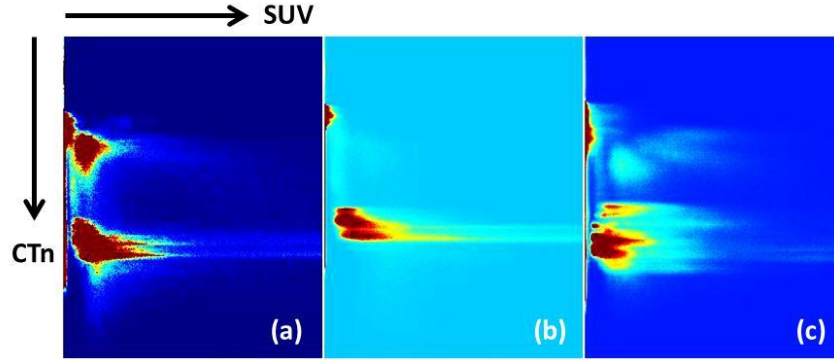


Figure 1- Detail of joint histograms in (SUV, CTn) space for different tumor lesions (a) Lung pleural tumor, (b) Liver metastases and (c) Lung tumor. Notice that image data is clustered around different centroids depending on the tissue properties in the lesion.

Image segmentation of the tumor volume was performed slice by slice by the k-means method. Also known as unsupervised classification, the k-means technique looks for natural groupings in a multidimensional data set by employing a similarity or dissimilarity measure. In clustering, classes are unknown and explored from the data themselves. Clustering divides the data into similar groups, and classification assigns them to one of the already known groups. Clustering can be divided into two main categories: partitioned and hierarchical clustering. Given m samples, each of which may be represented by a d -dimensional feature vector, the aim of the partitioned clustering method is to group the samples into k clusters such that the members of each cluster share similar features [4]. At the end of the k means algorithm each cluster is labeled by a d -dimensional feature vector, which is the average of all the members in the cluster, defined as its centroid.

The k means algorithm used in this work flows according to the following procedure:

1. k 2-dimensional feature vectors or Z_j are created. The components: SUV and CTn are selected randomly within the dynamical ranges of the registered PET and CT images.
2. Each voxel that belongs to the Volume OF Interest (VOI) of the registered PET and CT images is characterized by its 2-dimensional feature vector (SUV, CTn) and assigned to the nearest centroid, according to the following relationship,

$$x \in C_j(k) \text{ if } \|x - Z_j\| < \|x - Z_i\|, \quad \forall i = 1, 2, \dots, k; i \neq j \quad (1)$$

where $C_j(k)$ represents the set of sampled image voxels that cluster around Z_j and $\|\cdot\|$ represents the Euclidean distance.

3. When all the sampled voxels had been assigned, the centroids Z_j are recalculated by,

$$Z_j = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in C_j(k)} x, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

where N_j is the number of samples in $C_j(k)$.

4. Steps 2 to 3 are repeated iteratively until convergence in the centroid positions is attained.

Once tissue classification is attained, image segmentation can take place. For each cluster, the magnitude of the corresponding 2-dimensional centroid is assigned to all the voxels that belong to the same cluster.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Some of the results are shown in Figures 2 and 3. Figures 1 (a) and (b) show the original CT and PET images, respectively. Figure 1(c) shows the segmented image using the magnitude of the centroid for each cluster and the application of the body contour mask. Notice that the structure of the scanner couch at the base of Figure 1(a) is completely missing in Figure 1(c) and (d). Figure 1(d) shows an arbitrary color representation using cold colors to represent normal tissue and hot colors to represent tumor affected tissue.

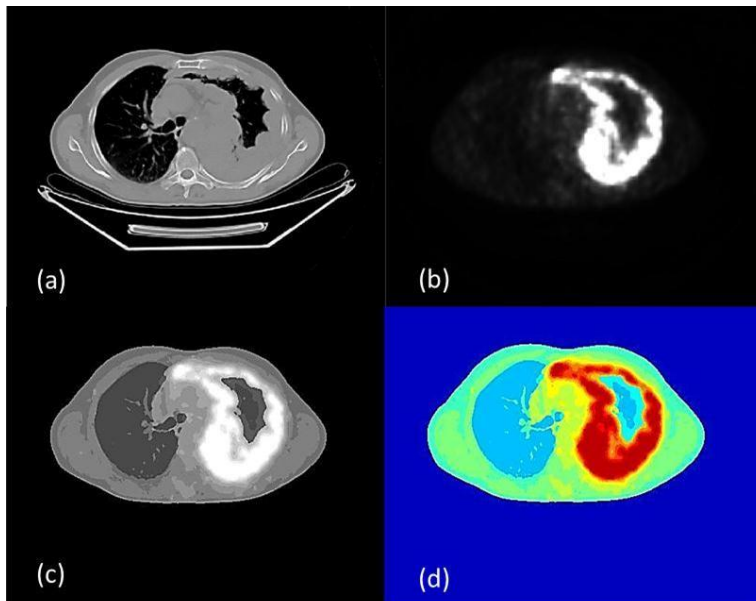


Figure 2- (a) CT image, (b) PET image, (c) image segmentation using the k means algorithm with 15 clusters, gray levels tag different cluster classes; (d) color palette is selected to tag different cluster classes.

In Figure 3, different tumor affected tissue distributions are shown. Notice the heterogeneity of tissue classification, particularly in the immediate neighborhood of image bright areas, i.e. those related to high SUV values characteristic of tumor activity. Even though PET (SUV) is the leading information to determine tumor segmentation, variations in tissue classification introduced by CT modifies in a significant way tumor distribution. In any case, segmented images can be combined with other medical image modalities in order to define an appropriate GTV, and therefore a PTV in radiation therapy. Also, as depicted in Figure 4, SUV distributions and SUV reference values can be obtained at different instances, prior to treatment and during post treatment evaluation of the patient.

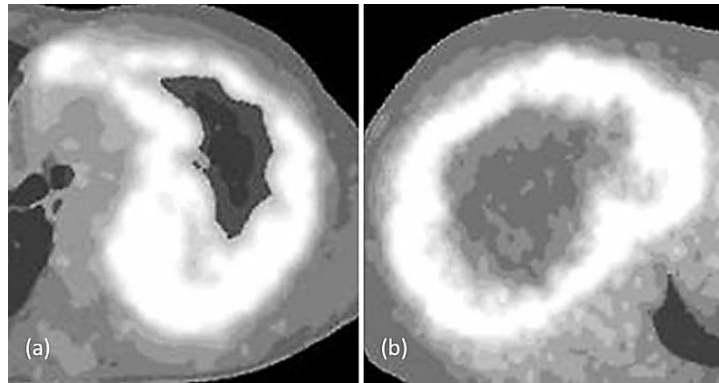


Figure 3- Segmentation results for different tumors, (a) Lung pleural tumor and (b) Liver metastases.

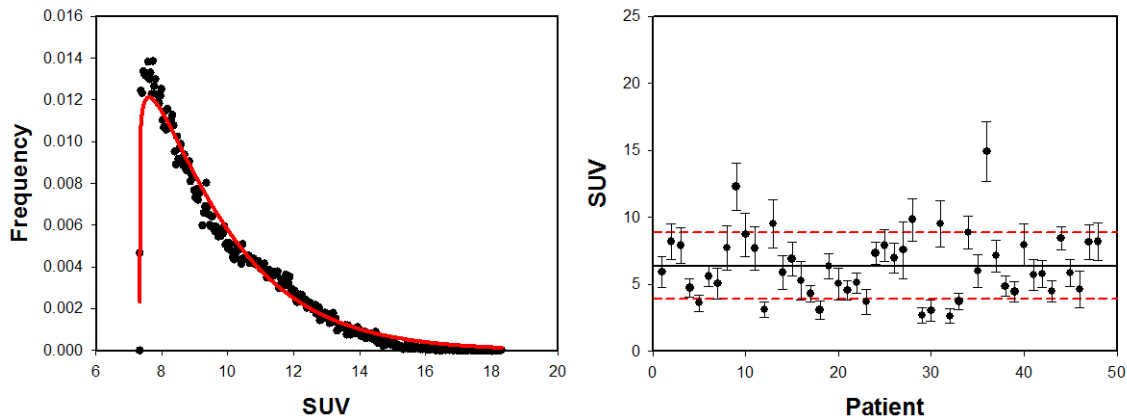


Figure 4- Left, SUV distribution for lung tumor. Right, collected data for lung tumors, SUV average value of 6.38.

4. CONCLUSIONS

A method that combines in equal terms information coming from PET and CT images in oncological PET/CT is presented. The method uses 2-dimensional k means and effectively classifies different tissues in a tumor lesion, allowing for GTV and SUV distribution determination. Also, the proposed method can be used regularly as a tool for SUV quantification in a nuclear medicine facility establishing reference values and statistics. Future work is addressed to image registration refinement to further assess voxel information and tumor lesion delimitation.

Acknowledgements

We would like to thank all the medical and technical staff of Centro de Diagnóstico Docente Las Mercedes, Caracas, for image acquisition and characterization.

REFERENCES

- [1].Lucignani, G., Paganelli, G., & Bombardieri, E., The use of standardized uptake values for assessing FDG uptake with PET in oncology: A clinical perspective. *Nuclear Medicine Communications*, vol. 25, pp. 651-656, 2004.
- [2].Prabhakar, R., Jagadesan, P., & Rath, G.K., An insight into PET-CT based radiotherapy treatment planning. *Cancer Therapy*, vol. 5, pp. 519-524, 2007.
- [3].Paulino, A.C., & Johnstone, P.A., FDG-PET in radiotherapy treatment planning: Pandora's box?. *International Journal of Radiation Oncology*Biology*Physics*, vol. 59, pp. 4-5, 2004.
- [4].Demirkaya, O., Hakan, O., & Sahoo, P., Image Processing with Matlab Application in Medicine and Biology, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2009.
- [5].Wells, W.M. III, Viola, P., Atsumi, H., Nakajima, S., & Kikinis, R., Multi-modal volume registration by maximization of mutual information. *Medical Image Analysis*, vol. 1, n. 1, pp. 35-51, 1996.

DETERMINACIÓN POR MEDIO DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y REDES NEURONALES ARTIFICIALES DE LA CALIDAD DEL HIERRO REDUCIDO PARA FABRICAR BRIQUETAS

Maldonado, José Luciano

maldonaj@ula.ve

Instituto de Estadística Aplicada y Computación, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad de Los Andes, Av. Las Américas, Núcleo La Liria. Mérida – Venezuela

Lobo, Eladio

ELOBO@orinoco-iron.com

Orinoco Iron SCS, Puerto Ordaz, Estado Bolívar – Venezuela

Cueto Luis

luis.angrand@gmail.com

Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes
Av. Alberto Carnevalli, Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez. Mérida - Venezuela

Resumen. *En la empresa Orinoco Iron SCS, la calidad físico-química del mineral de hierro reducido, materia prima para la fabricación de briquetas de hierro, es analizada de manera manual. En este proceso de análisis intervienen diferentes técnicos con equipos especializados, sin embargo, ingenieros de la empresa han considerado la posibilidad de realizar este análisis, de manera alternativa, recurriendo a la tecnología constituida por la visión artificial. En este trabajo se realizaron pruebas de procesamiento y clasificación de imágenes de muestras de mineral de hierro reducido como una forma preliminar de contribuir al desarrollo del futuro sistema que se plantea la mencionada empresa. El proceso llevado a cabo consistió en un procedimiento propio, que comprende un pre-procesamiento que aísla la imagen del mineral dentro de las fotografías. Posteriormente, se construyeron diversos clasificadores para detectar cuándo una muestra es de alto contenido metálico y cuándo es de bajo contenido metálico. Las características extraídas de las imágenes para construir los reconocedores fueron obtenidas de dos formas: por medio del uso de razones de píxeles y con los histogramas de las intensidades de los píxeles. Con estos dos tipos de características se desarrollaron los clasificadores, un tipo basado en comparaciones de vectores de características por medio de la métrica euclidiana; y otro tipo basado en los histogramas de las intensidades y en redes neuronales artificiales. Con el primer tipo de clasificador se obtuvo hasta el 93% de acierto en la clasificación, mientras que con el segundo tipo se obtuvo 100% de acierto tanto con los patrones de validación como con los de entrenamiento, en la mayoría de los casos.*

Palabras claves: Briquetas de Hierro, Mineral de Hierro Reducido, Redes Neuronales artificiales, Sistemas de Visión Artificial.

1. INTRODUCCIÓN

En Orinoco Iron SCS se han planteado minimizar las fallas en la fabricación de las briquetas, en cuanto a la calidad físico-química. Para ello se requiere la ejecución de una serie de estudios preliminares. Entre esos estudios se encuentra la revisión de la calidad de la materia prima que se utiliza en la producción de briquetas, recurriendo a tecnologías basadas en inteligencia artificial [1-2].

Con respecto a esta situación, en el trabajo desarrollado se planteó el análisis del mineral de hierro reducido (MHR) a través del procesamiento de imágenes fotográficas de muestras de ese mineral.

2. MINERAL DE HIERRO REDUCIDO Y DATOS UTILIZADOS

Los minerales de hierro, dependiendo de sus orígenes geológicos, difieren en el contenido de óxidos de hierro, contenido en ganga y su mineralogía [3]. Estas diferencias le dan una apariencia física distinta a cada tipo de mineral; dentro de estos atributos está el color. Ferrominera del Orinoco, proveedor de este mineral, identifica algunos de sus diferentes tipos considerando su color, por ejemplo, Finos Negros y Finos Marrones [3-4].

En la fig. 1 se presentan muestras de finos marrones y finos negros de mineral de hierro, es de estos finos que se obtiene el MHR.



Figura 1- Finos Negros y Finos Marrones [4]

Mineral de hierro preparado: Es el mineral suministrado por Ferrominera y una vez que llega a Orinoco Iron SCS, es tratado para clasificar el tamaño de los sólidos. Luego se transporta hacia el proceso de reducción (Área de reactores) [4].

Mineral de Hierro Reducido (MHR): Es el mineral que finalmente se convierte en briquetas, después de haber pasado una serie de fases del proceso de reducción directa FINMET® [4], para extraer del mineral preparado el hierro metálico que es el objetivo de ese proceso.

Base de datos utilizada: El conjunto de datos estuvo conformado por 354 fotografías o imágenes en formato JPEG con una resolución 4000x3000 píxeles.

Bajo el criterio de ingenieros de Orinoco Iron SCS, la base de datos comprende 321 fotografías con imágenes de MHR con alto contenido metálico y 33 con bajo contenido metálico.

En este estudio, al conjunto de fotografías que mostraban alto contenido metálico se le denominó *conjunto de mineral bueno*, mientras que al de bajo contenido metálico se le denominó *conjunto de mineral malo*, para efectos de facilitar la identificación de cuándo se hacía uso de uno u otro tipo de fotografía o muestra de mineral.

Relación entre las fotografías de las muestras y su composición química: Las fotografías corresponden a muestras de MHR que previamente fueron sometidas en el laboratorio de la empresa a un análisis químico, y son los resultados de dicho análisis los que permiten hacer la comparación y constituir los conjuntos de alto y bajo contenido metálico. Por otro lado, en cuanto a lo que se puede observar en las fotografías, la tendencia general del mineral es la siguiente: más negro en la fotografía, significa que el contenido metálico es menor y más blanco en la fotografía, significa que el contenido metálico, presente en la muestra, es mayor [1-4].

3. PRE-PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DE MHR

A continuación se describen las operaciones de pre-procesamiento más importantes.

Aislar la región de interés: Para aislar la muestra de MHR dentro de la fotografía, se cumplieron varios pasos generales:

Paso 1: Las fotografías, que originalmente estaban disponibles en la escala de color, se transformaron a escala de grises. La razón de esta transformación es que las fotografías originales contienen, básicamente, los colores blanco, negro y diferentes niveles de gris [5].

Paso 2: Se utilizó un filtro simple, el cual consistió en asignar el valor 255 a cada pixel cuya intensidad estuviese fuera del rango (10, 75), para eliminar imperfecciones de las imágenes, tales como salpicaduras de MHR fuera de la región de interés y las sombras [5-7].

Paso 3: Se eliminaron los objetos más pequeños, es decir, se realizó un filtrado de objetos, lo que permitió conservar sólo los de mayor área [5-7].

Realzar las muestras contenidas en las regiones de interés: Debido a que el área de interés no es perfectamente rectangular fue necesario realizar varios cortes para que la imagen contuviera solo MHR, y no porciones de la bandeja sobre la cual se encontraba el mineral. Para ello, se redujo el objeto a 280 de largo por 80 pixeles de ancho, a partir de su centro. Estas dimensiones fueron seleccionadas producto de la observación y de la experimentación con una considerable cantidad de fotografías. La imagen del MHR resultante fue descompuesta en los tres planos o canales de color RGB [5-7], y se sumaron produciendo áreas de interés como las de la fig. 2.

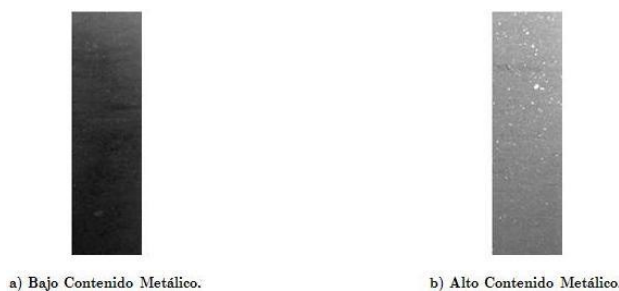


Figura 2-Áreas de Interés de varias Muestras de MHR.

4. DESCRIPCIÓN DE EXPERIMENTOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se describen las pruebas de clasificación que se realizaron.

Esquema general de las pruebas realizadas: La idea general que se planteó para resolver el problema constó de dos pasos.

Paso 1: Debido a que las muestras del *conjunto de mineral bueno* presentaban un color más claro que las muestras del *conjunto de mineral malo*, se planteó la idea de contar el número de píxeles blancos, negros y grises, presentes en las muestras, como un primer criterio de clasificación. Se analizó todo el conjunto de muestras con bajo contenido metálico y se extrajeron vectores de características, a partir de los cuales se produjo un vector de características promedio para el conjunto de mineral malo. Se realizó el mismo procedimiento para el conjunto de mineral bueno.

Paso 2: Una vez que se dispuso del vector promedio de características, para cada grupo de muestras, se crearon dos tipos de clasificadores; el primero consistía en una simple comparación, en base a la distancia euclidiana, entre el vector de características obtenido para una muestra de MHR cualquiera con respecto a los vectores promedios de características de los dos conjuntos de MHR; el segundo clasificador consistía en una red neuronal artificial que se entrenó con los histogramas de los niveles de grises de las muestras de MHR.

Características utilizadas para realizar la clasificación de las muestras: Las características empleadas para clasificar las imágenes fueron P_N , P_B y P_G (las razones de las cantidades de píxeles de color negro, blanco y gris y la cantidad total de píxeles presentes en una muestra MHR), L_1 (la distancia desde el eje de las ordenadas hasta el punto, sobre el eje de las abscisas, donde el histograma de los niveles de gris de la muestra inicia una tendencia creciente), L_2 (la distancia desde el eje de las ordenadas hasta el punto, sobre el eje de las abscisas, donde el histograma de los niveles de gris de la muestra finaliza una tendencia decreciente) y L_3 (el nivel de gris con mayores cantidades de píxeles, es decir, el pico más alto que alcanza el histograma). Para obtener las razones P_N , P_B y P_G se definieron rangos asociados a los niveles de grises que indicaban a qué categoría pertenecía el píxel que se analizaba.

Clasificación en base a la razón de píxeles: Una vez obtenidos los valores de las características de cada clase, se calculó la media de la razón de los píxeles de cada característica para cada grupo de muestras (*conjunto de mineral malo y bueno*); luego, estos valores se compararon con los valores individuales de cada grupo.

Se probaron varios rangos de niveles de grises por experimentación, eligiéndose aquellos que proporcionaron mejores resultados en un conjunto de pruebas preliminares de clasificación.

En la tabla 1 se especifican los rangos que fueron utilizados al momento de realizar esta prueba.

Tabla 1. Rangos que fueron utilizados al trabajar con la razón de píxeles

Píxeles	Rango 1	Rango 2	Rango 3
Negro	0 – 35	0 – 50	0 – 84
Gris	36 – 150	51 – 180	85 – 170
Blanco	151 – 255	181 – 255	171 – 255

El rango 1 fue elegido al azar, el rango 2 fue elegido en base a la observación de los histogramas de las muestras y el rango 3 es la distribución uniforme, es decir, le fue asignada, a cada característica, un tercio de la escala de grises.

Clasificación en base a la Razón de Píxeles y a las medias de las distancias L_1 y L_2 : Se calcularon las medias \bar{L}_1 y \bar{L}_2 para cada grupo de muestras, lo que permitió definir nuevos rangos para los píxeles negros, grises y blancos, que fueron utilizados para calcular de una forma alternativa los valores de P_N , P_G y P_B . Lo que se pretendía con esta prueba era definir de mejor manera los rangos para píxeles considerados como negros, grises y blancos.

Clasificación en base a la Razón de Píxeles y a las medias de las distancias L_1 , L_2 y L_3 : Para esta prueba se amplió el vector de características, el cual estaba ahora constituido por seis parámetros. Lo que se buscaba con esta prueba era averiguar si se mejoraban los resultados obtenidos hasta ese momento.

Clasificación en base a una Red Neuronal Artificial: Como al manipular los histogramas de los valores de grises del MHR se observó un comportamiento característico en las intensidades de los píxeles para cada clase, se consideró la posibilidad de utilizar una red neuronal artificial para discriminar los dos tipos de gráficos. El tipo de red neuronal artificial que se utilizó, fue una red perceptrónica multicapa, constituida por tres capas con entrenamiento supervisado [8-10]. Se trabajó con 2 neuronas en la capa de salida, una para identificar las muestras con alto contenido metálico y la otra para identificar las muestras con bajo contenido metálico.

Resultados obtenidos con la clasificación en base a la Razón de Píxeles: Para esta prueba se utilizaron las 321 muestras del *conjunto de mineral bueno* y 33 muestras del *conjunto de mineral malo*, trabajando sobre los rangos de niveles de gris descritos en la tabla 1. La clasificación de las muestras de MHR, trabajando con los Rango 1 y 2 produjo 93% de acierto. Mientras que el rango 3 produjo el 91% de acierto.

Resultados obtenidos en la clasificación en base a las Razones de Píxeles y a las medias de las distancias L_1 , L_2 y L_3 : Los resultados obtenidos en este tipo de prueba no fueron favorables, en el sentido de que el porcentaje de acierto estuvo, en la mayoría de los casos, muy por debajo de los resultados obtenidos en la clasificación que no toma en cuenta a L_1 , L_2 y L_3 . Sólo en un caso muy restringido se obtuvo un 92% de acierto.

Resultados utilizando la Red Neuronal Artificial: Se encontró un amplio conjunto de parámetros con los cuales se obtuvo 100% de acierto tanto con los patrones de validación como de entrenamiento.

5. CONCLUSIONES

No existe una metodología documentada para analizar, por medio de procesamiento de imágenes fotográficas, la calidad del MHR para producir briquetas.

La clasificación en base a la proporción de píxeles negros, blancos y grises, aunque produjo algunos resultados aceptables presenta también serias deficiencias.

Hay muestras de MHR que, según los ingenieros de Orinoco Iron SCS, se consideran de alto contenido metálico pero que fácilmente pueden ser confundidas con muestras de bajo contenido metálico, y viceversa. Esto se puso en evidencia al superponer los histogramas de las escalas de grises de ambos tipos de muestras.

Las redes neuronales artificiales se constituyen como una excelente tecnología para construir el sistema de visión artificial que busca Orinoco Iron SCS.

El uso de los histogramas de las intensidades de los píxeles es de muy alto valor en el

procesamiento de imágenes de MHR.

REFERENCIAS

- [1] Ortiz J., Discriminación de Briquetas de Hierro a través de Fotografía: Un Estudio Comparativo entre los Modelos Ocultos de Markov y el Análisis Discriminante, tesis de Maestría en Estadística, ULA, Venezuela, 2011.
- [2] Borrero A., Prueba robusta de extracción de características para identificar condiciones físicas de briquetas de hierro por medio de fotografías. Proyecto de grado. Ingeniero de Sistemas. ULA, Venezuela, 2012.
- [3] Mujica, N., Evaluación de la calidad de las briquetas vs. los parámetros de operación de las máquinas briqueteadoras. Tesis de grado, Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José De Sucre, Ciudad Guayana, 2004.
- [4] Orinoco Iron SCS. Disponible en <http://www.orinoco-iron.com/>. Consultado en Diciembre 2012.
- [5] Matlab Image Processing Toolbox-User's Guide, 2011.
- [6] McAndrew A., An introduction to digital image processing with Matlab. Disponible en: <http://visl.technion.ac.il/>. Consultado en Junio 2012.
- [7] Papasaika-Hanusch H. Image digital processing with Matlab. Disponible en: es.escribd.com/. Consultado en Junio 2012.
- [8] Izaurieta F., Redes neuronales artificiales. Technical Report, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2012.
- [9] Maldonado J., Una aplicación de las redes neurales artificiales al reconocimiento de vocales pronunciadas en español. Tesis de grado, Magister Magister Scientiea en Ingeniería de Control, Universidad de Los Andes, 1993.
- [10] Mejías S., El perceptrón multicapa. Disponible en: catarina.udlap.mx/. Consultado en Junio 2012.

ESTADÍSTICO DE SEPARABILIDAD EN SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES IVUS

Anthony D. Cho

adcho@uc.edu.ve

Universidad de Carabobo, Bárbula, Carabobo-Venezuela

Resumen. *Los métodos para detección de bordes han sido ampliamente estudiado en las imágenes sin ruido, permitiendo resaltar dichos atributos sin ningún problema. En las imágenes que contienen ruidos, los métodos clásicos fallan generalmente. Para estos se han diseñado varias estrategias para detectar los bordes; en esta investigación estudiaremos el método estadístico de separabilidad para extraer los bordes de un objeto en una imagen y se harán comparaciones en varias perspectivas de ángulos de rotación sobre dicho método.*

Palabras clave: Detección de bordes, estadístico de separabilidad, imágenes de ultrasonido intravascular.

1 Introduction

El ultrasonido intravascular (*IVUS*) es una modalidad de imagen médica empleada para analizar la estructura interna del vaso sanguíneo y visualizar la pared interna de la misma. Las imágenes de las arterias coronarias son las más frecuentes en *IVUS*, permitiendo identificar la dimensión del flujo sanguíneo y la placa aterosclerótica. Dicha placa es generada por la acumulación de sustancias lipídicas en las paredes de las arterias. A pesar de ser un método invasivo, es una de las mejores técnicas para evaluar el estado de las paredes de las arterias. Los métodos de segmentación tradicionales no proporcionan buenos resultados debido a la sensibilidad inducida por el ruido presente en las imágenes *IVUS*.

Alshennawy et al. [5] definen un método basado en estrategia de razonamiento usando lógica difusa para la detección de bordes en imágenes digitales sin la necesidad de determinar un umbral o usar un algoritmo de entrenamiento. El método consiste en segmentar la imagen en regiones usando una matriz de tamaño 3×3 y un sistema de inferencia difusa directa que mapea un rango de valores distintos entre ellos dentro la matriz para detectar el borde. Este trabajo no se probó con imágenes médicas, pero los resultados para la detección de bordes son satisfactorios usando funciones de pertenencia (*membership functions*). Dicha función es una representación matemática del grado de pertenencia de un valor x a un conjunto difuso A .

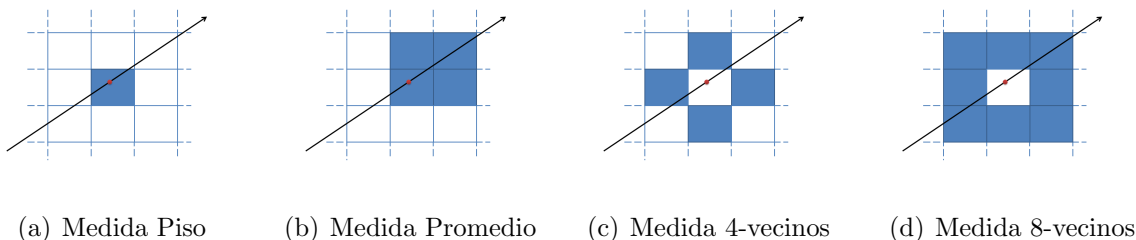


Figura 1: Tipos de medidas

Otros trabajos, Kubota et al. [2], Shen et al. [3], Takanori et al. [4]. hacen el uso del método estadístico de separabilidad en las imágenes de ultrasonidos para la detección de bordes, el cual consiste en definir dos regiones que pueda limitar el borde, así como lo muestra en la Fig. 3a.

Los artículos mencionados [2, 3, 4] aplican el método estadístico de separabilidad en un solo ángulo de orientación. Dado que los bordes no tiene una forma bien definida, hace que la detección de los bordes usando un solo ángulo no describa de forma muy eficiente. En este trabajo se pretende mejorar y comparar los resultados para la detección de bordes usando más ángulos de orientación, para ser más específico, 3 y 4 ángulos de orientación que son: $0 - 45 - 135$ y $0 - 45 - 90 - 135$, respectivamente.

2 Definición de las medidas

En esta sección se definen algunas medidas que son de utilidad para la transformación de la vista polar a vista cartesiana que se mencionará en el siguiente sección. Tales medidas son: **Medida Piso**: hace el uso del operador de truncamiento $\lfloor x \rfloor$, donde x es un valor real, sobre cada elemento de un par ordenada (x, y) , retornando el valor de densidad la posición resultante del truncamiento. Así como lo muestra en la Fig. 1a. **Medida Promedio**: consiste en calcular el promedio de los valores de densidad usando los operadores de redondeo: correcto y truncamiento; sobre cada elemento de un par ordenado (x, y) . Haciendo las referencias de las celdas como aparece en la Fig. 1b. **Medida 4-vecinos**: calcula el promedio entre los vecinos: superior, inferior, izquierdo y derecho; de un píxel x como lo ilustra en la Fig. 1c. **Medida 8-vecinos**: determina el promedio de los vecinos alrededor de un píxel en una vecindad de 3×3 tal como lo presenta en la Fig. 1d.

3 Transformación vista polar a vista cartesiana

Esta sección describe la aplicación de una transformación a la imagen *IVUS*, el cual consideramos como una representación en vista polar, a una imagen en vista cartesiana. Así como lo muestra en la Fig. 2.

En la transformación hacemos el uso de una de las medidas que se mencionó en la sección anterior. Ya que es necesario hacer una correspondencia del valor de densidad entre la imagen *IVUS* (fig 2-izquierda) y la imagen en vista cartesiana (fig 2-derecha) debido a la discretización del radio desde centro del catéter hacia el extremo del vaso sanguíneo. La imagen resultante tiene como dominio el ángulo de recorrida de $0-360$ grados y el rango es el radio de la imagen *IVUS*.

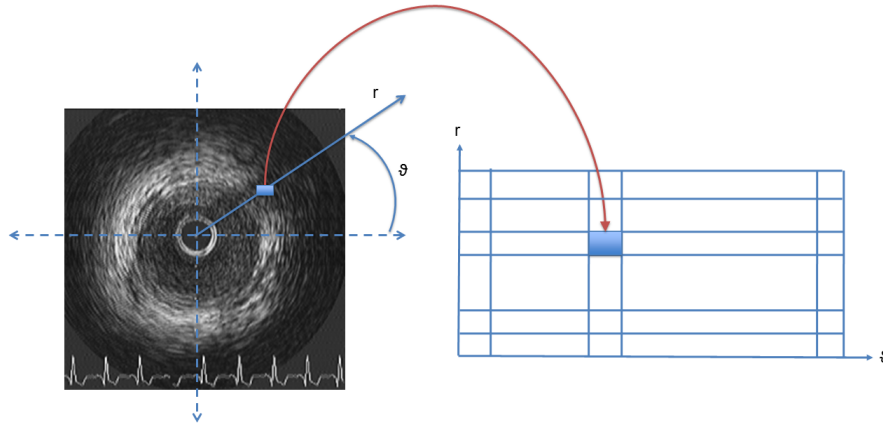


Figura 2: Esquema de transformación de vista polar a vista cartesiana

4 Filtrado de separabilidad estadístico

El método de separabilidad estadístico consiste en definir un borde no como un punto donde la intensidad cambia, sino como una región de frontera donde la intensidad de una imagen en una región local son separables, así como lo muestra en la Fig. 3a.

4.1 Definición de separabilidad

Visualizando la Fig. 3a, una región local de tamaño $Mw \times Mh$ está conformado por dos regiones más pequeñas que lo denominan como región 1 y región 2. La separabilidad η puede ser calculada por medio del análisis de discriminante lineal usando la información de las regiones 1 y 2. Las fórmulas vinculadas al método son las siguientes:

$$\eta = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_T^2}; \quad \sigma_b^2 = n_1(\bar{P}_1 - \bar{P})^2 + n_2(\bar{P}_2 - \bar{P})^2; \quad \sigma_T^2 = \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \quad (1)$$

Donde P_i es una intensidad de la imagen en el píxel i . \bar{P}_1 y \bar{P}_2 son los promedios de las intensidades de la imagen en las regiones 1 y 2, respectivamente. \bar{P} es el promedio de las intensidades para la región local combinada; n_1 y n_2 son los números de píxeles en la región 1 y 2, respectivamente. N es el número de píxeles en la región combinada ($n_1 + n_2$). Cuando σ_T^2 es menor a una constante σ_L^2 se define $\eta = 0$, dicha constante σ_L^2 se conoce como constante de umbral para la extracción de borde.

4.2 Características de la separabilidad

Por la definición de separabilidad, en la Fig. 3b muestra la caracterización de algunas curvas con sus valores de separabilidad η . Mientras η sea mas cercano a 1, mayor posibilidad de que el píxel pertenezca a un borde.

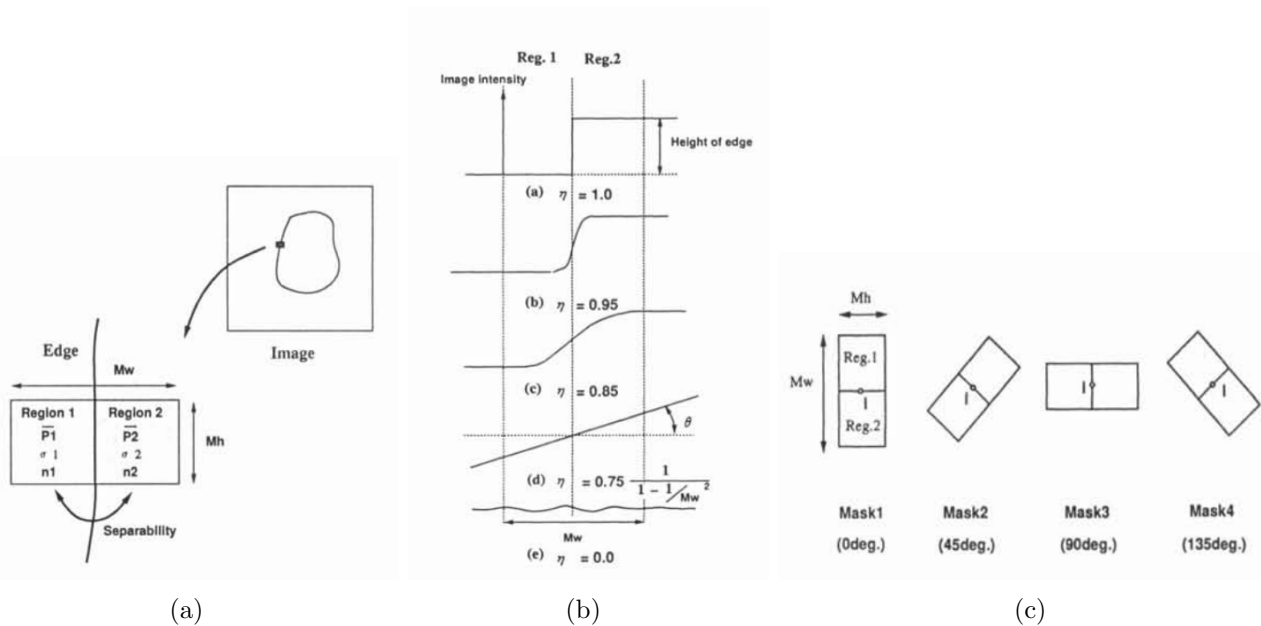


Figura 3: a) Región de separabilidad, b) características de separabilidad y c) rotaciones de las máscaras - Fuente extraída de Kazuhiro Fukui [1]

4.3 Tamaño de las regiones

La escogencia del tamaño de la región no es única ya que el usuario tiene la libertad de definir los parámetros de la dimensión de dicha región. Debido a la característica del método de separabilidad podemos limitar los parámetros de la región tal que $Mh \ll Mw$, esta condición puede proporcionar mejora en el resultado por efecto de los ángulos de rotación.

4.4 Algoritmo de extracción de borde

El trabajo presente hace una variación del enfoque de los artículos [2, 3, 4] adicionando otros ángulos de perspectivas, ya que dichos artículos se enfocan en un solo ángulo. Por esto, se pretende mejorar la detección de los bordes y comparar los valores de η para cada ángulo.

Para extraer el borde de una imagen dada en un píxel i , se usan un conjunto de máscaras diferentes, así como lo muestra en la Fig. 3c. El cual consiste de cuatro máscaras ordenadas desde el ángulo 0 hasta el ángulo 135 y el tamaño de las dos mascarar es $Mw \times Mh$. Los principales pasos para la extracción son las siguientes: 1) Fijar los cuatro mascarar en el píxel i ; 2) Calculamos para cada máscara usando las ecuaciones 1; 3) Determinamos la intensidad y la dirección de un borde por la máscara que contenga mayor valor de η entre los cuatro máscarar y 4) Movemos las máscarar al próximo píxel.

5 Resultados y conclusión

Durante el proceso para la obtención de los resultados, es necesario considerar fijar los parámetros como: tipo de medida y tamaño de la mascarar para el método de separabilidad estadístico. En la prueba se consideró el tamaño de la mascarar de $Mw = 60$ y $Mh = 3$ y se hizo corrida usando todas

las medidas definidas en la sección 2 que luego son comparadas entre ellas, después seleccionar el mejor de las estrategias. Entre los resultados de las aplicaciones, tenemos:

5.1 Aplicación de la transformación de vista polar a vista cartesiana usando las medidas

Presentaremos un *frame* aplicando cada una de las medidas definidas en la sección 2, Fig. 4.

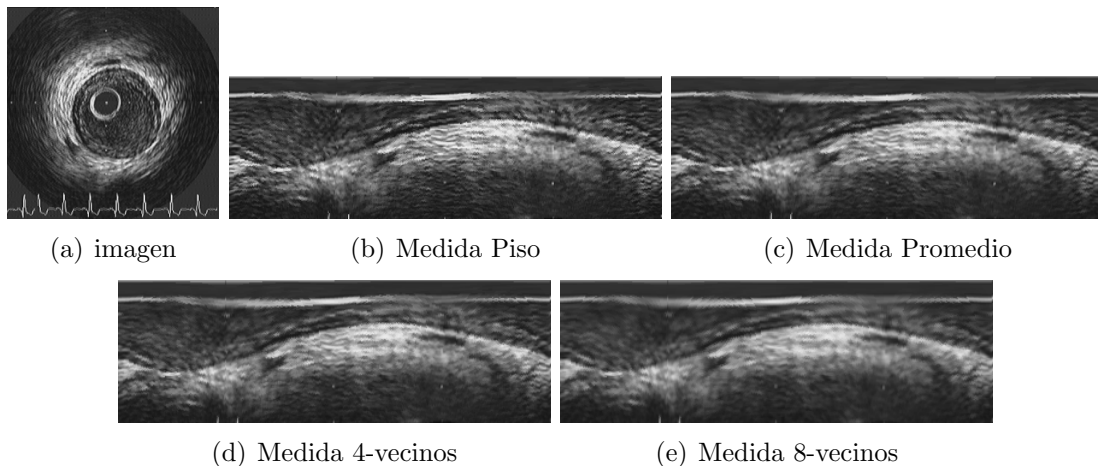


Figura 4: Vista cartesiana

En las imágenes resultantes podemos notar que en la Fig. 4 desde a) hasta e) , las imágenes tiende a suavizar más el ruido presente en la imagen *IVUS*.

5.2 Aplicación del filtro de separabilidad estadístico

Usaremos el filtro de separabilidad estadístico en las imágenes en vista cartesiana de la Fig. 4.

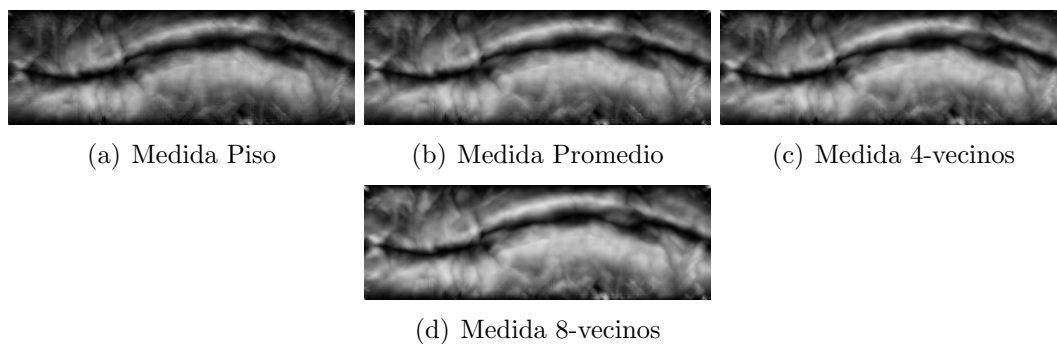


Figura 5: Aplicacion de separabilidad con ángulos: 0-45-135 a las imágenes de la Fig. 4

Por la característica del filtro de separabilidad estadístico, los píxeles con mayor valor de densidad son candidatos a formar parte de un borde.

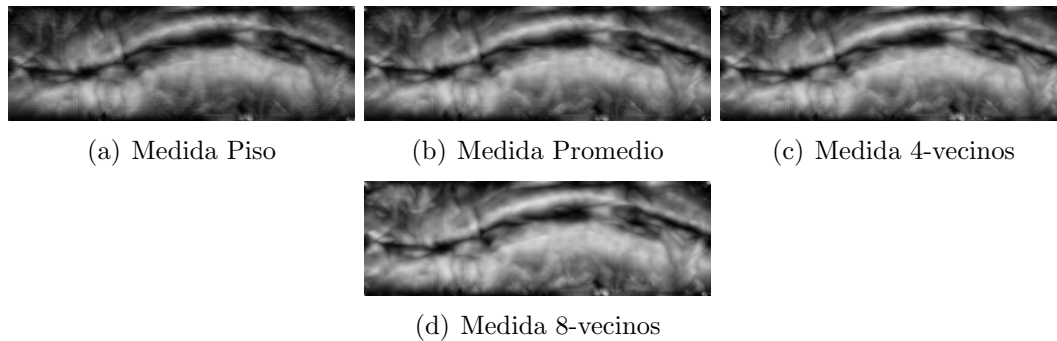


Figura 6: Aplicacion de separabilidad con ángulos: 0-45-90-135 a las imágenes de la Fig. 4

Analizando las imágenes de Fig. 5 y Fig. 6; podemos percatar que usando la transformación con la medida 8-vecinos y luego el filtro de separabilidad estadístico con 4 ángulos realzan más los bordes. Dado que la estrategia usada en esta investigación no depende de la intervención de algún usuario para la aplicación de la metodología, se puede establecer futuros trabajos como: reconstruir las paredes del vaso sanguíneo, determinar aproximadamente el espesor entre las paredes y otras; con la finalidad de asistir al experto en su diagnóstico.

REFERENCIAS

- [1] KAZUHIRO FUKUI. Edge Extraction Method Based on Separability of Image Features. *In Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, MVA 1994, December 13-15, 1994, Kawasaki, Japan. pages 391-396, (1994).
- [2] RYOSUKE KUBOTA, SHOHEI ICHIYAMA, NORIAKI SUETAKE, EIJI UCHINO, GENTA HASHIMOTO, TAKAFUMI HIRO, & MASUNORI MATSUZAKI. *Fuzzy rule-based boundary extraction of plaque in intravascular ultrasound image*. IMECS 08, Volume I, March 19 - 21, 2008, Hong Kong, Lecture Notes in Engineering and Computer Science, pages 597-600.
- [3] SHEN LIU, JIANGUO WEI, BO FENG, WENHUAN LU, DENBY, B., QIANG FANG, & JIANWU DANG. *An anisotropic diffusion filter for reducing speckle noise of ultrasound images based on separability*, APSIPA ASC, 2012 Asia-Pacific , vol., no., pp.1,4, 3-6 Dec. 2012
- [4] TAKANORI KOGA, EIJI UCHINO, NORIAKI SUETAKE, GENTA HASHIMOTO, TAKAFUMI HIRO, & MASUNORI MATSUZAKI. 2008. *Edge-preserved smoothing method with special reference to intravascular ultrasound image using anisotropic diffusion filter controlled by weighted separability measure*. In Proceedings of the 7th conference on CSECS'08, WSEAS, Stevens Point, Wisconsin, USA, 87-92.
- [5] A A ALSHENNAWY & A A ALY. *Edge detection in digital images using fuzzy logic technique*. Engineering and Technology, 51(March):185-193, 2009.

PREDICTION OF ATTENUATION BY RAIN IN SATELLITE LINKS OPERATING IN THE BAND KA FOR THE CLIMATIC CONDITIONS OF VENEZUELA

Vásquez F. Mardelinis

Pérez G. Nelsón

mardelinis@gmail.com

perezgn@ula.ve

School of Engineering, Nucleus of Anzoátegui, UDO.

Avenue Algimiro Gabaldon, Puerto la Cruz Anzoátegui.

Coordination of Postgraduate course, School of Engineering, University of the Andes

Av. Alberto Carnevalli, UN Pedro Rincón Gutiérrez, Building(Edifice) B., La Hechicera, Merida

Abstract. *Rain attenuation by not only influences the intensity of signal power, but also introduces a lot of noise in the satellite link, further degrading the quality of the signal that is received, especially in those who operate above the 10GHz. In the country, there are no sufficient records of decay measurement, allowing making adjustments in the design of satellite systems, suited to our climate. This work aims to compare different models that provide rates of precipitation data from the National Weather Service, as they are: the model of Chebil (1999), the Model Rice-Holmberg (1973) and model of the ITU (rec. ITU-R P. 618-10 2009). For which it simulates the behavior of these models to the climate of Venezuela, then, with these results the maps are built of rain for our climate. These precipitation data are entered in the calculation by rain attenuation, simulating the behavior of the attenuation due to rain with the support of computational tools. The results of these simulations are tabulated and compared the different; in this way determine which is the most suitable for the climate of Venezuela.*

Key words: satellite communication, rain attenuation, rain fall rate, Prediction Models, Ka band.

1. INTRODUCTION

Atmospheric effects play an important role in the design of the satellite links that operate at frequencies above 10 GHz. The rain drops absorb and disperse the radio waves, which leads to the signal attenuation and reduction in the availability and reliability of the system [1]. An empirical methodology for the prediction of rain attenuation by requires rainfall rate of 1 min of integration time, which is almost nil in Venezuela. The objective of this work is to provide additional tools to the designers of the satellite system, in the form of contour maps of intensity

of rain attenuation and by rain, for the design of satellite systems in Venezuela. Now that Venezuela has recently launched two communications satellites, known as Venesat1 or "Simon Bolivar" and the "Miranda" that can operate in the C-band, L, Ku and Ka. The tools of this work will be used for the preliminary design of the microwave links via satellite.

2. MODELS OF CONVERSION OF RAINFALL RATE.

In 1973 Rice and P. N. Holmberg [1], developed a mathematical model for the empirical calculation of the statistics accumulated time of rains point in the United States. The integration time on more useful for the calculation of such rates, is the order of 1 min. In this model is extrapolated many precipitation data of short duration, for providing this type of statistics from data on a regular basis by the National Weather Service. For the 8766 hours in an average year, and a random place in any part of the world, you can use the model to calculate the fraction of time during which the rates of precipitation average t-minutes exceeded for any given value. For this model the probability that a rainfall rate, R [mm/hr], with an integration time of one minute:

$$P_{(r>R)} = \frac{M}{87.66} [0.03\beta^{-0.03R} + 0.2(1 - \beta)(e^{-0.258R} + 1.86e^{-1.63R})]. \quad (1)$$

$$\beta_0 = 0.03 + 0.97e^{-5(-0.004M_m)} \quad (2)$$

$$\beta = \beta_0 [0.25 + 2e^{-0.35(1+0.125M)/U}]. \quad (3)$$

In 1999 J. Chebil and T. A. Rahman [2], created a model that describes a method for the conversion of rainfall rate and model Moupfouma [3] refined to determine the statistics of the types of rain in 1 min in 82 localities in the region of peninsular Malaysia. This model is useful for applying it in those places where there were no available statistics of storms. This model, is described by the equation:

$$R_{0.01} = \alpha M^\beta \quad (4)$$

The parameters α and β are the retrogression coefficients: $\alpha = 12.2903$ and $\beta = 0.2973$. Finally, the recommendation of the UIT Rec-R P.837-5 [4], "Information of spread and methods of prediction necessary for the systems design of telecommunication Earth - space", it contains maps of obtained meteorological parameters using the database of analysis ERA-40 of the European Center of Meteorological Prediction in Average Term (CEPMPM).

3. PRECIPITATION RATE CONTOUR MAPS.

In the development of the contour maps has been used the Moupfouma model together with the model using Matlab Chebil [5]. In the case of the Rice model -Holmberg, has been used or parameters, the number of storms per year, mm, the maximum monthly rain in the period and M is the mean annual accumulation, for percentages P of 0.01 %. This model does not account with the necessary data to perform the contour curves, due to the weather stations are not well distributed in the national territory. In the case of the model of the ITU involves the use of a database of parameters (PR6, M, and M,), available at the site of the ITU Group 3M Web [5], each of which corresponds to an entry (latitude, longitude). The commands in MATLAB, associated with the model, are available on the Web site of the group of 3M of the ITU. The use

of these scripts, the calculation of the cumulative distribution function for the intensity of rain is simple. The process was for percentages P of 0.01 % (Figure 02) and 0.1 % (Figure 03).

Table 01. The INAMETH weather stations, for the implementation of the models of J. Chebil, Rice-Holmberg and ITU

STATION	STATE	LAT (°)	LON(°)
S. FERNANDO ATABAPO	AMAZONAS	4,0	-67,7
SABANA DE UCHIRE	ANZOATEGUI	10,0	-65,5
EL NULA	APURE	7,3	-71,9
CALDERAS	BARINAS	8,9	-70,4
URIMAN	BOLIVAR	5,4	-62,6
TORO NEGRO	GUARICO	8,4	-66,2
LAS MESAS	MERIDA	8,9	-70,6
CAUCAGUA	MIRANDA	10,3	-66,4
CACHIPO	MONAGAS	9,9	-63,1
HACIENDA GUACHE	PORTUGUESA	9,4	-69,4
BAJO NEGRO VIEJITO	SUCRE	10,2	-64,3
PUENTE SALOM	TACHIRA	7,6	-72,2
LA PEDREGOSA	TRUJILLO	9,7	-70,7
BOGSI	ZULIA	9,3	-73,0

Table 2. Comparison of the values obtained for R0.01 with the models of Chebil, Rice-Holmberg and ITU, all in mm/h.

STATION	CHEBIL MODEL	RICE HOLMBERG MODEL	UIT MODEL
S. FERNANDO ATABAPO	132,1	86,0668	92,1
SABANA DE UCHIRE	101,9	78,1748	72,1
EL NULA	130,6	77,7507	70,9
CALDERAS	128,7	73,8795	81,8
URIMAN	146,4	112,9311	95,0
TORO NEGRO	102,3	39,5508	68,1
LAS MESAS	124,1	72,7161	82,4
CAUCAGUA	119,0	50,1884	81,4
CACHIPO	129,5	51,8374	87,9
HACIENDA GUACHE	112,5	46,6481	79,3
BAJO NEGRO VIEJITO	123,9	70,006	72,4
PUENTE SALOM	131,5	78,6213	69,0
LA PEDREGOSA	114,5	42,1797	78,2
BOGSI	148,3	107,1929	70,9

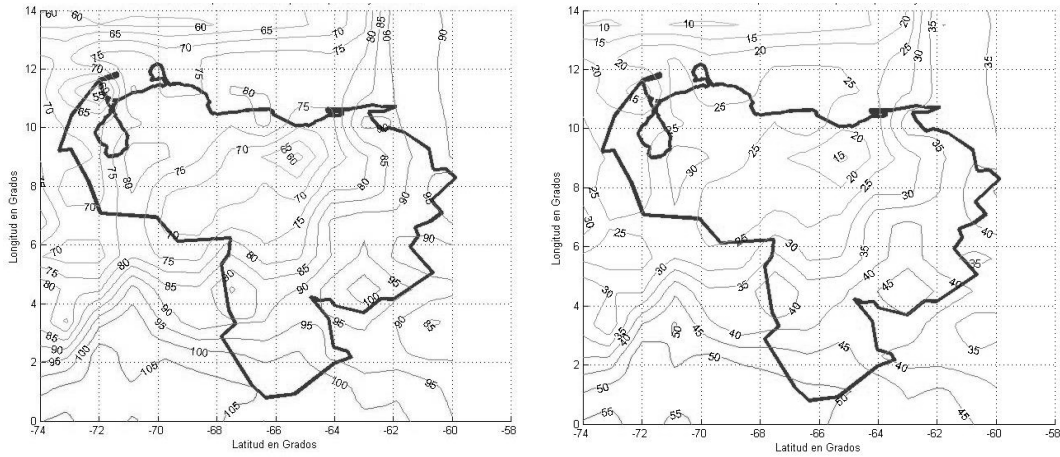


Figure 1. Contour Map of rain for a time percentages of 0.01 % and 0.1 % using the Recommendation ITU-R P. 837-5

4. CONTOUR MAPS OF RAIN ATTENUATION BY APPLYING THE MODEL.

Implementation of the ITU P. 618-10 model [6] consists of three steps: first is the calculation of the specific attenuation [7], in second place, the calculation of the height of the rain [8]. Which is to design a program in Matlab for plotting the contours and also the map of Venezuela, using coordinates in the database of the NASA. The contour maps of attenuation were developed for the Ka-band in order to cope with the challenges of active today in the rapid growth of broadband networks by satellite. The Ka-band will allow a higher data rate of return of link. In order to develop the rain attenuation for percentages of time P of 0.001 % (Figure 05), 0.01 % (Figure 06), 0.1 % (Figure 07) and 1% (Figure 08), the rainfall rate from each contour line is applied to the model of rain attenuation of the ITU in relation to the altitude and the latitude of each station [9].

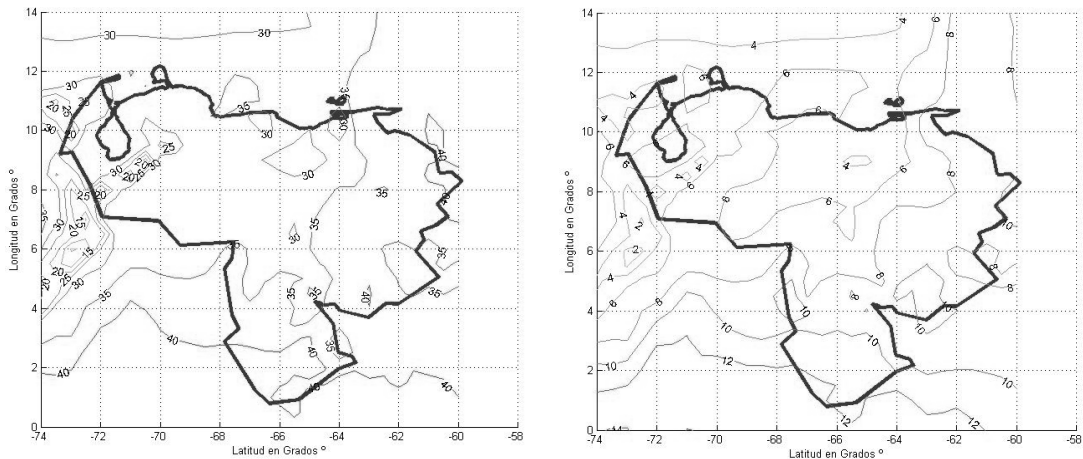


Figure 2. Contour map by rain attenuation [dB] for P 0.01 % and 0.1 % using the Recommendation ITU-R P. 618-10.

Other parameters that are used to draw maps are; operating frequency: 19.45 GHz for the Ka-band, and the orbital position of satellite: 78° W, which corresponds to the satellite "Simon Bolivar" or (VENESAT1).

Table 3. Comparison of the values obtained for rain attenuation by ITU for the model, for the values of R0.01, obtained with the models of Chebil, Rice-Holmberg and ITU, in dB.

STATION	ALTITUDE (msnm)	CHEBIL MODEL	RICE HOLMBERG MODEL	UIT MODEL
S. FERNANDO ATABAPO	112,0	51,2899	36,8507	38,8685
SABANA DE UCHIRE	247,0	40,0568	32,5492	30,5244
EL NULA	250,0	48,2871	32,2822	29,9968
CALDERAS	855,0	42,2522	27,2831	29,6037
URIMAN	372,0	53,4572	43,8585	38,3498
TORO NEGRO	88,0	42,9876	20,0895	31,2726
LAS MESAS	1366,0	37,0011	24,1453	26,717
CAUCAGUA	80,0	46,2472	23,3818	34,4703
CACHIPO	30,0	51,6511	25,2145	38,3892
HACIENDA GUACHE	255,0	44,1764	21,948	33,6519
BAJO NEGRO VIEJITO	230,0	47,309	30,3254	31,1439
PUENTE SALOM	475,0	47,4178	31,7871	28,6543
LA PEDREGOSA	101,0	45,2429	20,4317	33,6673
BOGSI	110,0	56,6811	44,3728	32,1665

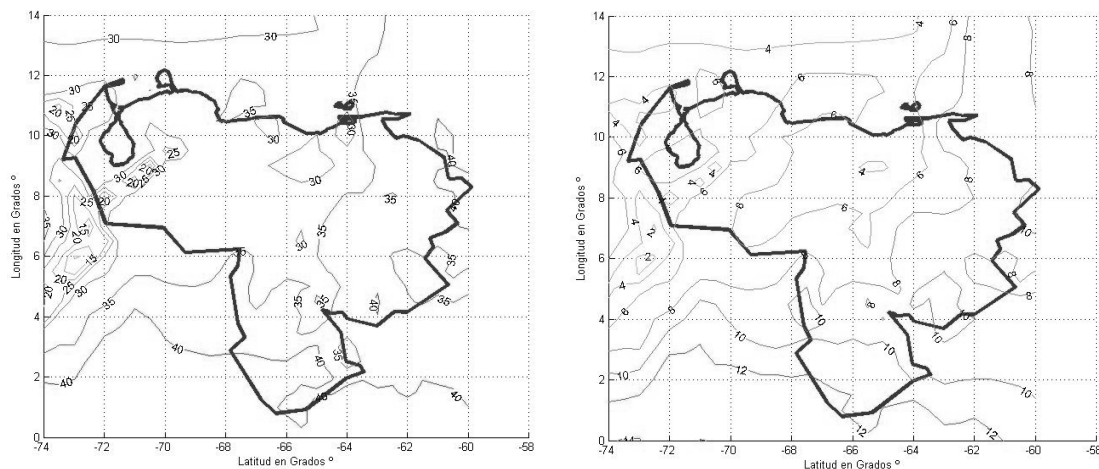


Figure 2. Contour map by rain attenuation [dB] for P 0.01 % and 0.1 %

5. CONCLUSION

You can develop the contour maps for both intensity of rain, and rain attenuation, for various percentages of time using several models, but always with the support of the recommendations, ITU-R Rec. P. 837-5, 839-3 and P. P. 618-10. The information in these maps will be useful in the

preliminary design for the terrestrial microwave links and satellite earth in Venezuela, as well ensures not underestimate or overestimate the phenomenon of the rain. The results obtained in this work, in order to obtain contour maps for a minute of time integration using the model of the ITU, show that are comparable to other values obtained by other methods, with some differences. No comparisons were made with measured values, for the moment, due to the lack of measurement the integration time required in weather stations.

ACKNOWLEDGMENTS

It is grateful to the management staff of the Hydrometeorological Networks INAMETH, for his contribution in the development of this work, as are the meteorological data.

REFERENCIAS

- [1] P. Rice and N. Holmberg, "Cumulative Time Statistics of Surface-Point Rainfall Rates," *IEEE Trans. Commun.* COM-21, 1973, pp. 1131-1136.
- [2] J. Chebil, and T. A. Rahman, "Development of 1 min Rain Rate Contour Maps for Microwave Applications in Malaysia Peninsula," *Electronics Letts*, 35, 1999 pp. 1712-1774.
- [3] F. Moupfouma, and L. Martin "Modelling of the rainfall rate cumulative distribution for the design of satellite and terrestrial communication systems," *Int. J. of Satellite Comm.* 13(2), 1995, pp. 105-115.
- [4] ITU-R, "Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling," *Recommendation, ITU-R P.837-5, ITU-R P Sers.*, Int. Telecomm. Union, Geneva Switzerland. 2007.
- [5] L.D Emiliani., J. Agudelo, E. Gutierrez, J. Restrepo, and. C. Fradique-Mendez, "Development of rain-attenuation and rain-rate maps for satellite system design in the Ku and Ka bands in Colombia," *IEEE Antenna and Propag. Mag.* 46(6), 2004, pp. 54-68.
- [6] ITU-R. Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunications Systems," *Recommendation P.618-11, ITU-R P Sers.*, Int. Telecomm. Union, Geneva. 2013.
- [7] E. J Dutton, "Microwave Terrestrial Link Rain .Attenuation Prediction Parameter Analysis," *US Department of Communications, National Telecommunications and Information Administration (STIA) Tech. Rep.* 1984, pp. 84-148.
- [8] ITU-R., "Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods," *Recommendation P.838-3, 2, ITU-R P Sers.*, Int. Telecomm. Union, Geneva, 2005.
- [9] G.O. Ajayi., S.Feng, S.M. Radicella, and B.M Reddy (Eds), *Handbook on Radiopropagation Related to Satellite communications in Tropical and Subtropical Countries.* ICTP, Trieste, Italy. 1996, Pp7-14

RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS DE SOFTWARE MEDIANTE BÚSQUEDA TABÚ Y OPTIMIZACIÓN POR COLONIA DE HORMIGAS

Nelson Ramirez

Dahyana Nimo

Jhon Amaya

Mary Bernal

nelson.ramirez@unet.edu.ve

dnimo@unet.edu.ve

jedgar@unet.edu.ve

mbernal@unet.edu.ve

Decanato de Docencia, Universidad Nacional Experimental del Táchira

Av. Universidad, Paramillo, San Cristóbal-Venezuela

Resumen. *En esta investigación se planteó buscar una solución al problema de planificación de proyectos de software mediante la implementación de dos metaheurísticas con memoria: Búsqueda Tabú (TS) y Optimización por Colonia de Hormigas (ACO), probadas tanto para reducción de costos como reducción de tiempo sobre los mismos casos de prueba, buscando determinar mediante una comparación general si habían o no diferencias significativas entre los algoritmos empleados en cada uno de estas investigaciones. Los algoritmos desarrollados permitieron además la formulación de una estrategia híbrida de acuerdo con la configuración de los parámetros que arrojaron los mejores resultados generales para los casos de prueba, referidos al número de iteraciones, tamaño de la lista tabú y número máximo de iteraciones para la Búsqueda Tabú, y número de iteraciones, número de hormigas en la colonia y tasa de evaporación de feromonas para la optimización por Colonia de Hormigas, respectivamente. De acuerdo con la evaluación de los resultados a través de pruebas no paramétricas, se concluyó que los mejores valores fueron obtenidos a través de la estrategia de optimización por Colonia de Hormigas, para todos los casos de prueba tanto para reducción de costos como reducción de tiempo. Asimismo, la búsqueda tabú arrojó mejores resultados que los obtenidos a partir de metaheurísticas sin memoria, demostrando para ambos casos la efectividad de las estrategias con memoria para el problema en cuestión.*

Palabras clave: Planificación de proyectos de software, metaheurísticas, búsqueda tabú, optimización por colonia de hormigas.

1. INTRODUCCION

El uso de metaheurísticas como estrategias de solución a problemas de optimización combinatoria (COP), es una marcada tendencia actual [1] en cuanto al mejoramiento de métodos de búsqueda que permiten encontrar una solución considerablemente buena entre un gran universo de soluciones con un tiempo computacional razonable.

La planificación de proyectos de software (PSPS), es un problema en el que se intenta determinar la correcta asignación de desarrolladores a tareas, de acuerdo con las capacidades requeridas para cumplir con los objetivos propuestos en un lapso de tiempo determinado, por lo que puede ser representado como un COP, específicamente de planificación, por la gran cantidad de soluciones factibles que pueden existir para un proyecto. En esta investigación, se aborda este problema de acuerdo con el modelo establecido por [2], ofreciendo las soluciones correspondientes a través de la búsqueda tabú y la optimización por colonia de hormigas.

En una investigación previa, los autores realizaron la implementación con diversos parámetros de un algoritmo genético, búsqueda de vecindad variable, recocido simulado y posteriormente un algoritmo memético ---es decir, metaheurísticas sin memoria--- bajo un enfoque mono-objetivo para reducción de: tiempo simple, tiempo asignando los desarrolladores específicos, y costos; cuyo funcionamiento fue evaluado sobre un conjunto de 18 escenarios de prueba, con diversas variables, diseñados a partir de proyectos de software reales de empresas del estado Táchira, Venezuela, con miras a evaluar posteriormente el progreso de las planificaciones creadas.

2. PROBLEMA DE PLANIFICACION DE PROYECTOS DE SOFTWARE

La planificación de proyectos de software, es una tarea realizada por el gerente de proyectos quien debe decidir a quién asignar a cada una de las actividades necesarias para realizar dicho proyecto [3]. Actualmente, es una de las actividades más importantes para los gerentes de esta área, puesto que en gran medida, de ello depende el éxito o fracaso de cualquier proyecto. Dicho de otra manera, la asignación correcta de personas a las tareas, tomando en cuenta sus habilidades, disponibilidad y el costo que representan para el proyecto, es una labor sobre la que recae en gran parte la responsabilidad de la culminación exitosa del proyecto.

La esencia de dicho problema de planificación, consiste en evaluar las distintas maneras en las que pueden ser asignados los desarrolladores a las tareas que componen el proyecto, por lo que se puede abordar como un problema de optimización combinatoria [4], pues para un mismo proyecto pueden existir múltiples planificaciones posibles, las cuales tienen asociadas una duración estimada de desarrollo y un costo respectivamente.

En tal sentido, la cantidad de posibles soluciones al problema se incrementa en proporción directa a la cantidad de tareas y desarrolladores de un proyecto, lo que representa un problema de mayor complejidad para el gerente de proyectos, ya que resulta más difícil la labor de buscar en dicho espacio y encontrar la mejor combinación de tareas/desarrolladores para dicho proyecto, o al menos una buena.

A largo plazo, esta limitación puede ocasionar retrasos en la planificación de proyectos y por ende en su posterior desarrollo, ya que la experiencia dice que un proyecto promedio gasta 80% de su tiempo en la reelaboración, donde se corrigen los errores cometidos en etapas anteriores del proceso [5].

3. METAHEURISTICAS

Las metaheurísticas implementadas en esta investigación, corresponden a las metaheurísticas enmarcadas bajo una clasificación que las define como Metaheurísticas con memoria [6], como lo son la Búsqueda Tabú y Colonia de Hormigas, con miras a realizar una comparación respecto al rendimiento de estas estrategias con otras investigaciones como la realizada por Nimo y Amaya [2], en la cual se realizó la búsqueda de soluciones mediante el empleo de metaheurísticas sin memoria: Algoritmos Genéticos, Recocido Simulado y Búsqueda con Vecindad Variable.

3.1 Búsqueda Tabú

La búsqueda Tabú, es un mecanismo de búsqueda que se distingue de otras estrategias porque usa una estructura de memoria basada en una lista tabú y en mecanismos de selección del siguiente movimiento [6]. Es una lista enlazada, donde se registran las más recientes soluciones o atributos de soluciones que no deben ser tomadas en cuenta en fases posteriores de la búsqueda. De acuerdo con los criterios de una investigación dicha lista puede contener: soluciones visitadas recientemente, movimientos realizados recientemente o atributos de las soluciones visitadas, buscando que la búsqueda no procese soluciones ya visitadas; mejorando los resultados del algoritmo al permitirle explorar otras posibles soluciones.

La búsqueda tabú implementada en esta investigación, está guiada por una búsqueda tabú que opera en el espacio de soluciones, generando una solución aleatoria en un vecindario distinto, implementado de esta forma el concepto de diversificación. Sin embargo, a medida que se evalúa una nueva solución, se lleva a cabo una exploración a través de su estructura de vecindades mediante un mecanismo de búsqueda basado en la estrategia VNS, el cual busca garantizar en cierto modo la intensificación, ya que el algoritmo original no se enfoca en tal aspecto. Dicho mecanismo también hace uso de una lista tabú, al igual que el método principal, para así evitar la revisión de soluciones visitadas anteriormente.

3.2 Optimización por Colonia de Hormigas

El algoritmo ACO (Ant Colony Optimization) tiene su fuente de inspiración en el comportamiento que tienen las hormigas reales para buscar el trayecto entre su colonia y la fuente de alimento [1]. Cuando una hormiga realiza su recorrido, se mueve sin una guía que le indique el trayecto a seguir, por lo que va depositando a lo largo de su camino un rastro de una sustancia química llamada feromona, la cual funciona como un “sistema de comunicación” para toda la colonia, pues transmite información que es percibida por el resto de las hormigas que también están recorriendo ese espacio [1]. Dichos rastros tienden a evaporarse conforme pasa el tiempo, por lo que los caminos menos frecuentados resultan menos relevantes con respecto a los demás, reduciendo así la cantidad de posibles trayectos, permitiendo encontrar el camino más corto para movilizarse hasta la fuente de abastecimiento.

El algoritmo ACO simula este comportamiento haciendo uso de hormigas artificiales (agentes) que recorren el grafo que representa al problema en cuestión. La feromona depositada son valores asociados a las aristas del grafo, influyendo éstos directamente en la probabilidad con la que una hormiga escoge el siguiente nodo a visitar para continuar su camino. En esta investigación se utilizó como espacio de soluciones un grafo dirigido ponderado, separado representativamente en niveles. Cada uno de estos niveles se atribuye a una tarea en particular, de esta forma los nodos pertenecientes a cada nivel representan a los desarrolladores candidatos para llevar a cabo dicha tarea, por lo que estos nodos se etiquetan con un par ordenado de números enteros que identifican la relación tarea-desarrollador. Por su

parte, las aristas que conforman el grafo, están limitadas solamente a conectar los nodos de un nivel con los del nivel superior, de esta forma el recorrido que realiza una hormiga a través del grafo, consiste en construir la solución seleccionando un nodo por cada nivel siguiendo la secuencia hasta completar la totalidad de las tareas (niveles).

4. METODOLOGIA

Talbi [7] propone una metodología aplicada a la optimización de modelos orientados a metaheurísticas, cuyas fases sirvieron de guía para el desarrollo de las actividades que corresponden a esta investigación, las cuales consisten en: Formulación del problema, Modelado del problema, Optimización del problema e Implementación de la solución a partir de las cuales se explicará el desarrollo de los objetivos establecidos.

5. DESARROLLO

5.1 Formulación del problema

La formulación del problema partió de las premisas establecidas en la investigación de Nimo y Amaya [2], en la que se indica que en un proyecto de software, es el gerente del proyecto (GP) quien se encarga de llevar a cabo la planificación, referida a administrar los recursos del proyecto (desarrolladores, analistas, etc.) decidiendo quién será asignado a cuál tarea. Esta asignación se realiza siempre tomando en cuenta que se desea disminuir tanto la duración como el costo de desarrollo implícito, generando así distintos escenarios.

Cada proyecto está compuesto por un conjunto de tareas, las cuales poseen un orden lógico de precedencia para poder ser ejecutadas; permitiendo abordar proyectos con tareas que se pueden realizar de forma paralela o secuencial. En esta investigación se asume que las actividades de un proyecto solo pueden ser ejecutadas de una misma forma, por lo que no abarca los efectos de ejecutarla de una manera u otra. Además, cada una de estas tareas requiere de una o más habilidades así como de una persona para poder ser concretada. Éstas a su vez poseen individualmente un conjunto de habilidades específicas, perciben un salario y tienen un grado de dedicación máxima para las actividades a realizar.

Para tal efecto, es requerida toda la información relacionada al equipo de desarrollo, como lo son las habilidades de cada persona, su sueldo y disponibilidad; así como también lo referente al cada una de las tareas que componen el proyecto, donde es necesario conocer: su duración, que puede ser indicada en unidades de tiempo o en puntos de complejidad (Kniberg, 2007), las habilidades que demanda para ser realizada y la relación de precedencia que posee con respecto al resto de tareas.

5.2 Modelado del problema

El modelado del problema se encuentra disponible en [2], en donde se describen las variables involucradas en el proceso y las restricciones que existen entre ellas, de acuerdo con lo establecido en la formulación del problema.

5.3 Optimización del problema

La optimización del problema se llevó a cabo incluyendo en el modelo la estimación de esfuerzo a través de puntos de función, con posterior equivalencia a unidades de tiempo para efectos de permitir la inclusión de proyectos de software cuyo esfuerzo haya sido estimado a través de técnicas como el Poker Planning [8].

5.4 Implementación de la Solución

El funcionamiento de las estrategias desarrolladas: búsqueda tabú y optimización por colonia de hormigas, fue probado en un conjunto de 18 casos de prueba calificados como proyectos de software pequeños, medianos o grandes de acuerdo con la escala indicada en la Tabla 1. Dichos casos de prueba fueron establecidos con base en la información ofrecida por Caniatech [9], reconocida empresa de desarrollo de software del Estado Táchira, Venezuela. Para cada caso de prueba se estableció el número de tareas y las habilidades requeridas por cada una de ellas, y el número de desarrolladores y las habilidades que cada uno de ellos posee respectivamente, simulando distintos escenarios de proyectos de software. Es importante acotar que los casos de prueba utilizados en esta investigación son los mismos propuestos en [2] para efectos de realizar una comparación equitativa.

Tabla 1. Clasificación de los Proyectos de Software

Tipo	Descripción
Pequeño	Menos de 65 puntos de complejidad
Mediano	Entre 65 y 110 puntos de complejidad
Grande	Más de 110 puntos de complejidad

6. RESULTADOS

Para efectos de evaluar el rendimiento de cada una de las estrategias desarrolladas, se establecieron distintas versiones de cada una de ellas con base en las posibles configuraciones de sus parámetros; en el caso de la búsqueda Tabú: el número de iteraciones, tamaño de la lista Tabú y número máximo de iteraciones sin mejora, y en el caso de la Colonia de Hormigas: número de iteraciones, el número de hormigas en la colonia y la tasa de evaporación de feromonas.

Cada versión de cada algoritmo se ejecutó 30 veces para todos los escenarios de prueba. Los datos obtenidos fueron procesados a través del análisis de los valores medios de las ejecuciones y la realización de pruebas no paramétricas, que permitieron comparar posteriormente con las versiones de cada algoritmo y el SA, VNS y GA presentados por [2] tal como se indica en el diagrama de caja y bigotes de la Figura 1 que muestra la comparación general de los métodos estudiados con función objetivo: reducción de tiempo.

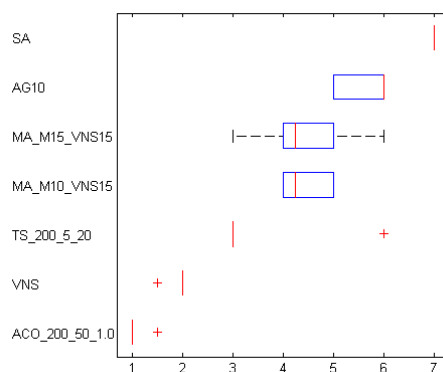


Figura 1. Diagrama de Cajas y Bigotes: Comparación General de metaheurísticas para proyectos Pequeños (Reducción de Tiempo)

A partir de la Figura 1 se puede indicar que:

- La búsqueda Tabú que arrojó los mejores resultados para todos los proyectos en general fue configurada con 200 iteraciones, 20 iteraciones sin mejora y 5% del tamaño del universo de soluciones como tamaño de la lista tabú.
- Los parámetros de la versión de Colonia de Hormigas con mejor rendimiento fueron 200 iteraciones, 50 hormigas en la exploración y una tasa de evaporación de 0.4% (ACO_200_50_0.4).
- Los mejores valores obtenidos para todos los tipos de proyectos fueron los de la estrategia de Colonia de Hormigas, pues hubo diferencia significativa con respecto a todos los demás algoritmos de la comparación.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

De acuerdo con los resultados obtenidos las metaheurísticas con memoria, tienden a generar mejores resultados que los obtenidos con estrategias sin memoria para el caso del SPSP. Para efectos de futuras investigaciones resulta conveniente realizar pruebas con otros tipos de proyectos de software para evaluar el rendimiento de las metaheurísticas desarrolladas, así como también formular nuevas versiones de las mismas sensibilizando otros tipos de parámetros que puedan modificar su comportamiento.

REFERENCIAS

- [1]. Melián, B., Moreno Pérez, J. A., & Moreno Vega, J. M., Metaheurísticas : una visión global. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*. 19, pp 7–28, 2003.
- [2]. Nimo, D., & Amaya, J., Implementación de Metaheurísticas para dar solución al Problema de Planificación de Proyectos de Software. *XII CLEI*, 2012.
- [3]. Abdel-Hamid, T., & Madnick, S., A model of software project management dynamics. *The Sixth Int'l Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, November 8-12, 1982.
- [4]. Beltran, J., Brito, J., Campos, C., Garcia, I., Garcia, M., Cabrera, J., y otros., Metaheurísticas para sistemas de ayuda a la decisión en logística y minería de datos: oportunidades para las metodologías Fuzzy. *IV MAEB*, 2005
- [5]. McConnell, S., *Software Project Survival Guide*. Microsoft Press, 1997.
- [6]. Meneses, H. Esquemas de Memoria en Metaheurísticas: Mejora de un Algoritmo Memético para el Problema de Asignación Cuadrática. *Jornadas Chilenas de la Computación*, 2011
- [7]. Talbi, E. -G., *Metaheuristics: From Design to Implementation*. Wiley, 2009.
- [8]. Kniberg, H. SCRUM y XP desde las trincheras. *InfoQ Enterprise Software Development Series*. 2007
- [9]. Caniatech C.A. <http://www.caniatech.com/es>

MODELO ESPACIO TEMPORAL LINEAL DINÁMICO PARA ESTIMAR DATOS FALTANTES USANDO EL ALGORITMO EM CON EL FILTRO DE KALMAN DE ENSAMBLE SUAVIZADO EN SERIES DE PRECIPITACIÓN DIARIA

Luis Sánchez

lasa_58@hotmail.com

Departamento de Matemáticas de Face, UC, Venezuela.

Saba Infante

sinfante@uc.edu.ve

Departamento de Matemáticas de Facyt, UC, Venezuela.

Abstract. *Un modelo espacio temporal lineal dinámico es desarrollado para completar en tiempo real datos faltantes proveniente de series de precipitación diaria en Venezuela. El modelo es escrito en forma espacio temporal cuya variable de estado es estimada usando un filtro de Kalman de ensemble suavizado (FKEnS). El algoritmo esperanza - máxima (EM) es usado en conjunto con filtro de Kalman de ensemble suavizado para estimar los datos faltantes de las series de precipitación diaria. La aplicación del modelo en series de precipitación diaria en Venezuela muestra que el modelo es capaz de proveer una buena estimación de datos faltantes en las estaciones meteorológicas.*

Key words: Modelo Espacio Temporal, Pronostico de Precipitación, Filtro No Lineal.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema dinámico puede ser descrito por el modelo espacio estado; que se define como:

$$\mathbf{x}_t = \mathcal{M}_t(\mathbf{x}_{t-1}) + \mathbf{u}_t \quad \mathbf{u}_t \sim N(0, Q_t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathcal{H}_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{v}_t \quad \mathbf{v}_t \sim N(0, R_t) \quad (2)$$

La ecuaciones dada en (1) y (2) representa un sistema dinámico, donde \mathcal{M}_t y \mathcal{H}_t son operadores que obedecen la evolución del sistema, lineales en este caso de estudio, $\mathbf{x}_t \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$ denota al vector de estados desconocidos en un tiempo t , el estado inicial \mathbf{x}_0 es considerado normalmente distribuido con media μ_0 y varianza Σ_0 , $\mathbf{y}_t \in \mathcal{Y} \subset \mathbb{R}^n$ es el vector de observaciones, representa la cantidad de lluvia dada en un localidad, \mathbf{u}_t y \mathbf{v}_t son errores aleatorio normalmente distribuidos con media cero y varianza Q y R , respectivamente. El objetivo en el problema de estimación es obtener el vector de estado desde un conjunto de observaciones. Esta estimación, en el enfoque bayesiano, implica calcular la distribución

a posteriori $P(\mathbf{x}_{0:t}|\mathbf{y}_{1:t})$ y así su distribución marginal $P(\mathbf{x}_t|\mathbf{y}_{1:t})$. El problema descrito recibe el nombre de problema del filtrado bayesiano, también denominado problema del filtrado óptimo. Uno de los aportes de este trabajo consiste en aplicar técnicas de filtrado de señales, se utiliza específicamente: el filtro de Kalman de los ensambles suavizado (FKEnS) combinado con el algoritmo esperanza máxima (EM) aplicado a serie de tiempo diarias de precipitación en Venezuela. Una combinación similar del algoritmo EM y el filtro de Kalman puede observarse en: [1] y [5], para una revisión extensa del filtro de Kalman de los ensamble ver: [2].

2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

En general, los parámetros del sistema $\Theta = \{\mathcal{M}_t, \mathcal{H}_t, Q, R, \mu_0, \Sigma_0\}$ son no conocidos y pueden ser estimados desde las observaciones, la estimación de los parámetros puede ser realizadas por el método máxima probabilidad. La estimación de probabilidad máxima de Θ dado $\mathbf{X} = \{x_0, x_1, \dots, x_N\}$ y $\mathbf{Y} = \{y_0, y_1, \dots, y_N\}$ es obtenido por maximizar el log - probabilidad conjunta de \mathbf{X} , \mathbf{Y} y Θ con respecto a Θ ($\log L_y(\Theta) = \log L(X, Y, \Theta)$), definida en [3] dado por:

$$= -\frac{1}{2} \left\{ \log |\Sigma_0| + (x_0 - \mu_0)' \Sigma_0^{-1} (x_0 - \mu_0) + N \log |Q| + \sum_{t=1}^N (x_t - Fx_{t-1})' Q^{-1} (x_t - Fx_{t-1}) \right. \\ \left. + N \log |R| + \sum_{t=1}^N (y_t - Hx_t)' R^{-1} (y_t - Hx_t) \right\}$$

Cuando no existen restricciones en la estructura de las matrices del sistema F , H , Q y R , la estimación de los componentes de Θ es según [5]:

$$\hat{F} = A_4 A_3^{-1} \quad \hat{H} = A_6 A_1^{-1} \quad \hat{R} = A_5 - A_6 A_1^{-1} A_6' \quad \hat{Q} = A_2 - A_4 A_3^{-1} A_4' \quad \hat{\mu}_0 = x_0 \quad \hat{\Sigma}_0 = P_0 \quad (3)$$

Donde los estadísticos suficientes son conocidos como:

$$A_1 = \frac{1}{N+1} \sum_{t=0}^N x_t x_t' \quad A_2 = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N x_t x_t' \quad A_3 = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N x_{t-1} x_{t-1}' \\ A_4 = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N x_t x_{t-1}' \quad A_5 = \frac{1}{N+1} \sum_{t=0}^{N+1} y_t y_t' \quad A_6 = \frac{1}{N+1} \sum_{t=0}^N y_t x_t'$$

3. FILTRO DE KALMAN DE ENSAMBLE

El filtro de Kalman de ensamble (FKEN) fue desarrollado por [2], es un algoritmo basado en los métodos de Monte Carlo Secuencial utilizado para aproximar la distribución a posteriori de los estados de sistemas no lineales en altas dimensiones. El algoritmo procede como sigue:

1. Creación del Ensamble Inicial.

Para un el tiempo $t = 0$.
Se factoriza $\hat{P}_0^b = S_0 S_0^T$ y se define: $x_{0,i}^a = \hat{x}_0 + S_0 n_0^i$, $i = 1, \dots, N$, $n_0^i \sim N(0, I)$

Se calcula la media y la covarianza de la muestra simulada

$$\hat{x}_0^b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0,i}^a \quad y \quad \hat{P}_0^b = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{0,i}^a - \hat{x}_0^b)(x_{0,i}^a - \hat{x}_0^b)^T \quad (4)$$

2. Pronóstico del Ensamble. Para un instante de tiempo t . Se conocen \hat{x}_t^b y \hat{P}_t^b .

Sea $\hat{P}_t^b = \hat{S}_t \hat{S}_t^T$, ahora se crea el ensamble: $x_{t,i}^a = \hat{x}_t^b + \hat{S}_t n_t^i$, $i = 1, \dots, N$, $n_t^i \sim N(0, I)$

Se crea N miembros del pronóstico del ensamble: $x_{t,i}^b = \mathcal{M}_t(x_{t,i}^a) + u_t^i$, $i = 1, \dots, N$, $u_t^i \sim N(0, Q_t)$

El estimador insesgado de la media muestral y covarianza muestral es dado por:

$$\hat{x}_t^b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{t,i}^b \quad y \quad \hat{P}_t^b = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{t,i}^b - \hat{x}_t^b)(x_{t,i}^b - \hat{x}_t^b)^T + Q_t \quad (5)$$

En la práctica, no es común aproximar \hat{P}_t^b y en su lugar se estiman:

$$\hat{P}_t^{cr} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_{t,i}^b - \hat{x}_t^b) \left[\mathcal{H}_t(x_{t,i}^b) - \mathcal{H}_t(\hat{x}_t^b) \right]^T \quad (6)$$

y

$$\hat{P}_t^{pr} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[\mathcal{H}_t(x_{t,i}^b) - \mathcal{H}_t(\hat{x}_t^b) \right] \left[\mathcal{H}_t(x_{t,i}^b) - \mathcal{H}_t(\hat{x}_t^b) \right]^T \quad (7)$$

Donde \hat{P}_t^{cr} es la covarianza muestral cruzada entre el ensamble anterior, y la proyección predicha en el espacio de las observaciones, y \hat{P}_t^{pr} es la covarianza muestral de la proyección predicha del ensamble anterior en el espacio de observación.

3. Asimilación de Datos. Si no se dispone de observaciones en el tiempo t , el paso de actualización es el siguiente, se hace que: $\left\{ x_{t,i}^a = x_{t,i}^b, \quad i = 1, \dots, N \right\}$. Si se dispone de observaciones, entonces el ensamble es actualizado usando el algoritmo de observaciones perturbadas [4].

Se generan observaciones sintéticas: $y_t^i = \mathcal{H}_t(x_{t,i}^b) + v_t^i$, $i = 1, \dots, N$, $v_t^i \sim N(0, R_t)$

Se actualiza la media y la covarianza: $\hat{x}_t^a = \hat{x}_t^b + \mathbb{K}_t(y_t - y_t^i)$ y $\hat{P}_t^a = \hat{P}_t^b - \mathbb{K}_t(\hat{P}_t^{cr})^T$

Donde $\mathbb{K}_t = \hat{P}_t^{cr}(\hat{P}_t^{pr} + R_t)^{-1}$ es la matriz de ganancia de Kalman.

4. Paso de Suavizado. Considérese que para un tiempo $t = N, N-1, \dots, 1$.

$$x_N^N = \hat{x}_t^a, \quad P_N^N = \hat{P}_t^a, \quad t = N \quad (8)$$

$$J_{t-1} = \hat{P}_{t-1}^a F'(\hat{P}_t^a)^{-1}, \quad x_{t-1}^N = \hat{x}_{t-1}^b + J_{t-1}(\hat{x}_t^a - \hat{x}_{t-1}^a), \quad P_{t-1}^N = \hat{P}_{t-1}^b + J_{t-1}(P_t^a - P_t^b)J_{t-1}' \quad (9)$$

El algoritmo EM para la estimación máxima probabilidad del sistema dinámico dado en (1) y (2) puede ser resumido como:

- 1. Paso E:** Se usa la serie de parámetros $\Theta^r = \{\mathcal{M}_t^r, \mathcal{H}_t^r, Q^r, R^r, \mu_0^r, \Sigma_0^r\}$ obtenida desde una iteración previa r , y el filtro de Kalman de los ensamble suavizado. También se calcula $\log L_y(\Theta^{r+1})$.
- 2. Paso M:** Se actualiza $\Theta^{r+1} = \{\mathcal{M}_t^{r+1}, \mathcal{H}_t^{r+1}, Q^{r+1}, R^{r+1}, \mu_0^{r+1}, \Sigma_0^{r+1}\}$ usando las ecuaciones (3).
- 3. Convergencia:** La prueba de convergencia de la log - probabilidad es: $\|\Theta^{r+1} - \Theta^r\| < \varepsilon$

Para medir la performance del filtro, se calculo la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RCECM) que se define como:

$$RCECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\hat{x}_t^j - x_t^j)^2} \quad (10)$$

Donde x_t^j es el estado verdadero para la j -ésima simulación, $j = 1, \dots, n$ y \hat{x}_t^j , es el estimador Monte Carlo de $E(x_t|y_{1:t})$ para la j -ésima señal, $j = 1, \dots, n$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para ilustrar la metodología propuesta en este trabajo, se consideraron series de promedios diarios desde Enero del año (2011), hasta Diciembre del año (2012) de tres estaciones meteorológicas de Venezuela: una ubicada en el estado Guárico (San Pedro), otra ubicada en el estado Táchira (Pueblo Hondo) y otra ubicada en el estado Anzoátegui (El Tigre), estos datos están disponibles en la siguiente dirección: <http://agrometeorologia.inia.gob.ve/>. Dado que existen datos faltantes en las series de precipitaciones, se propone completar los datos usando el modelos definido en (1) y (2), estimando los estados con el filtro de Kalman de ensamble suavizado (FKEnS) en conjunto con el algoritmo EM.

Las priori para inicializar el algoritmo fueron las siguientes: Para la estación San Pedro el FKEnS y algoritmo EM $\hat{x}_0^+ = 0$, $P_0 = 1$, $Q_t = 0.1$, $R_t = 0.1$, $\mathcal{M}_0 = 100$, $\mathcal{H}_0 = 10000$, $\varepsilon = 0,00001$ y $n = 1000$ partículas. En la Figura (1) se muestra el gráfico que representa: las series de datos verdaderos indicado con el color negro, los datos faltantes completados con el algoritmo Gibbs denotados con el color rojo, y la predicción de la distribución a posteriori de las precipitaciones obtenidas por el filtro del Kalman de ensamble suavizado FKEnS en conjunto con el algoritmo EM denotados con el color cian, puede observarse que el FKEnS en conjunto con el algoritmo EM reconstruye eficientemente el estado de las precipitaciones en las localizaciones y tiempos indicados.

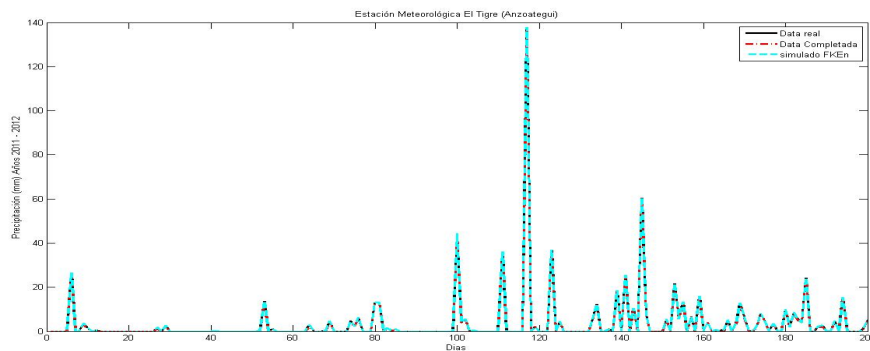


Figura 1: Estación El Tigre

Para la estación Pueblo Hondo las priori del FKEnS y algoritmo EM fueron: $\hat{x}_0^+ = 0$, $P_0 = 1$, $Q_t = 0.1$, $R_t = 0.1$, $\mathcal{M}_0 = 100$, $\mathcal{H}_0 = 10000$, $\varepsilon = 0,00001$ y $n = 1000$ partículas. En la Figura (2) se muestra de

manera similar a la gráfica anterior los datos reales, aumentados, y la predicción de la distribución a posteriori de las precipitaciones, se puede observar que el FKEnS en conjunto con el algoritmo EM reconstruye eficientemente el estado de las precipitaciones en las localizaciones y tiempos indicados.

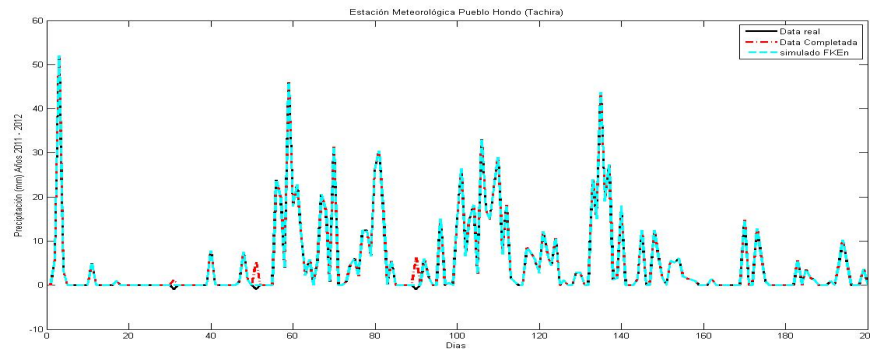


Figura 2: Estación Pueblo Hondo

Para la estación El Tigre las priori del FKEnS y algoritmo EM fueron: $\hat{x}_0^+ = 48.2326$, $P_0 = 1$, $Q_t = 0.1$, $R_t = 0.1$, $\mathcal{M}_0 = 100$, $\mathcal{H}_0 = 10000$, $\varepsilon = 0,00001$ y $n = 1000$ partículas. En la Figura (3) se muestra de manera similar a las gráficas anteriores los datos reales, aumentados, y la predicción de la distribución a posteriori de las precipitaciones, obteniéndose similitud entre el valor predicho y el sistema verdadero.

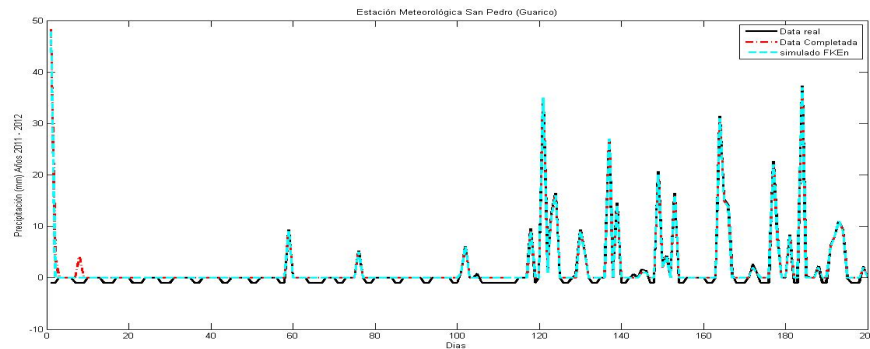


Figura 3: Estación San Pedro

En el cuadro (1) se muestra la medida de adecuación para medir la calidad de predicción del modelo propuesto. Se puede observar que los errores estimados son bajos, y muestran poca variabilidad dentro de las estaciones.

Cuadro 1: Medida de validación para las estaciones meteorológicas

Estaciones	Pueblo Hondo	San Pedro	El Tigre
RCECM	0.2905	0.1037	0.1819

5. CONCLUSIÓN

Los resultados demuestran que la metodología propuesta permite completar datos faltantes de series de tiempo relacionadas con la cantidad precipitaciones diarias medidas en diferentes estaciones meteorológicas, es capaz de predecir espacialmente y pronosticar temporalmente los estados desconocidos de las precipitaciones en forma rápida, eficiente, y exacta. Para evaluar la performance del modelo se utilizo la raíz cuadrada del error cuadrático medio.

REFERENCIAS

- [1] AMISIGO, B. AND VAN DE GIESEN, N. *Using a spatio-temporal dynamic state-space model with the EM algorithm to patch gaps in daily river flow series*. Hydrology and Earth System Sciences, 9: 209 – 224, 2005.
- [2] EVENSEN, G. *Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics*. J. Geophys. Res. 99, 10143 – 10162, 1994.
- [3] SHUMWAY, R. AND STOFFER, D. *An Approach to Time series Smoothing and Forecasting Using The EM Algortihm*. J. Time Series Analysis, 3(4), 253–264, 1982.
- [4] STROUD, J. STEIN, M. LESHT, B. SCHWAR, D. AND BELETSKY, D. *An ensemble Kalman filter and smoother for satellite data assimilation*. Journal of the American Statistical Association, 105:978-990, 2010.
- [5] XU, K. AND WIKLE, C. *Estimation of Parameterized Spatio-Temporal Dynamic models*. <http://www.stat.missouri.edu/~wikle/xuwikle072104.pdf>, 2004.

DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO ÓPTIMO MEDIANTE EL MÉTODO DE PATRÓN DE BÚSQUEDA

Panayotis S. Tremante M.

ptremante@gmail.com

Ebert Brea

ebertbrea@gmail.com

Departamento de Electrónica, Computación y Control. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria 1053. Caracas-Venezuela

Resumen. *El Método de Patrón de Búsqueda (MPB) depende, entre otros parámetros, de la longitud de paso en la variable de decisión. En este trabajo, se utilizó el MPB para identificar los valores óptimos de los parámetros que definen las funciones de pertenencia de entrada, tipo trapezoidal, de un controlador difuso. Adicionalmente, se empleó un experimento factorial de 3 niveles sobre la longitud de paso en la variable de decisión, semejante a la Estructura Experimental (EE) usada en el Diseño de Experimento (DE) y el resultado se comparó con el diseño original. Se presenta un ejemplo de la metodología planteada en un sistema de control de nivel de un tanque, donde no se cuenta con una expresión analítica del modelo de la planta.*

Palabras Clave. Control difuso, método de patrón de búsqueda, diseño de experimento.

1. INTRODUCCIÓN

El control difuso está considerado como una alternativa práctica a los procedimientos convencionales para resolver problemas de control de procesos industriales empleando un conocimiento cualitativo en términos lingüísticos de funcionamiento de un proceso. Existen varios elementos del controlador difuso que deben ser ajustados y esta tarea en ocasiones se realiza por ensayo y error, resultando ardua y difícil lo que trae como consecuencia que el controlador difuso no sea óptimo. Por lo general, el diseño de un controlador difuso óptimo se realiza con métodos evolutivos de optimización basados en algoritmos heurísticos tales como: redes neuronales, algoritmos genéticos, regocijo simulado, enjambre de partículas, colonias de hormiga, entre otros; el más utilizado es el algoritmo genético. Una forma de optimizar sin métodos evolutivos y con métodos que no usan las derivadas para la identificación de los óptimos locales o globales son los métodos de optimización por búsqueda directa [1]. Los Métodos de Búsqueda Directa (MBD) se caracterizan en el hecho de tomar decisiones según los valores que

toma la Función Objetivo (FO) y principalmente se emplean en problemas donde no se dispone de una expresión explícita de la FO.

Se han aplicado MBD para optimizar controladores difusos. En [2] y [3] un método simplex basado en [4] con restricciones y penalización se empleó para optimizar un sistema difuso mediante el ajuste de las funciones de pertenencia. Un algoritmo propuesto en la optimización basado en una modificación del método de optimización Hooke-Jeeves, para optimizar con las funciones de pertenencia y la base de regla se presenta en [5], en este caso, el algoritmo se asemeja al MPB. En el presente trabajo se implementó el MPB para optimizar un controlador difuso empleando funciones de pertenencia tipo trapezoidales. Para esto, se plantea el problema de optimización con funciones de pertenencia colocadas simétricamente definiendo ciertas condiciones que son tomadas en cuenta para formular un problema de optimización con restricciones. Adicionalmente, se empleó un experimento factorial de 3 niveles sobre la longitud de paso en la variable de decisión, semejante a la EE empleada en el DE, para comparar el resultado con respecto al diseño original.

El trabajo está estructurado en 2 partes la primera parte se desarrolla la optimización del control difuso con el MPB, indicando las restricciones en la implementación de la optimización del controlador difuso con las funciones de pertenencia junto con su ejemplo, se muestran los resultados. En la segunda parte se indica la EE implementada con los resultados obtenidos y finalmente se tienen las conclusiones.

2. OPTIMIZACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO CON LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA MEDIANTE EL MPB

El MPB consiste en fijar un patrón con una configuración geométrica alrededor de un punto, el cual será el centro del patrón [1]. En los extremos del patrón se localizan los puntos de prueba que serán evaluados en la FO para saber cual es el mejor y luego mover el patrón a ese punto. El conjunto de puntos de los extremos del patrón generan una dirección de búsqueda, moviendo el patrón hacia el óptimo y cerca del óptimo se achica el tamaño de la longitud de paso del patrón; cuando los puntos extremos no son mejores que el centro del patrón, la búsqueda finaliza. El Algoritmo de Patrón de Búsqueda (APB), parte de un punto inicial x_0 , una longitud de paso inicial Δ_0 y un conjunto de vectores d_i que se denominan patrones, los cuales indican las direcciones de las coordenadas donde estarán los puntos de prueba. El conjunto de vectores d_i será una matriz de direcciones que se denota como D_{\oplus} , esto es, $D_{\oplus} = \{d_1, \dots, d_i, \dots, d_{2n}\}$ donde n es el número de variables de decisión; tendrá una dimensión de $n \times 2n$. Por ejemplo, en R^2 la matriz D_{\oplus} sería $\begin{Bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{Bmatrix}$. El método es un proceso iterativo, donde, en cada iteración se calcula el valor de la FO en todos los puntos dados por la matriz de direcciones y termina cuando la longitud del paso sea suficientemente pequeña. La longitud de paso es el parámetro del MPB al cual se le aplicará una EE.

Generalmente, la Función de Pertenencia Trapezoidal (FPT) se describe con 4 parámetros, que son los valores de los vértices del trapecio en el universo de discurso, como

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \forall x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \forall a \leq x \leq b; \\ 1, & \forall b \leq x \leq c; \\ \frac{d-x}{d-c}, & \forall c \leq x \leq d; \\ 0, & \forall x \geq d; \end{cases} \quad (1)$$

donde a es el valor de x del extremo izquierdo, b es el valor de x izquierdo con máximo grado de pertenencia, c es el valor de x derecho con máximo grado de pertenencia y d es el valor de x del extremo derecho. En la Fig. 1 se muestra una FPT con $[a \ b \ c \ d]=[1 \ 5 \ 7 \ 8]$.

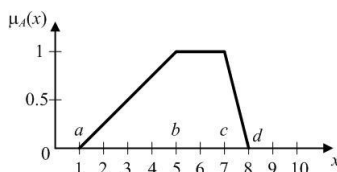


Figura 1- Función de Pertenencia Trapezoidal (FPT).

Los valores de los vértices en el universo de discurso en cuestión serán las variables de decisión para la optimización. De los 4 vértices 2 son los extremos de la función y los otros tomarán el mayor grado de pertenencia. En la FPT se debe tomar en cuenta que los valores de los vértices en el universo de discurso cumplan con la siguiente restricción:

$$a \leq b \leq c \leq d, \quad (2)$$

necesaria para asegurar que los grados de pertenencia de cualquier variable sea única en cada término lingüístico. Los puntos a y d corresponde a los extremos de la función y tienen que estar comprendidos en el universo de discurso, por lo tanto,

$$x_{\min} \leq a, \quad (3)$$

donde x_{\min} es el valor mínimo del universo de discurso y

$$d \leq x_{\max}, \quad (4)$$

donde x_{\max} es el valor máximo del universo de discurso. Cada FPT de cada término lingüístico está sujeto a las restricciones basadas en Eq. (2), Eq. (3) y Eq. (4), estas restricciones son individuales de las funciones de pertenencia, no obstante, otras restricciones adicionales se deben considerar, según sea el problema. Una variable lingüística de entrada, puede tener varios términos lingüísticos, en este caso, según la base de reglas se deben considerar ciertas restricciones para el conjunto de funciones de pertenencia de la variable de entrada en estudio. En todo sistema difuso se debe cumplir al menos una regla, de lo contrario el resultado sería indeterminado y podría el sistema ser inestable. Por lo tanto, para que se cumpla una regla, un elemento del universo de discurso de la variable de entrada en cuestión debe tener pertenencia en algún conjunto difuso. En la Fig. 2a se muestra el caso en donde no está permitida la ocurrencia de punto en el universo de discurso que no tenga correspondencia en ningún término lingüístico. Observar que en la figura el punto x_a no tiene correspondencia entre 2 términos lingüísticos consecutivos, denotados con el valor numérico lingüístico j y $j+1$. Para cumplir con la consideración planteada es necesario que las funciones de pertenencia estén colocadas como en la Fig. 2b, esto conlleva a la restricción de que los puntos extremos de cada FPT cumplan

$$d_j > a_{j+1}, \quad j \in \{1, 2, \dots, m\}. \quad (5)$$

Con las restricciones definidas se plantea un problema de optimización con restricciones a un sistema de control de nivel en el llenado y vaciado de un tanque. El diagrama de bloque del sistema de control difuso se muestra en la Fig. 3, donde la variable entrada del sistema es el nivel deseado y la salida del sistema es el nivel del tanque. El controlador difuso tiene 2 entradas: el error del nivel y la derivada del nivel, y una salida que es la acción sobre la válvula a controlar.

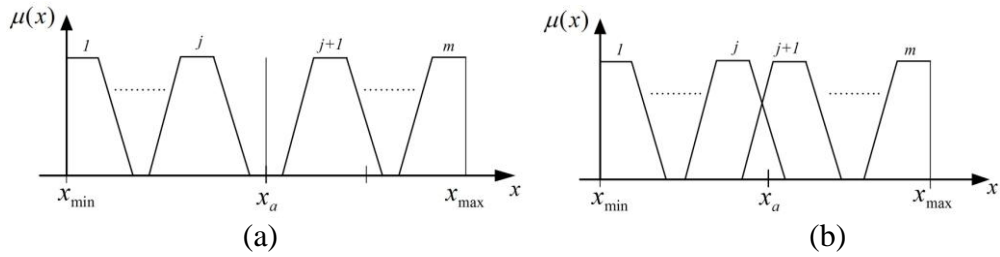


Figura 2- Funciones de Pertenencia: (a) Ubicación No Permitida y (b) Ubicación Permitida.

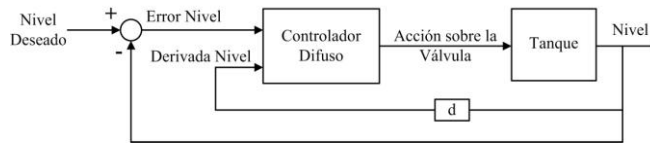


Figura 3- Diagrama de Bloque del Ejemplo del Control de Nivel.

Las funciones de pertenencia iniciales donde están las variables (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 y x_6) de decisión en la optimización se muestran en la Fig. 4.

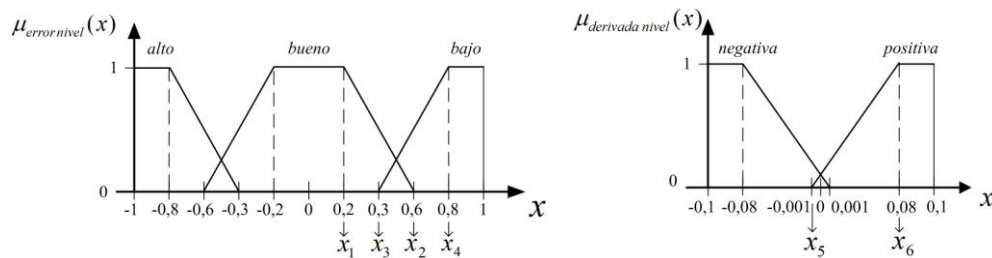


Figura 4- Funciones de Pertenencia Iniciales.

El problema de optimización se formula de la siguiente manera

$$\min \sum_{i=1}^n e^2(n) = \sum_{i=1}^n (r(n) - s(n))^2 \quad (6)$$

donde e es el error, n el número total de muestras en un período, r es la referencia y s es la salida sistema. La optimización está sujeta a las siguientes restricciones:

$$x_1 - x_2 \leq 0; x_3 - x_4 \leq 0; x_5 - x_6 \leq 0; -x_1 \leq 0; -x_3 \leq 0;$$

$$-0,1 - x_5 \leq 0; x_2 - 1 \leq 0; x_4 - 1 \leq 0; x_6 - 0,1 \leq 0 \text{ y } x_3 - x_2 < 0. \text{ El APB se describe}$$

con los siguientes pasos: **Inicialización.** a) Sea la dimensión (n) del problema, dado por el número de vértices totales. b) Determine la matriz de dirección D_{\otimes} , en función de la dimensión del problema. c) Fije $\Delta_{tol} > 0$, Tolerancia de convergencia o longitud del paso final, que será el criterio de parada del algoritmo. d) Fije $\Delta > \Delta_{tol}$ longitud de paso inicial. e) Fije el vector inicial $x_0 \in R^n$, con los valores iniciales que toman los vértices en el universo de discurso de las funciones de pertenencia. f) Ejecute la simulación. g) Evalúe la FO en los puntos iniciales, resultado se denota como f . Hacer $x_k = x_0$. **Algoritmo. Paso 1.** Verifique $\Delta > \Delta_{tol}$. Si $\Delta > \Delta_{tol}$, entonces, **termine.** **Paso 2.** Para cada iteración de $k=1, \dots, 2n$. Dado el vector $d_k \in D_{\otimes}$, a) determine $x = x_k + \Delta d_k$. b) Verifique las restricciones y las que no se cumplan realice las modificaciones respectivas de los puntos x con el propósito de satisfacerlas. c) Ejecute la simulación. d) Evalúe la FO en los nuevos puntos x , resultado se denota como f_1 . e) Si $f_1 < f$, entonces haga lo siguiente:

e1) $x_k = x_k + \Delta d_k$ (se mueve el patrón y no cambia la longitud del paso del patrón). e2) Verifique las restricciones y las que no se cumplan realice las modificaciones respectivas de los puntos x_k con el propósito de satisfacerlas. e3) Ejecute la simulación. e4) Evalúe la FO en los nuevos puntos x_k , resultado se denota como f . **Ir al comienzo del Paso 2.**

Paso 3. En caso contrario, $f_1 \geq f$ para todo $d_k \in D_{\oplus}$, haga $\Delta = 0,5\Delta$ (cambia la longitud del paso del patrón). **Ir al Paso 1.**

La evaluación de la FO dependerá de la simulación y el controlador difuso se evalúa según los valores que toman los vértices en el universo de discurso de las funciones de pertenencia. La simulación se realiza por no contar con un modelo matemático explícito de la planta. En la Fig. 5a se tiene la respuesta inicial y en la Fig. 5b el resultado luego de la optimización.

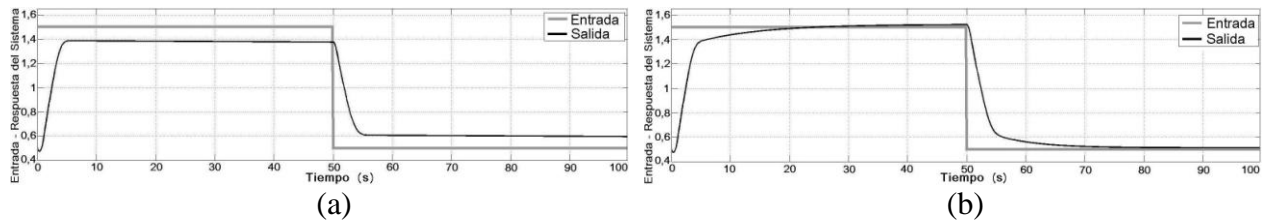


Figura 5- (a) Respuesta del Sistema de Nivel con el Controlador Difuso: (a) Inicial. (b) Optimizado.

Se aprecia en la Fig. 5a que la salida no llega al valor deseado para ninguno de los 2 niveles obteniéndose un Error en Estado Estacionario (EEE) aproximado de 0,1 y no se puede determinar un Tiempo de Alza (TA) ni Tiempo de Establecimiento (TE), ya que, el valor real no llega al valor deseado. La simulación se realiza en un período de 100s con una onda cuadrada que representa en el primer medio período el nivel alto deseado y el segundo medio período el nivel bajo deseado. Cada semiciclo representa una entrada escalón al sistema de control difuso. Al aplicar el MPB, se observa en la Fig. 5b que la respuesta del nivel alto tiene un TA de 24,5s, TE mayor a 40s y un EEE de -0,02; en el nivel bajo un TA de 30s, TE de 30s y un EEE de 0,012; resultando un desempeño aceptable y mejor que la respuesta del controlador con parámetros iniciales.

3. ESTRUCTURA EXPERIMENTAL APLICADO AL CONTROLADOR DIFUSO

Una EE es el conjunto de combinaciones de los niveles de los k factores o variables que se emplean para llevar a cabo un DE. El ajuste y análisis de una Superficie de Respuesta (SR) se facilita con la elección apropiada de un DE; el cual se utiliza con sistemas de variables aleatoria, en este caso, se empleó para variables deterministas. Para ajustar un modelo de segundo orden se debe tener al menos 3 niveles de cada factor, que en su representación canónica se indican como (-1, 0, 1). En algunos casos el estudio de una SR se busca identificar la región de respuesta óptima con experimentos factoriales 2^k o fraccionarios que a veces no son suficientes y se requieren al menos de 3 niveles para cada factor 3^k [6]. En el presente trabajo se empleó un experimento factorial de 3 niveles sobre la longitud de paso en la variable de decisión, siendo $k=6$ y resultando un total de combinaciones de $3^6=729$. En la Fig. 6 se tiene la respuesta al realizar la EE y se observa que la respuesta del nivel alto se tiene aproximadamente un TA de 4,9s, TE mayor a 6,5s y un EEE de -0,02; en el nivel bajo un TA de 5,6s, TE de 10s y un EEE de -0,04; además se aprecia que la respuesta luego del TA se mantiene por encima del set-point a diferencia de la respuesta optimizada (Fig. 5b). La respuesta aplicando la EE se puede considerar con un buen desempeño, aceptable tomando en cuenta los menores TA y TE que los obtenidos al optimizar con el MPB.

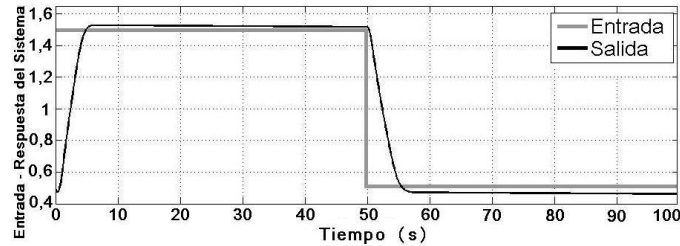


Figura 6- Respuesta del Sistema aplicando la Estructura Experimental.

CONCLUSIONES

El MPB que es de libre derivada posee el atributo de no calcular el gradiente, explora sobre un conjunto de punto de prueba para ver si la FO mejora. En el caso de estudio, el MPB permitió mejorar un controlador difuso inicial sin tener el modelo matemático explícito de la planta y tampoco la fórmula del controlador para tener que derivar, solamente se evaluó la FO. Se verificó que efectivamente el MPB converge a una solución mejor, partiendo de un controlador difuso que no tiene buenas especificaciones. Con tan solo plantear la optimización con las funciones de pertenencia de entrada se llega a resultados bastante aceptables.

El DE es una herramienta para la metodología de SR, aunque en el presente trabajo solamente se implementó una EE factorial de 3 niveles con 6 factores, se pudo apreciar que la respuesta obtenida es aceptable como un buen desempeño con los requerimientos deseados en la respuesta del sistema.

REFERENCIAS

- [1]. Kolda, T., Lewis, R., Torczon, V. Optimization by Direct Search: New Perspectives on some Classical and Modern Methods. *SIAM Review*, v.45, n.3, pp.385–482, 2003.
- [2]. Athalye, A., Edwards, D., Manoranjan, V., de Sam Lazaro A., On Designing a Fuzzy Control System Using an Optimization Algorithm. *Fuzzy Sets&Systems*, v.56, n.3, pp.281–290, 1993.
- [3]. Manoranjan, V., de Sam Lazaro, A., Edwards, D., Athalye, A. A Systematic Approach to Obtaining Fuzzy Sets for Control Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v.25, n.1, pp.206–213, 1995. DOI: 10.1109/21.362949.
- [4]. Spendley, W., Hext, G., Himsforth, F. Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation. *Technometrics*, v.4, n.4, pp.441–461. 1962.
- [5]. Trabia, M., McCarthy, W. Design of Fuzzy Logic Controllers for Optimal Performance. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, v.6, n.4, pp.459–470, 1998.
- [6]. Myers, R., Montgomery, D., Anderson-Cook, C. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, Wiley, N.J., 2009.

SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF WEIGHTED COUPLED ROTATION MAPS REVEALS CLUSTERS AND HIERARCHIES IN GRAPHS

A. J. Alvarez S.

J. L. Cabrera

ajalvare@ivic.gob.ve

juluisca@gmail.com

Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Centro de Física
Laboratorio de Dinámica Estocástica, Caracas 1080-A, Venezuela.

Abstract. *In this paper spatio-temporal patterns of a system of coupled rotation maps are studied, using trivial and non-trivial weights in the couplings in order to extract information about the hierarchy levels in a graph (or network). We use several tools from statistics and network theory to exploit the information generated by the system and to obtain the community structure of the network, i.e., the organization of nodes in clusters that are similar and or densely connected. Possible applications include the design of search engines, recommendation systems, analysis of biological and biotechnological systems and many others.*

Key words: Spatio-Temporal Dynamics, Community Detection, Graphs, Classification, System Biology.

1 INTRODUCTION

One of the properties of interest in the study of complex graphs or networks is the emergence of “communities”, i.e., clusters of nodes densely connected to each other, and sparsely connected with the rest of the network or clusters of similar nodes (previous definition of a similarity measure). Several algorithms for community identification are found in the literature. These ranked between algorithms with low computational cost but low quality results and algorithms with exhaustive computation times and acceptable quality, but unable to deal with networks of medium-large sizes. Formally speaking, a graph/network is a pair $R = (\mathcal{N}, \mathcal{E})$, where \mathcal{N} is the set of interacting nodes (or entities) and $\mathcal{E} \subset \mathcal{N} \times \mathcal{N}$ represent the set of links (or interactions) between the elements.

Most algorithms reported are based on the direct application of a combinatorial optimization method on a quality function known as modularity, measuring the quality of a community structure of a network. On the other hand very few studies exist on exploiting dynamic information of networks [1], when it is considered as the underlying topology of a coupled dynamical system.

In this paper, we propose a new algorithm to detect with high precision and intermediate computational complexity the community structure of a network, based on the study of the dynamical behavior of coupled circle rotation maps. Additionally we consider weighted strength interaction, in order to improve results. The dynamical similarity between nodes is quantified by a variant of the Pearson correlation coefficient. This measure allows us to build a dissimilarity matrix on which can be apply a hierarchical renormalization method or clustering, e.g., single linkage [5].

2 THE METHOD

A circle rotation map (CRM) is the simpler discrete time oscillator capable to display periodicity, quasi-periodicity and multiple and complex spatio-temporal patterns when considered collectively in a system. A CRM is defined by

$$f(x) = x + \alpha \bmod 1 \quad (1)$$

where $\alpha \in [0, 1]$ denotes the normalized rotation angle.

Established a local dynamics by equation (1) we proceed to define the collective dynamics of the coupled rotation maps by

$$x_i^{t+1} = (1 - \varepsilon)f(x_i^t) + \frac{\varepsilon}{k_i} \sum_{j=1}^n A_{ij}f(x_j^t) \quad (2)$$

where A is network's adjacency matrix, k_i is the connectivity of the node i , i.e., the number of nodes in the network connected with the node i , and $\varepsilon \in [0, 1]$ is the coupling strength. From equation (2) it follows that each pair of nodes interact with the same intensity or weight, regardless of other phenomena such as feedback debt to the overlapping of the relative neighbours of both nodes. In this direction, we propose a better model for the interaction between oscillators coupled in networks given by

$$x_i^{t+1} = (1 - \varepsilon)f(x_i^t) + \frac{\varepsilon}{k_i} \sum_{j=1}^n W_{ij}f(x_j^t) \quad (3)$$

where

$$W_{ij} = \left(\frac{V^+(i) \cap V^+(j)}{V^+(i) \cup V^+(j)} \right) A_{ij}, \quad (4)$$

and $V^+(i) = \{s \in \mathcal{N} \mid \{i, j\} \in \mathcal{E}\}$ is the inclusive neighborhood of the node i with $|\cdot|$ denoting cardinality. The heuristic behind this method is based on the idea that nodes with high overlapping of neighborhoods interacts better than nodes with low neighborhood overlapping.

Then, we can calculate the dissimilarity level between two nodes using the correlation level between their dynamical outcomes. This is done evolving the system to obtain the orbit (time series) for each node. Since the initial conditions are taken randomly, we calculate the correlation for a sufficiently large time in order to consider only the dynamical behaviour subsequent to the transient state of disorder.

To apply a renormalization criteria, we calculate the dissimilarity between two nodes using a modification of the Pearson correlation coefficient [7], given by

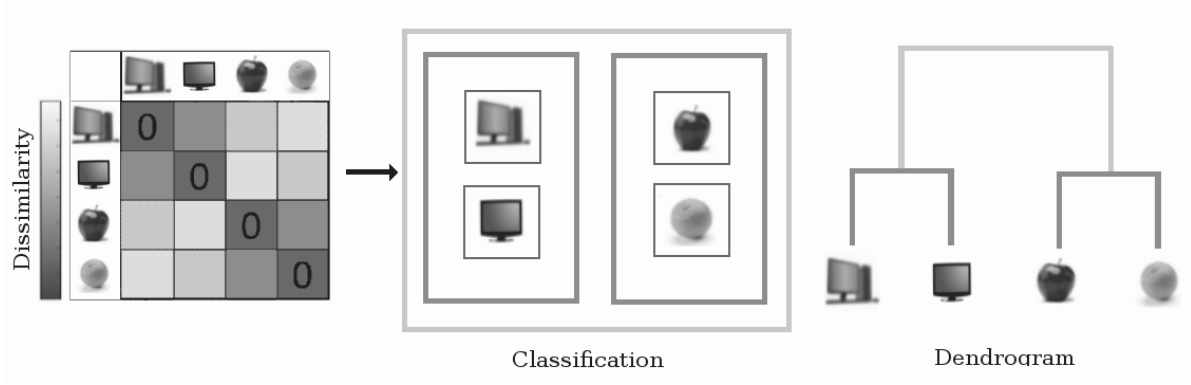


Figure 1: Schematic representation of the process of hierarchical clustering.

$$D_{ij} = 1 - \frac{Pearson(\{x_i^t\}_{t=t_0}^{t_1}, \{x_j^t\}_{t=t_0}^{t_1})}{2} \quad (5)$$

where t_0 and t_1 are the limits of the semi-orbits taken to calculate the correlation.

Equation (5) defines a dissimilarity matrix on which we can apply a hierarchical clustering method. In this paper, we use the single linkage method because this is the simplest and least computationally complex. The process of hierarchical clustering continues as follows: 1) each node is considered a cluster, 2) the pairs of clusters less dissimilar between all pairs of clusters are merged, i.e., in the upper triangular matrix, the smaller entry is identified merging the clusters corresponding to this entry while leaving $n - 1$ clusters to the next step, 3) the following two clusters less dissimilar are merged, leaving $n - 2$ clusters for the next step. Continuing in this way the number of clusters is reduced by 1 in each step, (and the size of the matrix is equally reduced by 1 in each step), finally obtaining a single cluster containing the n nodes in the network. The single linkage method is characterized by a measure used to quantify the dissimilarity between clusters and is given by

$$d(C_i, C_j) = \min\{D_{ij} | i \in C_i, j \in C_j\} \quad (6)$$

This renormalization process can be represented schematically by a dendrogram, as shown in figure 2.

Each level of the dendrogram represents a different partition of the set of nodes in similar clusters or communities. From it we need to extract the most significant partition, i.e., we must cut the dendrogram at a specific level to take the associated partition. To this end we use the modularity function, given by

$$Q = \sum_{c=1}^{n_c} \left[\frac{l_c}{m} - \left(\frac{d_c}{2m} \right)^2 \right] \quad (7)$$

where n_c is the number of clusters of the partition, l_c is the total number of links within the module c , d_c is the total sum of the degrees of the nodes in c . In equation (7), the first term of

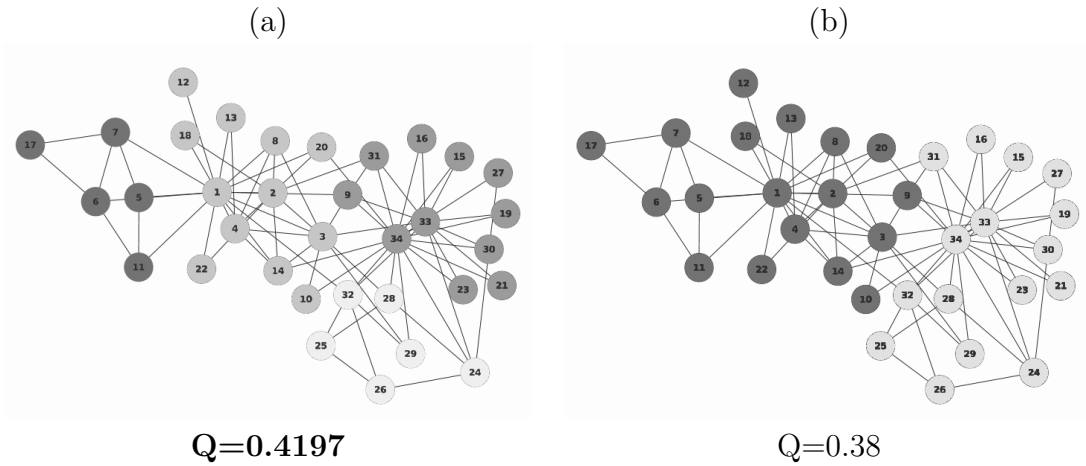


Figure 2: (a) Community structure detected by our method, (b) Community structure detected using [2].

each summand is the fraction of links within the respective module and the second term represents the fraction of links expected if the graph/network would be randomized while maintaining its degree distribution.

3 RESULTS

In order to test the performance of the proposed method, the Zachary karate club network (ZKCN) is used. This is a social network of friendships between 34 members of a karate club in the United States, introduced by the sociologist W. Zachary in [6], while conducting a study on information flow models, conflict and fission of small social groups. In his work, the fission of a karate school in two sub-schools as a result of an internal dispute is reported.

In the table 1 modularity values and number of communities are shown obtained with different methods reported in the literature.

Método	Modularidad Q	No. de Comunidades
Fast Greedy [2]	0.380	3
Girvan Newman [3]	0.4012	5
Louvain [4]	0.4197	4

Table 1: Modularity values of ZKCN for different reported methods.

Using both, equation (2) and (3), we obtain a community structure composed by 4 communities. Our results shows finer details than several other methods in the literature. Moreover, the value of modularity is the maximum value obtained for this network, i.e., our method much better is much better in terms of modularity optimization than several other methods of combinatorial optimization, (such as [2]), based on the fast-greedy combinatorial optimization algorithm.

Although the method proposed here seems to be dependent on the parameter ε and α , there exist a set for which any choice of ε and α results is an optimal classification. In order to outline this

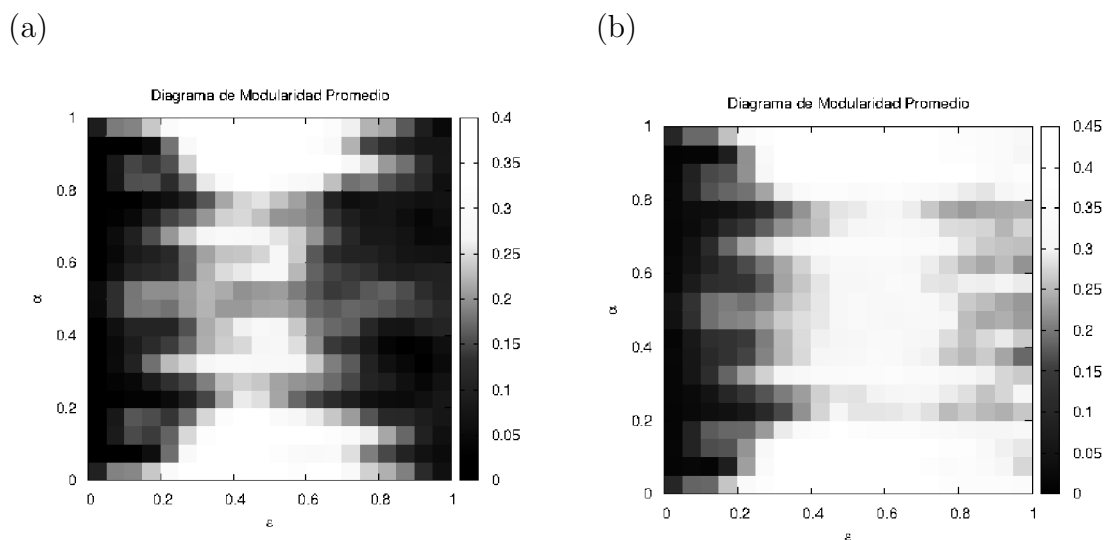


Figure 3: Average maximal modularity obtained by applying our method following equations (2) and (3) 20 times on the network of Zachary.

subset of the parameter space, one equispaced grid of 20 by 20 points on $[0, 1] \times [0, 1]$ is analyzed, and for each pair (ϵ, α) the method is applied on 20 realizations and subsequent averaging the optimal values of modularity for realization.

In figure 3 we can see the obtained improving considering the weight W_{ij} in the algorithm. Particularly, the maximum value in this case was obtained in all the realizations, with $\epsilon \approx 0.5$ and $\alpha \approx 0.15$.

4 CONCLUSIONS

Our methodology to detect communities in graphs allowed us to obtain high quality results with significantly higher modularity values than many of the other methods in the literature. Furthermore, we are able to obtain the hierarchical structure of the network. A weight on the interactions between nodes as proposed in this paper, greatly improve the performance of our method in terms of modularity, number of realization requiered by obtain the best results and expanded considerably the region of parameters for which the method yielded the best results.

Acknowledgements

This work was supported by IVIC-141 small research project.

REFERENCES

- [1] ARENAS A., DÍAZ-GUILERA A. & PERÉZ-VICENTE C. J. Synchronization reveals topological scales in complex networks, *Physical Review Letters*, vol. 96, n. 11, 114102, 2006.
- [2] CLAUSET A., NEWMAN M.E.J., & MOORE, C., Finding community structure in very large networks. *Physical Review E*, vol. 70, n. 6, 066111, 2004.

- [3] GIRVAN M. & NEWMAN M.E.J., Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, vol. 99, n. 12, 7821–7826, 2002.
- [4] BLONDEL V., GUILLAUME J.L., LAMBIOTTE R. & LEFEBVRE E. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, n. 10, P1000, 2008.
- [5] SIBSON R., SLINK: an optimally efficient algorithm for the single-link cluster method. *The Computer Journal (British Computer Society)*, vol. 16, n. 1, 30–34, 1973.
- [6] ZACHARY W., An information flow model for conflict and fission in small groups. *Journal of Anthropological Research*, vol. 33, n. 4, 452–473, 1977.
- [7] WASSERMAN L. *All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference*. Springer Texts in Statistics, 2005.

CONTROL POR MODO DESLIZANTE QUE SE HABITUA PARA LA REGULACION DE GLUCOSA SANGUINEA EN LA UCI

Rubén D. Rojas

rdrojas@ula.ve

Centro de Ingeniería Biomédica y Telemedicina, Universidad de Los Andes

Antigua sede Facultad de Ingeniería, Av. Tulio Febres Cordero, Mérida - Venezuela

Resumen. *En los últimos años gran interés se ha puesto en el diseño y desarrollo de estrategias de control, para la regulación de glucosa sanguínea en el caso de los pacientes críticamente enfermos. Los pacientes en estas condiciones pueden sufrir de hiperglucemia (alto contenido de azúcar en la sangre) y resistencia a la insulina aunque ellos no tengan diabetes. Para estos pacientes en unidades de cuidados intensivos (UCIs), mejorar el control de su nivel de glucosa sanguínea es un factor importante en reducir complicaciones serias y mortalidad. Los protocolos estándares para el control de glucosa en UCI han estado basados en medidas infrecuentes de glucosa, tablas de consulta para determinar las tasas apropiadas de infusión de insulina, y la administración de la infusión de insulina por el personal de UCI. Este artículo propone una nueva estrategia de control basada en medidas continuas de glucosa y un controlador por modo deslizante que se habitúa (HSMC). El HSMC es desarrollado combinando la ley de control por modo deslizante y los principios de control por habituación.*

El HSMC aplicado a la regulación de glucosa sanguínea en la unidad de cuidados intensivos, incluye tanto entrada de glucosa, como de infusión de insulina intra-vasculares a fin de proveer el suministro de nutrición y mejorar el rechazo a la perturbación. El estudio basado en simulaciones (in silico) usando un modelo fisiológico de la dinámica glucosa-insulina muestra que la estrategia de control propuesta funciona apropiadamente. Finalmente se compara el desempeño del controlador propuesto con respecto a un controlador PID estándar.

Palabras claves: Control por Modo Deslizante, Control por Habituación, Regulación de Glucosa Sanguínea, Unidad de Cuidados Intensivos.

1. INTRODUCCION

Los pacientes críticamente enfermos frecuentemente experimentan hiperglucemia inducida por stress y resistencia a altos niveles de insulina aunque ellos no tengan historia de diabetes. La

respuesta metabólica al stress está caracterizada por cambios mayores en el metabolismo de glucosa. El incremento de secreción de hormonas contra-regulatorias conduce a un aumento prominente en la glucosa producida endógenamente y en la tasa de glucogénesis hepática, también como a la reducción de sensibilidad a la insulina [1].

Estudios indican que la hiperglucemia en la unidad de cuidados intensivos, en pacientes con o sin diabetes está asociada a un mayor riesgo de complicaciones, a una estancia hospitalaria más larga, mayor utilización de recursos y alta mortalidad. El control riguroso de glucosa en la unidad de cuidados intensivos (UCI) ha mostrado reducir la mortalidad de pacientes en el 45 % si el nivel de glucosa es guardado cerca de 90 mg/dL para una población de cuidados cardíacos [2]. Krinsley [3] por su parte mostró una reducción total del 6 % de la mortalidad sobre una población de cuidado crítico más amplia con un límite de glucosa más alto (~ 140 mg/dL).

Recientemente, los protocolos de regulación de glucosa computadorizados surgen con el potencial para reducir la carga de trabajo de enfermería, reducir la posibilidad del fracaso cognoscitivo humano, y mejorar el control de glucosa. Bequette [4] examinó los protocolos UCI de insulina-glucosa, en el contexto de diseño y análisis de sistemas de control realimentado, incluyendo un regulador *PID*, el *Glucommander* y los protocolos *CID* (*Columnar Insulin Dosing*) y *GRIP* (*Glucose Regulation for Intensive Patients*).

En los estudios anteriormente citados la tasa de infusión de insulina era la única entrada manipulada para controlar la concentración de glucosa. Mientras el foco es a menudo la regulación de la glucosa sanguínea infundiendo la insulina, debería ser reconocido que los pacientes en UCI también tienen necesidades alimenticias que a menudo son satisfechas por vía enteral (tubos alimenticios) y/o parenteral (intra-vascular) [1]. Por lo tanto, en este artículo incluimos la tasa de alimentación en glucosa como otra entrada manipulada, además de la infusión de insulina. El algoritmo de control propuesto asegura variar la infusión de glucosa sobre una escala de tiempo corta para mejorar el control de glucosa.

Esta idea puede ser considerada una extensión de la estrategia de control que se habitúa propuesta por Henson et al. [5], que usa un grado adicional de la libertad de mejorar el rechazo de perturbación. Acá la mezclamos con la estrategia de control por modo deslizante para garantizar su robustez [6]. Este enfoque es similar al propuesto por J. Sun et al. [7], utilizando control predictivo basado en modelo.

2. ESTRATEGIAS DE CONTROL

Haciendo “ingeniería inversa” a las funciones del sistema baroreceptor, las estrategias de control que se habitúan fueron desarrolladas por Henson et al. para aplicaciones de control de procesos de producción [5]. Un sistema de control que se habitúa tiene como propiedad que lo distingue, el poseer más entradas manipuladas que salidas controladas; además las entradas se diferencian considerablemente en su efecto dinámico sobre las salidas y en los gastos relativos de manipulación de cada una. Un controlador que se habitúa coordina el uso de todas las entradas disponibles para conseguir objetivos de salida de alto rendimiento mientras simultáneamente minimiza el costo de tomar la acción de control. Para un sistema con una salida y dos entradas, su representación en funciones de transferencia sería de la forma:

$$y(s) = G_1(s)u_1(s) + G_2(s)u_2(s) + G_3(s)d(s) \quad (1)$$

donde y es la salida controlada, u_1 y u_2 las entradas primaria y secundaria respectivamente y d es una perturbación no medible. Convencionalmente, definimos como entrada primaria, a la entrada

con dinámica lenta pero “bajo” costo de manipulación, y es por lo general la que se mantiene actuando en régimen permanente. Por otro lado, la entrada con dinámica rápida y “alto” costo de manipulación se define como entrada secundaria. La entrada secundaria es usada para rastrear cambios de referencia y rechazar perturbaciones rápidamente. Así en la UCI, el suministro de nutrición debe ser proporcionado para mantener el sistema inmunológico de los pacientes, por lo que la tasa intravascular de glucosa, IVg , es incorporada como una entrada manipulada, además de la tasa de infusión de insulina, IVi . Finalmente, como la tasa intravascular de glucosa tiene la dinámica más rápida que la infusión de insulina, tratamos a IVg e IVi como las entradas secundaria y primaria, respectivamente.

Como hay dos entradas manipuladas y una salida controlada en Ec. (1), la combinación de acciones de control requeridas producir la salida deseada (y_{sp}), en estado estacionario no es única. Se requiere por lo tanto objetivos adicionales para obtener un problema de control bien definido. En el problema de control que se habitúa, la entrada secundaria también debería rastrear un valor deseado ($u_{2,sp}$), asintóticamente. Los objetivos de control deseados son por lo tanto como siguen:

1. Obtener una función de transferencia deseada $G_{yd}(s)$ entre y_{sp} e y .
2. Obtener una función de transferencia deseada $G_{ud}(s)$ entre $u_{2,sp}$ y $u_2(t)$.
3. Obtener una respuesta desacoplada entre $u_{2,sp}$ e y .
4. Alcanzar seguimiento asintótico de y_{sp} y $u_{2,sp}$ a pesar de errores de modelaje.
5. Asegurar estabilidad nominal en lazo cerrado.

El diseño del controlador por modo deslizante que se habitúa ($HSMC$) se basa en aproximar las dinámicas de $G_1(s)$ y $G_2(s)$ mediante modelos de primer orden más tiempo muerto y primer orden, respectivamente. Por otro lado, se plantean superficies de deslizamiento del tipo:

$$S_i(t) = \dot{Y}e_i(t) + \lambda_i \cdot Ye_i(t) \quad i = 1,2 \quad (2)$$

donde Ye_1 y Ye_2 son los errores de seguimiento del sistema, definidos como sigue:

$$Ye_1(t) = (y_{sp} - y(t)) + (y_1(t) - y_1^+(t)) + y_2(t) \quad (3)$$

$$Ye_2(t) = \alpha (y_{sp} - y(t)) + (u_{2,sp} - u_2(t)) \quad (4)$$

$y_1(t)$ y $y_2(t)$ son las componentes de salida, dependientes de las entradas $u_1(t)$ y $u_2(t)$, respectivamente y $y_1^+(t)$ es el equivalente de fase mínima de $y_1(t)$. Así, note que Ec. (3) presenta la forma del error de seguimiento en la formulación del predictor de Smith [8]. Finalmente, siguiendo el método del modo de alcanzabilidad propuesto por Gao y Hung [6], a fin de asegurar la atracción de la trayectoria de estado hacia la superficie de deslizamiento se plantean leyes de alcance de la forma constante más proporcional:

$$\dot{S}_i(t) = -q_i \cdot S_i(t) - p_i \cdot \text{sign}(S_i(t)) \quad i = 1,2 \quad (5)$$

Es de hacer notar que en esta formulación, los parámetros α , λ_1 , λ_2 , p_1 , p_2 , q_1 y q_2 se sintonizan de manera tal que se satisfagan los 5 objetivos de control deseados, establecidos en la subsección anterior y que acá no se presenta el desarrollo completo del controlador por limitaciones de espacio. La sintonización del $HSMC$ se basa en los parámetros característicos del paciente obtenidos mediante identificación.

3. SUJETOS VIRTUALES

Existen diferentes modelos disponibles para estudios de la dinámica de glucosa-insulina en el cuidado crítico [1,7]. Algunos son demasiado sencillos mientras que otros muy complejos. En este trabajo es usado un modelo fisiológico de gama media desarrollado por Chase et al. [1] para los estudios de simulación mediante 7 juegos de parámetros. Este modelo de tres estados está basado en el modelo mínimo de Bergman [1,7] con términos no lineales adicionales (considera efectos de saturación, en la desaparición de la insulina plasmática y la separación de glucosa dependiente de insulina, usando funciones de Michaelis-Menten) y un término agrupado para la sensibilidad de insulina. Este modelo ha sido usado en varios ensayos de control glucémico usando diferentes enfoques de control.

El modelo dinámico consiste de las siguientes tres ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\frac{dG}{dt} = -p_G G - S_I(G - G_E) \frac{Q}{1+\alpha_G Q} + \frac{G_f}{V_G} \quad (6)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -kQ - kI \quad (7)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{-nI}{1+\alpha_I I} + \frac{u_{ex}}{V_G} \quad (8)$$

Para facilidad de comparaciones en simulación, utilizando Ec. 6, Ec. 7 y Ec. 8, se creó una población de 7 pacientes, *in silico*, donde G es la concentración de glucosa, como perturbación de G_E en (mg/dl). G_E es la concentración de glucosa en equilibrio ($200 mg/dl$). Q e I son las concentraciones de insulina activa y subcutánea, respectivamente, en (mU/l). α_I y α_G , son los efectos de saturación de la insulina, y de la insulina sobre la glucosa (0.0017 y $1/65 l/mU$), respectivamente. G_f es la tasa de alimentación de glucosa IV en (mg/min). V_G y V_I los volúmenes de distribución de glucosa e insulina (15 y $12 l$), respectivamente. k es la constante de transferencia de insulina al plasma ($0.0099 min^{-1}$). n es la tasa de caída de insulina desde el plasma ($0.16 min^{-1}$). u_{ex} es la tasa de infusión de insulina exógena en U/hr ; y los otros dos parámetros fisiológicos son perturbados aleatoriamente (la sensibilidad de insulina S_I , entre 0.0005 y $0.005 l/(min mU)$ y la tasa de separación de glucosa p_G , entre 0.004 y $0.1 min^{-1}$), para generar valores diferentes de cada parámetro individual creando los siete pacientes o sujetos virtuales. La Tabla 1, lista los parámetros fisiológicos de los 7 pacientes *in silico*.

Tabla1. Parámetros fisiológicos de los sujetos virtuales

	Paciente 1	Paciente 2	Paciente 3	Paciente 4	Paciente 5	Paciente 6	Paciente 7
p_G	0.080537	0.023463	0.023463	0.052000	0.004000	0.052000	0.020000
S_I	0.004088	0.004088	0.001412	0.005000	0.002750	0.002750	0.002000

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los 7 pacientes *in silico* se hizo inicialmente un estudio en lazo abierto para conocer la respuesta en régimen permanente de concentración de glucosa ante tasas constantes de infusión de insulina como entrada. La Figura 1, muestra como los pacientes 1, 3 y 6 presentan mayor

resistencia a la acción de la insulina mientras que los pacientes 2 y 5 son altamente sensibles a la misma mostrando una concentración de glucosa en régimen permanente menor de 100 mg/dl a tasas bajas de infusión de insulina (0.1306 y 0.4729 U/h , respectivamente) lo cual predice posibles problemas para mantener la glucemia en el rango deseado para estos valores extremos.

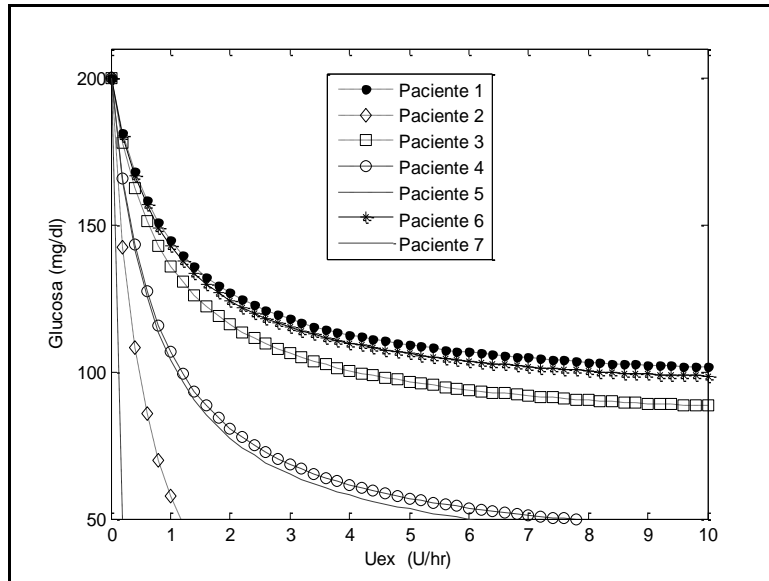


Figura 1. Curvas en régimen permanente (concentración de glucosa vs. tasa de suministro de insulina) de los 7 sujetos virtuales

Al aplicar los esquemas de control *HSMC* propuesto y el *PID* estándar se observó que el *HSMC* presentó mejor desempeño ya que los errores medios cuadráticos respecto al valor de referencia de glucosa fueron menores, tanto para llevarlos del valor de equilibrio al punto de referencia como ante perturbaciones en el nivel de glucosa en estado estacionario (ver Tabla, 2). Solo para los pacientes con alta resistencia a la insulina el resultado fue reverso, sin embargo las dosis de insulina entregadas por el *PID* exceden los máximos tolerables en situación clínica.

Tabla 2. Errores medios cuadráticos para ambas estrategias de Control

	Paciente 1	Paciente 2	Paciente 3	Paciente 4	Paciente 5	Paciente 6	Paciente 7
<i>Seguimiento de la Referencia</i>							
<i>PID</i>	2.1493	4.2089	3.9889	2.7080	19.4866	2.6862	4.3529
<i>HSMC</i>	2.8456	3.0138	4.4211	2.5212	4.2526	3.3247	4.0849
<i>Respuesta ante Perturbaciones</i>							
<i>PID</i>	0.2660	1.3675	1.2073	0.5472	6.5901	0.4476	1.5202
<i>HSMC</i>	0.2964	1.0328	1.1493	0.4309	6.1738	0.4735	1.2491

En particular el mejor desempeño fue evidente en los pacientes con alta sensibilidad a la aplicación de insulina ya que no solo con la disminución del tamaño de la infusión se logra estabilizar la respuesta en el nivel de referencia, sino con el uso de la segunda entrada (de glucosa) permite evitar que la respuesta llegue a los valores peligrosamente bajos en el nivel de

glucosa (hipoglucemia), lo cual puede observarse en Fig. 2 para el paciente número 5.

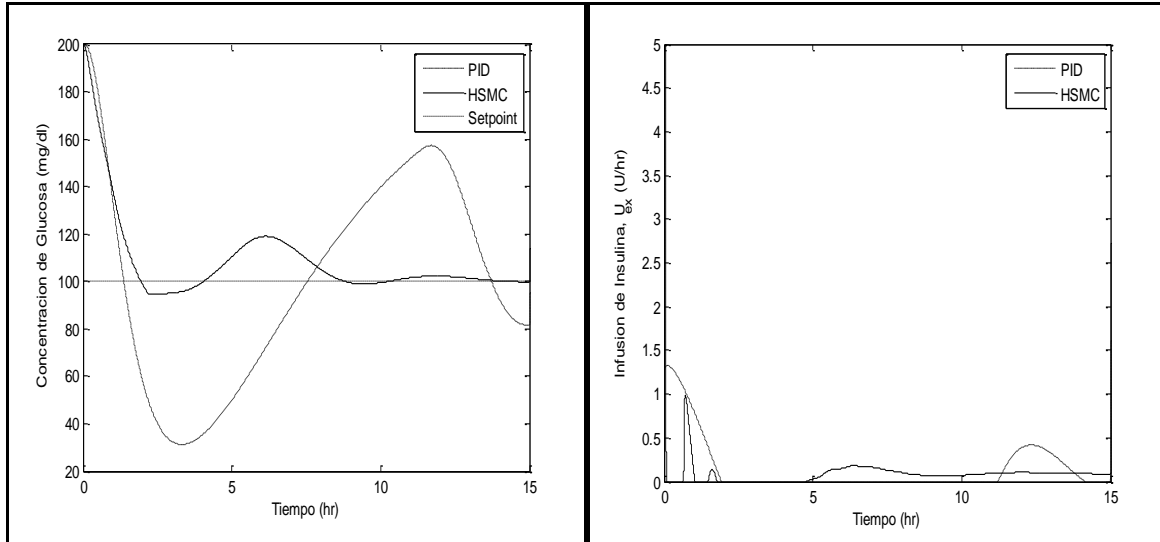


Figura 2. Respuesta de nivel de glucosa y señal de control para el paciente 5 para llevarlo del valor de equilibrio al valor de referencia (Setpoint = 100 mg/dl)

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, el HSMC es puesto en práctica en 7 pacientes *in silico*. La estrategia de control usando infusiones de insulina y de glucosa, mejora el desempeño en especial en los casos altamente sensibles a la variación de insulina, previniendo la existencia de hipoglucemia.

REFERENCIAS

- [1].J.G. Chase, G.M. Shaw, X.W. Wong, T. Lotz, J. Lin, C.E. Hann, Model-based glycemic control in critical care: a review of the state of the possible, *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 1, n. 1, pp. 3–21, 2006.
- [2].Van den Berghe G, Wouters PJ, Bouillon R, Weekers F, Verwaest C, Schetz M, Vlasselaers D, Ferdinande P, Lauwers P. Outcome benefit of intensive insulin therapy in the critically ill: insulin dose versus glycemic control. *Critical Care Medicine*, vol. 31, n. 2, pp. 359–66, 2003.
- [3].J.S. Krinsley, Effect of an intensive glucose management protocol on the mortality of critically ill adult patients, *Mayo Clinic Proceedings*, vol. 79, n. 8, pp. 992–1000, 2004.
- [4].B.W. Bequette, Analysis of algorithms for intensive care unit blood glucose control, *Journal of Diabetes Science and Technology*, vol. 1, n. 6, pp. 813–824, 2007.
- [5].M.A. Henson, B.A. Ogunnaike, J.S. Schwaber, Habituating control strategies for process control, *AIChE Journal*, vol. 41, n. 3, pp. 604–618, 1995.
- [6].W. Gao, J.C. Hung, Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A new approach, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, n. 1, pp. 45-55, 1993.
- [7].J. Sun, F. Cameron, B.W. Bequette, A habituating blood glucose control strategy for the critically ill. *Journal of Process Control*, vol. 22, n. 8, pp. 1411-1421, 2012.
- [8].C.A. Smith, *Automated Continuous Process Control*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

OPTIMIZATION OF THE RESPONSE TIME IN A MULTICAST AUDIOCONFERENCE BY USING A GENETIC ALGORITHM AND CONCURRENT PROGRAMMING

Carlos Moreno

carlos.moreno@ucv.ve

Departamento de Comunicaciones, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería,
Ciudad Universitaria, Los Chaguaramos, Universidad Central de Venezuela

Maribel Alvarez

maribelalvarez@usb.ve

Decanato de Estudios Tecnológicos, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Baruta, Edo.
Miranda, Venezuela.

Abstract. *Nowadays voice, video and data flows of traffic are transmitted jointly over an internetwork to several users parallelly by using any of the multicast approaches (IP multicast, Overlay Multicast-OM or Application Layer Multicast-ALM) just to take advantage of the use of distribution trees. At the same time signaling protocols like SIP (Session Initiation Protocol) have been developed in a point-to-point basis but considering the possibility of using IP Multicast as a complementary technology to permit point-multipoint conferences. However, Overlay Multicast gives the responsibility of forming and managing groups of both end systems and intermediate proxies. A new Overlay Multicast based architecture named SIP Multicast requires a fast method to calculate the best logical topology within a Multicast Manager which is the heart of the multicast intelligence. A genetic algorithm implemented with open source JGAP permits calculate the best distribution fastly as the number of clients joined to the conference increases. Each chromosome consists of a group of bits that represents a non-oriented graph with three vertices (a client SIP extender, a MGA-Multicast Gateway Agent and a MM-Multicast Manager). The fitness function contains the weights of each side of the graph and is different for joining and leaving time since the messages exchanged are different in every case. JGAP has been used to implement the algorithm as it is highly adaptable to different problems and can also work in different operating systems because it is written in Java language. The CPU utilization inside the PC that contains the genetic algorithm in the Multicast Manager can be improved even more by implementing the genetic algorithm in a special thread with JAVA concurrency programming; the use of both techniques can reduce joining and leaving time.*

Keywords: Genetic, algorithm, multicast, thread, conference

1. INTRODUCTION

Nowadays, voice, video and dataflows of traffic are transmitted jointly over an internetwork to several users parallelly by using any of the multicast approaches IP Multicast, Overlay Multicast and Application Layer Multicast just to take advantage of the use of distribution trees. A new multicast architecture based on SIP protocol for point-multipoint audioconferences has been developed. One of the three modules named Multicast Manager, requires a fast method to calculate the best logical topology, so we proposed a genetic algorithm. The results show that the CPU utilization inside the PC that contains the genetic algorithm can be improved even more by implementing concurrency programming. The present paper is organized as follows: in chapter 2 we explain basic functionality of a SIP Multicast audioconference architecture. Then, in chapter 3, we describe the Genetic Algorithm implemented within the Multicast Manager. After, in chapter 4 we explain the experimentation done and results. Finally, in chapter 5 we conclude and present the perspectives for future work.

2. SIP MULTICAST AUDIOCONFERENCE

The SIP protocol[1] is point-to-point oriented to permit establish, maintain and liberate a multimedia session over IP networks. However, a SIP extension based on Overlay Multicast has been designed in Telecom SudParis[2][3], so that groups are formed in higher layers, and response time is decreased.

2.1 SIP PROTOCOL AND MULTICAST

IP Multicast can be used with SIP according the specification[1]. Although IP Multicast is widely used for TV over IP networks some drawbacks related to security and complexity issues have been studied. Besides, in the SIP specification the use of both is incomplete. The other two approaches for Multicast (Overlay Multicast-OM and Application Layer Multicast-ALM) are not implemented on SIP. A new architecture named SIP Multicast for audioconferences based on Overlay Multicast was designed at small-scale in 2009[3].

2.2 SIP MULTICAST ARCHITECTURE

We proposed then a new architecture for fixed networks based on the SIP protocol, with Overlay Multicast and groups management that can be extended to wireless communications on the future. Such architecture consists of: (1) SIP Multicast Extender, (2) A special module named MGA (Multicast Gateway Agent) and (3) A Multicast Manager (Fig. 1).

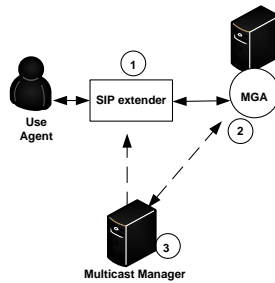


Figure 1- SIP Multicast architecture

Each of the modules will be described as follows:

SIP Extender-SE. This component permits to work with SIP extended signaling. It adds an additional header field that indicates the use of Overlay Multicast. It also converts back extended messages with SIP multicast into SIP conventional ones.

Multicast Gateway Agent-MGA. It interprets the extended SIP multicast messages and responds to the SE user agent. It fills out and reads information from an Applicative Multicast Table that contains information about the user agents associated with their respective SIP extenders.

Multicast Manager-MM. Consists of the brain of the SIP multicast architecture, and works only on the control plane. A human operator can choose whether a specific user agent will solicit its inclusion or exclusion for an audioconference if a static configuration is done. In the automatic modality, it can calculate the optimal topology. It means to find out which MGA must be connected with the SIP extender.

The problem that is presented here is defined as follows: given an existing network with known audio traffic coming or willing to come towards the SE through any MGA, find the optimal MGA according to MM calculus.

We modeled the SIP Multicast architecture with simple configuration as a directed, non oriented graph $G(\mathbf{V},\mathbf{E})$, where \mathbf{V} is a finite set of vertices (network nodes v_i) and \mathbf{E} is the set of edges (network logical links). In Fig. 2 we show a simple representation, once optimal MGA is chosen.

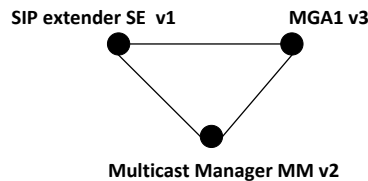


Figure. 2- SIP Multicast graph representation with chosen MGA

However, if n potential MGAs exist on the network, there are n possible graphs, so a calculation method must be employed to find the “best” graph.(Fig. 3).

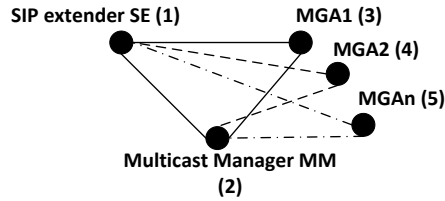


Figure 3- SIP Multicast graph representations for n potential MGAs

Considering that the SIP Multicast architecture contains several potential MGAs in the real world forming overlay multicast groups, the research space can be increased dramatically. Once chosen the best Cycle we can represent the whole set as a graph. All the possible graphs are isomorphic, because only three of $n+2$ nodes are connected in all of them. We need a fast method to calculate the best graph, so we decided to use a genetic algorithm, as this metaheuristic method is widely used on research in conjunction with multicast routing technologies[4].

3 GA FOR MULTICAST MANAGER

To represent one individual we define an adjacency matrix, with “m” rows and “k” columns each. It is simetrical as three nodes of a triangle SE / MGA/ MM communicate bidirectionally in our architecture.

This matrix can also be represented as a binary code. We can demonstrate that, with a “m” rows and “k” columns adjacency matrix the individual binary representation can be simplified.

For a population of 2^n individuals, we can represent each one with “n” bits. If there are 2^n eligible MGAs we can define the chromosome with only one gene of “n” bits.

The fitness function value depends on the weights between each of the three vertices chosen from the research space. It includes the bandwidth of the ports of connected nodes SE, MGA and MM as follows in Eq.(1)

$$F = \frac{100}{D_{SM} + D_{MGM} + D_{MMS}} \quad (1)$$

Where:

F: Fitness Function of Genetic Algorithm

D_{SM} : Weight representing lowest bandwidth of link between SE and potential MGA

D_{MGM} : Weight representing lowest bandwidth for link between potential MGA and MM

D_{MMS} : Weight representing lowest bandwidth for link between MM and SE

We suppose that the links are full duplex. They can be also consist of wireless links.

Joining Time is the difference between 2 instants as follows in Eq. 2

$$JT = T_2 - T_1 \quad (2)$$

Where:

T_1 : Instant when joining SIP extended message is sent from SE

T_2 : Instant when the first audioconference media traffic packet arrives to SE

Leaving Time is the difference between 2 instants as follows in Eq. 3

$$LT = T_4 - T_3 \quad (3)$$

Where:

T_3 : Instant when leaving SIP extended message is sent from SE

T_4 : Instant when the last audioconference media traffic packet arrives to SE

For both JT and LT the consumed resources on the Multicast Manager and performance of the genetic algorithm are correlated. The genetic algorithm is executed to choose the best MGA with which SE will be exchanging the SIP extended messages. In the case of LT D_{MMS} may be discarded if no interaction exists between SE and MM for leaving an audioconference session.

4 EXPERIMENTATION AND RESULTS

We developed the Genetic Algorithm with and without a JAVA thread on the PC that contains the Multicast Manager by using JGAP. The operating system used was Windows 7, with CPU Intel Pentium Dual-core of 32 bits 2,20Ghz. The processing time PT has been measured by using the TM (TimeMesurer) Java Class in two instants and resting them mathematically as follows in Eq.(4)

$$PT = ET - ST \quad (4)$$

Where:

ST: Starting Time before applying the genetic algorithm with or without JGAP

ET: Ending Time after applying the genetic algorithm with or without JGAP

The Genetic Algorithm without a JAVA thread on the PC that contains the Multicast Manager (MM) was used at first. It was implemented with open source JGAP and the genetic operators used are reproduction, crossover and dynamic mutation. The population contains 80 individuals each one formed by a chromosome of one gene with maximum 32 bits (Integer). The initial population was randomly created and 500 generations were employed on the evolution. The best graph was calculated 10 times with 5,12,19,26 and 32 bits gene representing a graph that contains a potential MGA for comparing PT without concurrent programming versus PT with thread implementation of the genetic algorithm. In the Fig.4 the average PT is plotted for each gene size representing the maximum number of eligible MGAs.

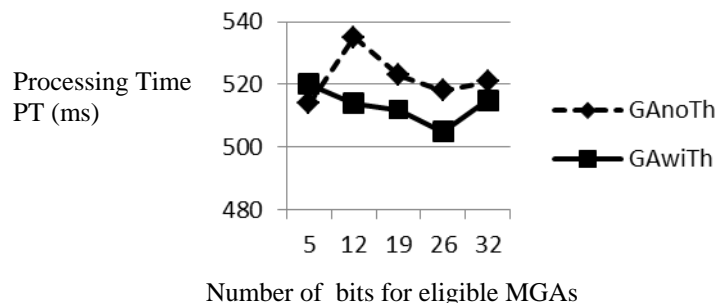


Figure 4-PT of GA with and without Threading

It can be seen in Fig.4 that for 5 bits (2^5 eligible MGAs), the average PT calculated was 514 ms without JAVA Threading, and 520 ms with JAVA Threading so the Genetic Algorithm runned faster without concurrency programming. However, as the number of eligible MGAs is increased, and the representation is made with 12 bits (2^{12} MGAs), 19 bits (2^{19} MGAs), 26 bits (2^{26} MGAs) and 32 bits (2^{32} MGAs) the PT is lower with JAVA Threading than without JAVA Threading. This is because JAVA Threading permits the CPU take advantage of the inactivity times that may exist during the operation of the genetic algorithm. The corresponding thread competes with other system threads that are running concurrently. Since the PT is lower with JAVA Threading as the number of eligible MGA is increased with a maximum of 32 bits, Joining Time (JT) and Leaving Time (LT) are also lower because the GA is executed each time a new SE joins the audioconference or a group of SEs leaves from an audioconference.

5 CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

The use of a genetic algorithm to reduce the Processing Time (PT) within the Multicast Manager, and so reducing Joining Time (JT) or Leaving Time (LT) in an SIP multicast architecture can be programmed with or without JAVA Threading. The advantages of programming the genetic algorithm with JAVA Threading is that it can be run over different operating systems to provide interoperability and the PT is lower than programming without JAVA Threading as CPU can take advantage of inactivity times when the number of eligible MGAs is increased on the genetic algorithm. Our future goal is to present a study of the SIP Multicast architecture containing the threading-based genetic algorithm programmed with JGAP within the Multicast Manager. We also aim to study the performance of the genetic algorithm in other operating systems.

Acknowledgements

The authors thank to the Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) of the Universidad Central de Venezuela for the budget assigned to the project: “Mejoramiento de arquitectura para servicios multimedia basada en multidifusión SIP” under the identification PI-08-7820-2009/1.

REFERENCES

- [1] Schulzrinne, J., Camarillo, G., Johnston, A., Peterson, J., Sparks, R., Handley, M., Schooler, E. RFC3261 «*SIP: Session Initiation Protocol*», 2002.
- [2] Moreno, C., Becker, M., Vincent, P. Performance of a new multicast architecture based on SIP extensions and Group Management. *IEEE/IFIP 6th Latin American Network Operations and Management Symposium (LANOMS2009)*, pp. 1-10, 2009.
- [3] Moreno, C. *Design of a Network Architecture for Multimedia Services with SIP Multicast*, PhD. Thesis, TelecomSudParis-ParisVI, Evry, France, 2009.
- [4] Leela, R., Selvakumar, S. Genetic Algorithm approach to Dynamic Multi Constraint Multi Path QoS Routing Algorithm for IP networks (GA-DMCMPRA) eds, *First International Communication Systems and Networks Workshops (COMSNETS2009)*, pp.1-8, 2009.

UMA METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA O PROJETO DE ABSORVEDORES DINÂMICOS DE VIBRAÇÕES MULTIMODAIS

Yohan Ali Diaz Mendez
Sebastião Simões Cunha Jr
Rogério Frauendorf Faria Coimbra
Everton Garcia de Menezes

yohan.g8@gmail.com

sebastiao.simo.es.jr@gmail.com

rogério.ff.coimbra@gmail.com

everton.efei@gmail.com

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil

Resumo. *Um campo que vem sendo amplamente estudado na engenharia é o de controle de vibrações mecânicas. Diversos tipos de estruturas e equipamentos estão sujeitos a diferentes níveis de vibrações incluindo sistemas mecânicos, civis, navais, aeronáuticos dentre outros. Dentre as técnicas mais utilizadas no controle dos níveis de vibrações têm-se os chamados Absorvedores Dinâmicos de Vibrações (ADVs) que são capazes de absorver a energia vibratória de um sistema em seu ponto de acoplamento. Seguindo esta tendência, neste trabalho apresenta-se uma metodologia computacional para o projeto de ADVs multimodais, que possuem a capacidade de atenuar vibrações em diferentes faixas de frequências simultaneamente. Assim, heurísticas de otimização global serão associadas ao método de elementos finitos de forma a se determinar as características físicas do ADV multimodal que farão com que este atenuar vibrações em diferentes faixas de frequências simultaneamente.*

Keywords: Absorvedores Dinâmicos de Vibrações Multimodais, Vibrações, Otimização.

1. INTRODUÇÃO

Na sua forma mais simples, absorvedores dinâmicos de vibrações (ADVs) são dispositivos de parâmetros concentrados de massa, rigidez e amortecimento que, uma vez acoplados a uma dada estrutura, dita estrutura primária, são capazes de absorver a energia vibratória no ponto de

conexão.

Desde sua invenção por Frahm no início do século [1], os ADVs têm sido extensivamente utilizados para atenuar vibrações em diversos tipos de máquinas e estruturas. Nos trabalhos apresentados por [2] e [3] foram utilizados sistemas estruturais discretos de vários GDL. Um estudo abrangente da teoria e aplicações práticas dos ADVs é apresentado em [4]. Já [5] apresenta uma síntese do uso de ADVs passivos, semi-ativos e ativos.

Em sua configuração básica, um ADV passivo é capaz de absorver o movimento vibratório segundo uma única coordenada espacial. Contudo, em problemas mais complexos, envolvendo sistemas vibratórios contínuos multidimensionais, é desejável a atenuação simultânea de vibrações em diferentes faixas de frequências de forma que mesmo uma variação na frequência de excitação, levando a valores próximos a outras frequências naturais do sistema multimodal, o nível de vibração do sistema principal permanece baixo.

Dentre os ADVs contínuos, aqueles do tipo viga vêm sendo estudados por diversos autores. [6] analisaram o desempenho de diferentes configurações de ADVs acoplados tanto a sistemas de 1 GDL quanto a sistemas contínuos. ADVs viscoelásticos do tipo viga foram considerados por [7]. Já [8] propuseram uma metodologia de projeto ótimo de ADVs do tipo viga para atenuação de vibrações em uma única direção empregando uma técnica de acoplamento de sub-estruturas. O trabalho apresentado por [9] apresenta um ADV capaz de atenuar vibrações oriundas de duas frequências simultâneas. Em [10] tem-se um modelo de ADV multimodal.

Seguindo esta ideia de ADVs contínuos multimodais, o presente trabalho apresenta um estudo acerca da proposição de uma metodologia computacional para o projeto de absorvedores dinâmicos de vibrações multimodais (ADVM). A metodologia permite projetar o ADVM para a atenuação de vibrações harmônicas em diferentes valores de frequência simultâneas.

A metodologia proposta consiste na associação de heurísticas de otimização global (como exemplo os Algoritmos Genéticos, Colônia de Formigas, Evolução Diferencial, etc.) com o método de elementos finitos. Desta forma, uma rotina computacional, chamada aqui de programa principal, obtêm os dados dinâmicos do sistema vibratório, via métodos de elementos finitos, repassando-os às heurísticas de otimização global. Uma vez que índices de desempenho são determinados, tendo como base os níveis da resposta harmônica dentro de uma banda de frequência pré-definida, estes são otimizados em relação aos parâmetros geométricos do ADVM. Este procedimento é realizado até que o ADVM seja capaz de atenuar simultaneamente as vibrações harmônicas dentro das faixas pré-determinadas.

No que segue, apresenta-se de forma detalhada a metodologia proposta, seguida da definição dos índices de desempenho. Por fim tem-se uma simulação numérica de forma a evidenciar as características da metodologia proposta.

2. METODOLOGIA PROPOSTA

Neste trabalho, propõe-se uma metodologia de projeto de ADVM na qual tem-se uma associação entre as chamadas heurísticas de otimização global, em particular os Algoritmos Genéticos, com o método dos elementos finitos. A Fig. 1 abaixo mostra esquematicamente como se dá esta associação.

A rotina computacional, denominada “programa principal”, obtêm os dados dinâmicos do sistema vibratório (frequências naturais e FRF – Função Resposta em Frequência) através da rotina denominada “método dos elementos finitos”. Em seguida, repassa estes dados a uma segunda rotina computacional, denominada “programa de interface”, que formata, rearranja e repassa os dados para a rotina computacional “otimização”. Nesta última, de posse de todos os

dados, é feita uma otimização visando minimizar índices de desempenho que são determinados, tendo como base os níveis da resposta harmônica dentro de uma faixa de frequência pré-definida. A otimização é feita em relação aos parâmetros geométricos do ADVM. Uma vez feito o primeiro procedimento de otimização, novos valores para os parâmetros geométricos do ADVM são passados para a rotina computacional “métodos dos elementos finitos” de forma que esta calcule os novos dados dinâmicos do sistema acoplado (sistema primário + ADVM) e repasse ao programa principal fechando assim o ciclo da metodologia proposta.

O procedimento dado pela Fig. 1 é realizado até que o ADVM seja capaz de atenuar simultaneamente as vibrações harmônicas dentro das faixas de frequências pré-determinadas.

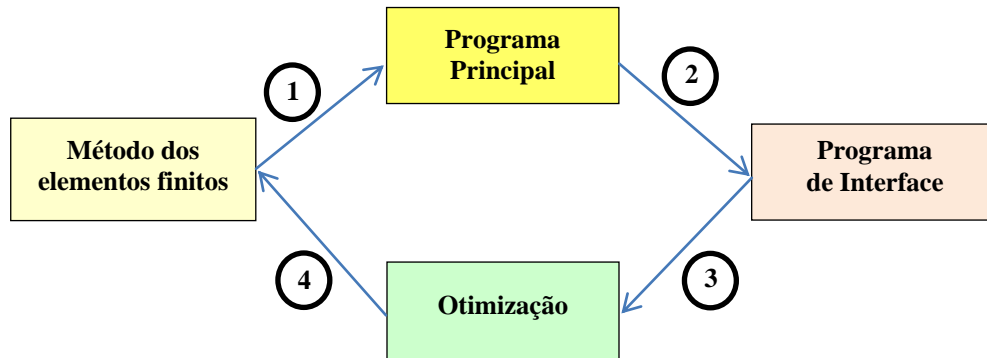


Figura 1. Esquema da metodologia empregada na busca por ADVM.

Como o ADVM é modelado matematicamente via métodos dos elementos finitos, as variáveis de projeto são definidas como sendo os parâmetros físicos e geométricos do modelo.

Restrições de projeto são impostas aos valores destas variáveis afim de garantir que as dimensões e massa do ADVM sejam compatíveis com o sistema primário.

Seguindo este raciocínio, optou-se pelo seguinte índice de desempenho:

$$J = \sum_{i=2}^5 (Q_1 \max \{ abs [H_i (\omega_{ini}, \omega_{fim})] \} + Q_2 abs [H_i (\omega_i)]) \quad (1)$$

onde H representa a FRF do sistema acoplado (sistema primário + ADVM) dentro de uma faixa de frequência i limitada inferiormente e superiormente por ω_{ini} e ω_{fim} . Q representa fatores de ponderação atribuídos a cada FRF dentro de uma dada faixa de frequência.

Afim de se fazer a otimização do índice de desempenho dado pela Eq. 1, e devido ao alto número de variáveis de projeto, serão utilizados neste trabalho os Algoritmos Genéticos (AGs) [11], devido à sua reconhecida robustez na solução de problemas complexos.

Os AGs são um conjunto de procedimentos computacionais de busca e otimização, baseados na genética dos organismos biológicos. Os AGs foram inventados por Holland na década de 60 e um estudo abrangente sobre o tema foi realizado por [11].

A principal característica dos AGs é a de que eles operam simultaneamente com um amplo conjunto de pontos do espaço de busca, e não com um único ponto, além disso, a aplicabilidade dos AGs não é limitada pela necessidade de computar os gradientes e pela existência de descontinuidades na função objetivo, uma vez que são requeridos apenas os valores desta função, avaliados para cada indivíduo da população.

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Afim de validar a metodologia proposta na busca por um ADVMM contínuo que seja capaz de absorver vibrações em diferentes faixas de frequências pré-definidas, tomou-se como modelo de referência o ADVMM proposto por [9] o qual consiste de um ADVMM denominado cruciforme e que é capaz de absorver a energia vibratória em duas frequências distintas simultaneamente. O ADVMM proposto por [9] foi projetado de forma que cada braço do ADVMM cruciforme atenuasse uma única frequência fazendo com que este fosse limitado a somente 2 frequências simultâneas. Além disto, sua geometria era constante (cruciforme).

Aqui, pretende-se que o ADVMM projetado seja capaz de absorver ao menos 4 frequências pré-definidas simultaneamente de forma que sua aplicabilidade aumente consideravelmente se comparado ao ADVMM cruciforme dado em [9]. Para isto, o ADVMM proposto terá 16 variáveis de projeto cujos valores são limitados afim de se ter um ADVMM de dimensões compatíveis com a estrutura primária bem como um sistema que seja possível de construção.

A estrutura primária consiste de uma viga bidimensional engastada-livre, cujos valores das 5 primeiras frequências naturais são fornecidos na Tab. 1.

Admitindo uma força excitadora aplicada segundo a direção transversal, pretende-se atenuar simultaneamente as respostas vibratórias em 4 frequências naturais da viga. As características do ADVMM são mostradas na Tab. 2 e Fig. 2 abaixo.

Tabela 1. Valores das cinco primeiras frequências naturais da estrutura primária.

Modo	Frequência [Hz]	Modo	Frequência [Hz]
1	1,30	4	36,60
2	7,70	5	55,80
3	20,20		

Tabela 2. Características físicas do modelo do ADVMM.

Propriedades	Valor
Densidade	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
Módulo de Young	$E = 200 \text{ GPa}$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,30$

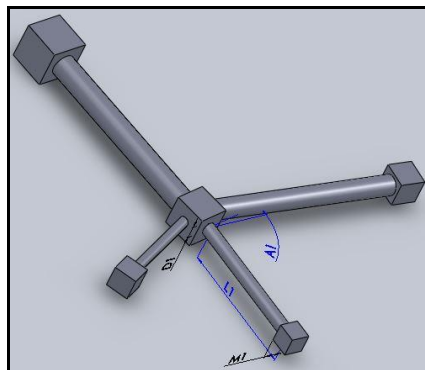


Figura 2. Características geométricas iniciais do modelo do ADVMM.

As principais características do procedimento de otimização são:

- bandas de freq. [Hz]: H_1 : [5,2-10,2], H_2 : [17,7-22,7], H_3 : [34,1-39,1], H_4 : [53,3-58,3]
- restrições de projeto:
 - $0,1 \leq m_i \leq 3,0$ kg $i = 1$ a 4 (massa ao final de cada barra)
 - $10,0 \leq D_i \leq 50,0$ mm $i = 1$ a 4 (diâmetro de cada barra)
 - $100,0 \leq L_i \leq 400,0$ mm $i = 1$ a 4 (comprimento de cada barra)
 - $-15,0 \leq \alpha_i \leq 15,0^\circ$ $i = 1$ a 4 (ângulos entre duas barras)
- Algoritmos Genéticos:
 - *tamanho da população*: 50
 - *número máximo de gerações*: 130

Os valores obtidos das variáveis de projeto empregando a metodologia proposta estão dispostos na Tab. 3. Na Fig. 3 têm-se as FRFs antes e após o acoplamento do ADVM. Como pode ser observado, as 4 frequências de interesse foram substancialmente reduzidas com a remoção dos picos de ressonância e surgimento de anti-ressonâncias como indicado na Fig. 3.

Tabela 3. Valores obtidos após otimizaçãodas variáveis de projeto.

Var.	Valor	Var.	Valor	Var.	Valor	Var.	Valor
m_1	2,45	L_1	361,81	D_1	26,49	α_1	0,33
m_2	1,14	L_2	307,48	D_2	47,19	α_2	13,32
m_3	2,00	L_3	278,27	D_3	21,49	α_3	-1,82
m_4	2,80	L_4	137,47	D_4	32,81	α_4	-3,83

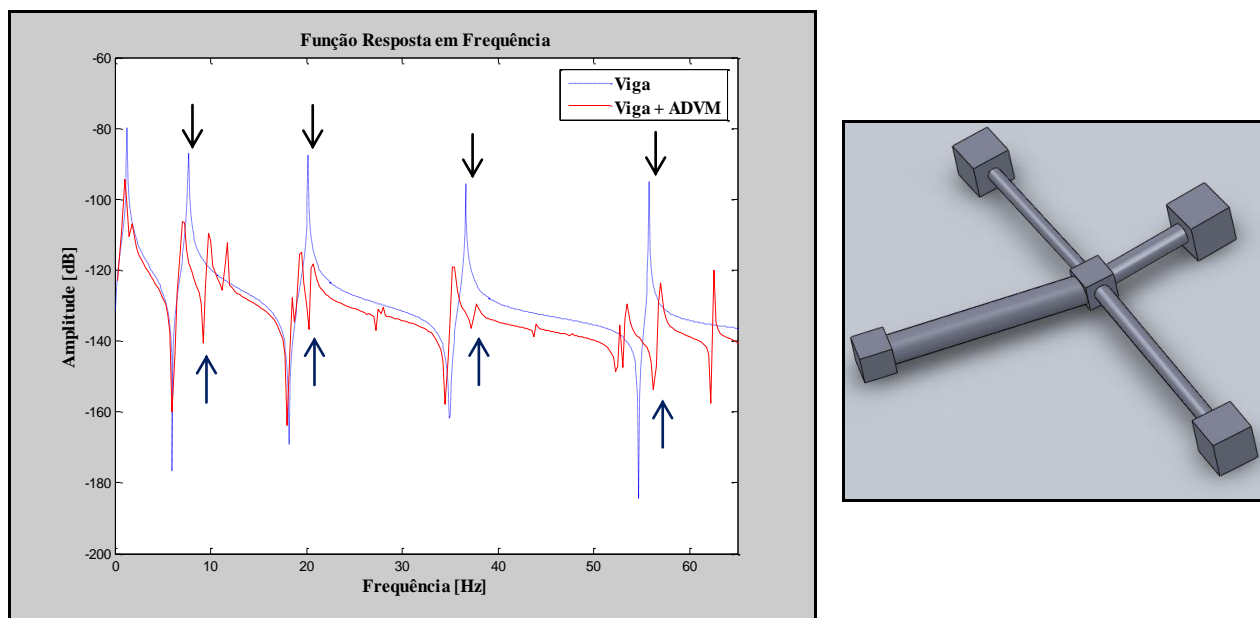


Figura 3. FRFs antes e após o acoplamento do ADVM e ADVM final a ser utilizado.

5. CONCLUSÕES

Foi mostrada uma metodologia computacional de projeto de um ADVN, associando o método dos elementos finitos com heurísticas de otimização global, para a atenuação simultânea de vibrações em 4 frequências distintas de uma viga engastada-livre.

Visto que o estudo tenha tido como ponto de partida o ADVN apresentado por [9], a metodologia computacional pode ser estendida a outros tipos de ADVN uma vez que a mesma se mostrou eficiente.

A avaliação dos índices de desempenho requer grande esforço computacional, mas que pode ser reduzido mediante a utilização de estações de trabalho que possuem vários núcleos de trabalho em paralelo.

Os Algoritmos Genéticos se mostraram bastante eficientes e robustos, respondendo, contudo, pela maior parte do esforço computacional da metodologia apresentada.

Como desenvolvimentos futuros, prevê-se a inclusão de amortecimento no ADVN bem como a otimização da banda de supressão em cada faixa de frequência pré-estabelecida.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e do MEC/SESu através do Programa de Educação Tutorial.

REFERENCES

- [1].Frahm, H., Device for Damping Vibrations of Bodies. *US Patent* 989, 958, 1911.
- [2].Ram, Y. M., Elhay, S., The theory of a Multi-Degree-of-Freedom Dynamic Absorber. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 195, nº4, pp. 607-615, 1996.
- [3].Cunha Jr, S. S., Rade, D. A., Atenuação de Vibrações Empregando Absorvedores Dinâmicos Múltiplos.IV *CongresoIberoamericano de Ing. Mec.*, Santiago, Chile, 1999.
- [4].Koronev, B. G., Reznikov, L. M., Dynamic Vibration Absorbers. Theory and Technical Applications. *John Wiley & Sons*, 1993.
- [5].Sun, J. Q., Jolly, M. R., Norris, M. A., Passive, Adaptative and Active Tuned Vibration Absorbers – A Survey. *Transactions of the ASME*, vol. 117, pp. 234-242, 1995.
- [6].Snowdon, J. C., Nobile, M. A., Beamlike Dynamic Vibration Absorbers.*Acoustic*, vol. 44, pp. 98-108, 1980.
- [7].Freitas, F. L.; Espíndola, J. J., Noise and Vibration Reduction with Beam-like Dynamic Neutralizers. *12th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, Brasília, 1993.
- [8].CunhaJr, S. S., Rade, D. A., A Model Updating-Based Method for the Optimum Design of Beamlike Dynamic Vibration Absorbers. *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Águas de Lindóia, SP, 1999.
- [9].Snowdon, J. C., Wolfe, A. A., Kerlin, R. L., The Cruciform Dynamic Vibration Absorber. *Journal of the Acoustical Society of America*, 75, 1792, 1984.
- [10].Barros, M. B., Proposição, Avaliação Numérica e Experimental de um Absorvedor Dinâmico de Vibrações Multimodal. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- [11].Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *Reading, MA, Addison Wesley PUB. Co*, 1989.

PRUEBAS DE VERIFICACIÓN AUTOMÁTICA DEL HABLANTE TEXTO DEPENDIENTE MEDIANTE LINEAR PREDICTION CODING Y REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Maldonado, José Luciano

maldonaj@ula.ve

Instituto de Estadística Aplicada y Computación, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales,
Universidad de Los Andes, Av. Las Américas, Núcleo La Liria. Mérida - Venezuela

Moret Luis

lmoret86@gmail.com

Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes
Av. Alberto Carnevalli, Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez. Mérida - Venezuela

Resumen. *En el trabajo desarrollado se planteó como objetivo general realizar pruebas para verificación del hablante entre un grupo determinado de personas. Para cumplir con este objetivo se grabaron señales de voz de 5 hablantes, de un conjunto pre-establecido de frases diferentes. Se trataron realizaciones por frase y por hablante, a las cuales se les extrajeron, por ventanas, las características haciendo uso de la codificación por predicción lineal. A partir de las señales de voz representadas con los coeficientes de predicción, se procedió a construir, por software, varios verificadores por medio de la tecnología de las redes neuronales artificiales. Se entrenaron redes neuronales artificiales que modelaban un sólo tipo de frase pronunciada por varias personas y redes que modelaban varios tipos de frases pronunciadas por varias personas; se evaluó el desempeño de estas redes tanto en forma individual como en conjunto. A la evaluación en conjunto se le llamó verificación global. Los resultados obtenidos variaron desde relativamente bajos a suficientemente altos al evaluar las redes en forma individual; cuando se trabajó con pocos hablantes los resultados alcanzaban hasta 100% de verificación tanto con los patrones de entrenamiento como con los patrones de validación. Al recurrir a la verificación global, midiendo en conjunto el desempeño de varias redes con los dos conjuntos de patrones, el acierto resultó apreciablemente alto.*

Palabras claves: Verificación automática del hablante, Modelado de señales de voz, Linear prediction coding, hablantes, Redes neuronales artificiales.

1. INTRODUCCIÓN

El campo de las tecnologías del habla es muy amplio, abarca diversas áreas generales de investigación, que van desde el reconocimiento automático del habla hasta la construcción de sintetizadores de voz. Entre esos dos grandes campos de investigación se encuentra, junto con otras áreas de trabajo, el área relacionada con el desarrollo de sistemas verificadores del hablante que comprende la construcción de modelos de la voz de un grupo particular de personas. El objetivo de esos sistemas es recibir la voz de una persona, constatar que esa voz se encuentre entre los modelos creados para el grupo, y verificar que la persona que habla es efectivamente quién dice ser [1-3].

2. VERIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DEL HABLANTE

La construcción de sistemas de verificación del hablante comprende diversas técnicas para extraer características de las señales de voz y hace uso de diferentes enfoques para crear modelos de las pronunciaciones a partir de las características extraídas. Uno de los enfoques para extraer características de las señales de voz está constituido por la técnica LPC (*Linear prediction coding*), mientras que un paradigma para crear modelos de voz, lo constituyen las redes neuronales artificiales (RNA) [1][4-6].

En este trabajo, las pruebas de verificación realizadas son texto dependientes, las cuales requieren que las pronunciaciones utilizadas en el reconocimiento sean del mismo tipo de las que se utilizan en el entrenamiento [3].

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN REALIZADO

Las actividades llevadas a cabo comprendieron varias etapas:

Adquisición de datos: Se trabajó con frases predefinidas de un grupo de cinco personas, cuatro hombres y una mujer. Las señales fueron grabadas en formato wav, monocal, con una frecuencia de muestreo de 8000 hertz. Las grabaciones fueron realizadas en lugares con presencia de ruidos de fondo.

Las pronunciaciones con las que se trabajó fueron definidas como de los tipos siguientes:

Frase tipo 1: Nombre y apellido de la persona.

Frase tipo 2: Un saludo ("Hola, ¿cómo estás?" y "Hola Mérida")

Frase tipo 3: Nombre de persona y profesión.

Frase tipo 4: "Montañas y frío".

Frase tipo 5: "Ciudad de los caballeros".

Frase tipo 6: "Universidad de los Andes".

Se realizaron 12 grabaciones por cada frase, por persona. Cada frase fue grabada en un intervalo de 3 segundos.

Pre-procesamiento de las señales: Como es casi imposible grabar la voz en los mismos instantes de arranque y finalización, en intentos diferentes, para eliminar las zonas de silencio en los extremos se siguieron dos estrategias: La estrategia en base al recorte de la duración promedio de las zonas de silencio en los extremos y la estrategia en base a la amplitud de la señal que

consideraba los promedios del umbral superior de ruido para las voces de los hombres y para las voces de la mujer.

Se aplicó un pre-énfasis ya que la mayoría de la información está contenida en las frecuencias altas [1-2]. La señal de voz pre-enfatizada fue enventanada en intervalos definidos por experimentación. Las ventanas fueron solapadas, en la mayoría de las pruebas, para que los coeficientes de predicción lineal resultantes estuvieran fuertemente correlacionados entre ventanas consecutivas. Con el objetivo de suavizar la señal, en los bordes de cada ventana, se realizó un filtrado tipo Hamming [1-2][7].

Cálculo de los coeficientes LPC: El análisis de predicción lineal consiste en modelar el tracto bucal como un filtro digital, permitiendo así calcular la próxima muestra o dato de voz como una suma ponderada de las muestras pasadas [1-2][4].

Los coeficientes LPC son calculados por varios métodos; en este trabajo se aplicó el algoritmo de Levinson-Durbin [1-2].

4. PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Se construyó y probó un gran conjunto de RNA perceptrónicas de tres capas entrenadas con *Backpropagation* [8]. Para la construcción se seleccionó, en cada prueba, alrededor del 70% de los vectores de patrones de las señales de voz, y para su validación el 30% restante.

Prueba tipo 1: Verificación de dos hablantes

Se construyeron RNA, bajo el esquema de la fig. 1, para verificar dos hablantes a través de tres frases distintas:

Frase tipo 1: Un nombre de persona.

Frase tipo 2: Un saludo, "Hola, ¿cómo estás?".

Frase tipo 3: Un nombre de persona y su profesión.

Cada señal fue recortada en base a la duración promedio de las zonas de silencio. Por experimentación se decidió utilizar un tamaño de ventana de 800 datos, solapamiento de 200 datos y 12 coeficientes LPC por ventana.

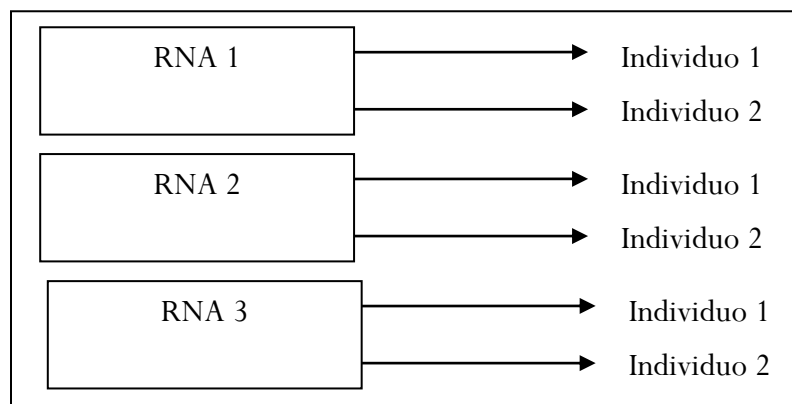


Figura 1- RNA verificadoras de dos hablantes con tres tipos de frases

Verificación con la frase tipo 1: Se encontraron al menos veinte RNA con las que se alcanzó 100% de acierto tanto en validación como en entrenamiento. Esto significa que las RNA reconocen dos frases diferentes, provenientes de dos personas distintas, sin embargo, esto no

garantiza que se pueda diferenciar cuándo las frases son pronunciadas por una u otra persona. La importancia de esta prueba está en mostrar que un sistema robusto de verificación del hablante requiere del diálogo usuario-máquina en los que se incluya el reconocimiento de frases.

Verificación con la frase tipo 2: Se trabajó con realizaciones de la frase "Hola, ¿cómo estás?" de ambas personas. Se lograron entrenar al menos veinte RNA, con las que se alcanzó 100% de acierto en validación y en entrenamiento.

Verificación con frases tipo 3: Igual que en los casos anteriores, se obtuvo un número considerable de RNA, al menos dieciocho, con las que se alcanzó 100% de acierto tanto en validación como en entrenamiento. Esta prueba tuvo el mismo objetivo descrito para la verificación con frases tipo 1, sólo que la longitud de las frases tipo 3 es mayor.

Cálculo del porcentaje de acierto global en base a las RNA entrenadas con los tres tipos de frases: El porcentaje de verificación global se obtuvo con el siguiente procedimiento:

1. Se seleccionaba una o más redes entrenadas por cada tipo de frase.
2. A cada red se le presentaba una señal del tipo de frase con el que había sido entrenada, y se anotaba su respuesta.
3. Se decidía el hablante reconocido en función del mayor número de coincidencias en las respuestas de las redes.

En la tabla 1, se muestra un ejemplo de verificación global de presentarle a tres RNA diferentes ocho realizaciones de validación de los tres tipos de frases.

El porcentaje de verificación global se calcula por la cantidad de aciertos que se obtiene en la última fila de cada tabla. La columna de unos indica que la primera señal que se le presentaba a las redes correspondía al hablante 1, la columna de dos indica que la segunda señal que se le presentaba a las redes correspondía al hablante 2, y así sucesivamente, la última columna de dos indica que la señal ocho de validación correspondía al hablante 2. Cada valor en la última fila era el resultado de contar las coincidencias en cada columna. En este ejemplo, el acierto global fue de 100%, puesto que se trabajó con redes cuyos aciertos, individuales, fueron del 100% para los hablantes.

Es importante destacar el aspecto siguiente: Se realizó la verificación recurriendo tanto a frases comunes como diferentes para los hablantes, asumiendo que un sistema de verificación tendrá que hacer uso de un sistema de diálogo como herramienta para lograr su objetivo.

Prueba tipo 2: Verificación de tres hablantes

Se trabajó bajo el mismo esquema descrito para dos hablantes, sólo que se agregaron realizaciones de una frase adicional tanto para el conjunto de frases tipo 1 como para el conjunto de frases tipo 3.

Verificación con la frase tipo 1: Se encontraron al menos dieciocho RNA que lograron un acierto mayor o igual a 91.66%, que corresponden a una equivocación entre 12 señales de verificación.

Verificación con la frase tipo 2: Se lograron entrenar al menos ocho RNA, con las que se alcanzó un acierto entre 75 y 100% en validación, mientras que en entrenamiento el acierto fue 100%. Un 75% corresponde a 9 reconocimientos correctos de 12 señales. La mayoría de las redes se equivocaban en una señal, es decir, lograban un acierto de 91.66%.

Verificación con la frase tipo 3: Se obtuvo al menos trece RNA con las que se alcanzó un acierto de 100% para el conjunto de entrenamiento y entre 75 y 100% para validación, es decir, mínimo 9 reconocimientos correctos de 12 señales.

Cálculo del porcentaje de acierto global en la verificación de tres hablantes: Se encontraron porcentajes de verificación globales comúnmente de 91.66% en validación, que equivalen a una sola falla, y 100% de acierto cuando se trabajaba con el conjunto de entrenamiento.

Tabla 1. Porcentaje de verificación global 1 con dos hablantes

FRASE 1	RNA PR4	1	2	1	2	1	2	1	2	
FRASE 2	RNA P4	1	2	1	2	1	2	1	2	
FRASE 3	RNA R15	1	2	1	2	1	2	1	2	
RECONOCIMIENTO		1	2	1	2	1	2	1	2	100%

Prueba tipo 3: Verificación de cuatro hablantes

Para esta prueba se agregaron las realizaciones de una frase más por cada hablante, tanto para el tipo 1 como para el tipo 3.

Verificación con la frase tipo 1: Se obtuvo al menos ocho RNA que producían 100% de acierto con el conjunto de entrenamiento, mientras que en validación la mayoría de las redes reconocían 12 de 16 señales, para un 75% de acierto.

Verificación con la frase tipo 2: Se obtuvo al menos 9 RNA con aciertos en validación entre 68.75 y 81.25%, lo que corresponde entre 11 y 13 aciertos de 16 señales, mientras que se alcanzó 100% para entrenamiento.

Verificación con la frase tipo 3: Se encontró 1 RNA con un acierto en validación del 81.25%, es decir, reconoció 13 de 16 señales; y al menos ocho RNA con un acierto en validación del 68.75%, que equivale a reconocer 11 frases de 16. Mientras que se obtuvo 100% para entrenamiento.

Porcentaje de acierto global: Se obtuvo una cantidad considerable de combinaciones de RNA, en las que se encontró un acierto global de 100% con los dos conjuntos de patrones.

Prueba tipo 4: Verificación con cinco hablantes

Se agregaron las realizaciones de una frase más por cada hablante, tanto para el tipo 1 como para el tipo 3.

Verificación con la frase tipo 1: Se encontraron varias RNA con las que se alcanzó un acierto entre 45% y 50%, en validación, que corresponde a 9 y 10 señales reconocidas de 20; y 100% de acierto con el conjunto de entrenamiento.

Verificación con la frase tipo 2: Se encontraron al menos 8 RNA con reconocimiento en validación de entre 50 y 60%, es decir, entre 10 y 12 señales reconocidas de 20. Y 100% para entrenamiento.

Verificación con la frase tipo 3: Se encontraron al menos 6 redes con reconocimiento en validación de entre 45 y 50%, es decir, entre 9 y 10 señales reconocidas de 20. Y 100% para entrenamiento.

Cálculo del porcentaje de acierto global: Se obtuvieron como mejores resultados de acierto global entre 65% (13 señales reconocidas de 20 posibles) y 100% en validación, y 100% con las señales de entrenamiento.

Prueba tipo 5: Verificación de hablantes con la frase "Montañas y frío"

Los mejores resultados encontrados, con RNA individuales, cuando se trabajó con cinco, cuatro, tres y dos hablantes, con validación, fueron: 35% (7 señales de 20), 56.25% (9 señales de 16), 58.33% (7 de 12) y 87.5% (7 de 8). Mientras que el acierto global estuvo entre 60 y 100%.

Prueba tipo 6: Verificación de hablantes con la frase "Ciudad de los caballeros"

Los mejores resultados con RNA individuales, cuando se trabajó con cinco, cuatro, tres y dos hablantes, con validación, fueron: 50% (10 de 20), 56.25% (9 de 16), 66.66% (8 de 12) y 75% (6 de 8). Mientras que el acierto global estuvo entre 65 y 100%.

Prueba tipo 7: Verificación de hablantes con la frase "Universidad de los Andes"

Los mejores resultados encontrados con RNA individuales, cuando se trabajó con cinco, cuatro, tres y dos hablantes, con validación, fueron: 40% (8 de 20), 37.50% (6 de 16), 75% (9 de 12) y 75% (6 de 8). Mientras que el acierto global estuvo entre 65 y 100%.

5. CONCLUSIONES

El proceso de verificación automática de los hablantes es una tarea compleja debido a la gran variabilidad de las señales de voz en cuanto a forma, duración, amplitud y nivel de ruido en cada realización.

La selección del tamaño de las ventanas, así como el vector de características es una tarea determinante al momento de modelar las señales de verificación.

Los resultados obtenidos pueden facilitar la verificación a través del diálogo usuario-máquina y no de una forma rígida como en el caso de la verificación a través de sonidos cortos como vocales o palabra individuales.

A mayor número de hablantes las RNA pierden su capacidad de reconocimiento en forma individual, por lo tanto la estrategia de acierto global es una alternativa adecuada para la verificación. Sin embargo, el número de RNA para calcular el acierto global sólo se determina por experimentación.

REFERENCIAS

- [1] Deller J., Proakis J. y Hansen J., Discrete Time Processing of Speech Signals. Macmillan Publishing Company, New York, 1993.
- [2] Huang X., Acero A. y Hon H. Spoken Language Processing. A guide to Theory, Algorithm, and System Development. Prentice Hall PTR, 1996.
- [3] Ripoll L., Verificación de Hablante basado en Dynamic Time Warping. *Revista Ingeniería&Desarrollo, Universidad del Norte*, 3-4: pp 111-127, 2009.
- [4] Cruz B. y Acevedo M., Aplicación del reconocimiento de voz de un hablante mediante una red neuronal artificial Backpropagation y coeficientes LPC sobre un canal telefónico. *Lindavista*, 07738, México D.F. pag. 89-99, 2008.
- [5] Simancas E., Nakano M. y Pérez H., Verificación de hablantes usando información de Pitch y Melspec. Instituto Politécnico Nacional, *ESIME*, Culhuacan, México, 2005.
- [6] Hernández M., *Sistemas de Reconocimiento de Hablantes dependiente e independiente del texto*. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Tesis de Maestría, Culhuacan, México, 2004.
- [7] Oppenheim A., Discrete-Time Signals Processing, Prentice-Hall, pp. 447-448, 1989.
- [8] Basogain X., Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones. Disponible en línea: http://cvb.ehu.es/open_course_ware/castellano/tecnicas/redes_neuro/contenidos/pdf/libro-del_curso.pdf. Consultada en noviembre 2012.

CRITERIO DE CLASIFICACIÓN DE DATOS USANDO PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

Anthony D. Cho*

Fernando Cedeño**

Patricia Chirivella*

Samuel Flores*

adcho@@uc.edu.ve

fjcedeno@uc.edu.ve

patricia_achg@hotmail.com

ssjflores@gmail.com

* Departamento de Matemática FaCyT, Universidad de Carabobo, Bárbula, Carabobo-Venezuela

** Departamento de Matemática FaCyT, Centro de investigaciones médicas y biotecnológicas CIMBUC, Universidad de Carabobo, Bárbula, Carabobo-Venezuela

Resumen. *En muchas ocasiones interesa estudiar el comportamiento de mas de una característica (2 o mas) en una población, este estudio siempre se puede hacer por separado, sin embargo, puede resultar necesario analizar el comportamiento en conjunto, con el fin de dilucidar la influencia de una en otra(s) y/o determinar las relaciones existentes entre ellas, etc. El análisis de datos multidimensional es una de las técnicas mas utilizadas en la actualidad para tal fin, debido a la correlación que pueda existir entre los patrones de cada observación impidiendo distinguir unos datos de otros. Existen muchos métodos para definir una clasificación basando en separación lineal o no lineal, pero en su mayoría no indica con claridad cuales datos son linealmente separables o no, ya que es de mucha utilidad tal información al momento de elegir un método apropiado. En nuestra propuesta emplearemos un método de programación matemática para indicar si es posible clasificar los datos linealmente y si no es así, permitir clasificar de manera no lineal. La técnica fue aplicada en datos de pacientes de riesgo cardíaco, dando buenos resultados, porque permitió clasificar los mismos de forma satisfactoria.*

Palabras clave: Clasificación, programación matemática, separabilidad.

1 Introducción

Un problema básico en los problemas de separación de patrones es el siguiente: Dados dos conjuntos no vacíos de patrones denotados por A y B respectivamente. El conjunto A consta de m patrones y el conjunto B consta de k patrones donde cada patron tiene asociado n observaciones

escalares. El problema consiste en clasificar los patrones mediante la construcción geométrica de unos objetos denominados planos o hiperplanos separadores en el Espacio Euclídeo . Una forma de darle solución al problema antes mencionado de tener un criterio de separación lineal es mediante el enfoque de la programación lineal.

2 Criterio de Separabilidad Lineal y Inseparabilidad para un conjunto de patrones

En este trabajo se da una representación matricial del conjunto de patrones mediante una matriz de numeros reales denominada matriz de patrones, cada fila de esta matriz define un patron único (o simplemente patron) y es llamado vector patron. Un patron único esta formado por n números reales llamados observaciones. Denotamos la matriz de patrones por la letra capital A , los patrones son denotados por los vectores fila A_i , la j -ésima observación del i -ésima patron es el escalar A_{ij} . El problema básico con esta notación es el siguiente: Dado dos conjuntos de patrones definidos por A una matriz de patron de dimensión $m \times n$ y B otra matriz patron de dimensión $k \times n$, se quiere determinar un plano en el Espacio Euclídeo E^n n -dimensional tal que si las m filas de A y las k filas de B se toman como puntos en este espacio, entonces se deben clasificar en lados opuestos de este plano. Sea x un punto en el Espacio Euclídeo n dimensional, podemos determinar el plano de la forma siguiente escribiéndolo como un problema de programación lineal:

$$\begin{aligned} xd - \gamma &= 0 \\ Ad - e\gamma &> 0 \\ Bd - l\gamma &< 0 \end{aligned}$$

donde $d \in R^{1 \times n}$, γ es un una constante escalar, e es un vector columna de m -unos y análogamente l es un vector columna de k -unos respectivamente. Dos conjuntos de patrones A y B son separables linealmente si y sólo si existe las constantes d y γ tal que el sistema de desigualdades descrito anteriormente se satisface [1].

Teorema 2.1 *Los dos conjuntos de patrones de A y B son linealmente separables si y sólo si existe un vector columna n -dimensional de constantes c y escalares constantes α y β tal que*

$$Ac - a\alpha \geq 0 \tag{1}$$

$$-Bc + l\beta \geq 0 \tag{2}$$

$$\alpha - \beta > 0 \tag{3}$$

$$f \geq c \geq -f \tag{4}$$

donde f es un vector columna n -dimensional de unos.

Teorema 2.2 *(Separabilidad Lineal). Una condición necesaria y suficiente para la separabilidad lineal del patrón fijó A y B es*

$$\theta(A, B) > 0$$

donde $\theta(A, B)$ es la solución del problema de programación lineal:

$$\theta(A, B) = \max_{\alpha, \beta} \{(\alpha, \beta) | Ac - e\alpha \geq 0, -Bc + l\beta \geq 0, f \geq c \geq -f\}$$

Teorema 2.3 (*Inseparabilidad Lineal*). Una condición [3] suficiente y necesaria para la inseparabilidad lineal del conjunto de patrones A y B es que $\theta(A, B) = 0$.

Teorema 2.4 (*Separabilidad lineal dual*). Una condición necesaria y suficiente para la separabilidad lineal de los patrones de los conjuntos A y B es que

$$\varphi(A, B) > 0,$$

donde $\varphi(A, B) > 0$ es la solución del problema de programación lineal

$$\begin{aligned} \varphi(A, B) = \min_{u, v, p} = \{ & f'p \mid e'u = 1, l'v = 1, -Au' + B'v + p \geq 0, \\ & A'u - B'v + p \geq 0, u \geq 0, v \geq 0 \}, \end{aligned}$$

donde u, v , y p son m -, k -, y n -dimensional vectores columnas, y la prima denota la transpuesta.*

Teorema 2.5 (*Inseparabilidad Lineal Dual*). Una condición necesaria y suficiente para la inseparabilidad lineal de los conjuntos A y B es que $\varphi(A, B) = 0$.

Teorema 2.6 (*Criterio Inseparabilidad Dual*). Una condición necesaria y suficiente que los conjuntos de patrones de A y B sean linealmente inseparables es que el sistema

$$A'u - B'v = 0, \tag{5}$$

$$e'u = 1, \tag{6}$$

$$l'v = 1, \tag{7}$$

$$u \geq 0, \tag{8}$$

$$v \geq 0, \tag{9}$$

tenga una solución.*

3 Resultados y conclusión

Para ilustrar la metodología se usaron datos de 20 pacientes a los cuales se les desea determinar si tienen riesgo cardíaco alto o bajo a partir de las medidas de presión arterial media X_1 , edad X_2 y peso X_3 . Determinaremos si el conjunto de pacientes es linealmente separable en dos grupo de pacientes, para esto tomamos en cuenta las tres variables X_1 , X_2 y X_3 .

La solución del problema de programación lineal (1) es $c = [-1.00, -0.93, -0.87]$ con $\alpha = -237.90$, $\beta = -238.90$ y una maximización de $\alpha - \beta = 1.00$ por tanto es linealmente separable. Se determinaron dos conjuntos A y B que se muestra en tabla 1 y se ilustra en la figura 1.

Grupo A			Grupo B		
x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
105.0000	47.0000	85.4000	115.0000	49.0000	94.2000
112.0000	51.0000	89.4000	116.0000	49.0000	95.3000
110.0000	47.0000	90.9000	117.0000	50.0000	94.7000
110.0000	49.0000	89.2000	121.0000	48.0000	99.5000
106.0000	45.0000	87.1000	121.0000	49.0000	99.8000
106.0000	46.0000	87.0000	114.0000	48.0000	92.7000
113.0000	46.0000	94.5000	114.0000	47.0000	94.4000
110.0000	48.0000	90.5000	115.0000	49.0000	94.1000
			114.0000	50.0000	91.6000
			125.0000	52.0000	101.300
			114.0000	46.0000	94.5000
			122.0000	56.0000	95.7000

Tabla 1: Data 1: Considerando las variables x_1 , x_2 y x_3

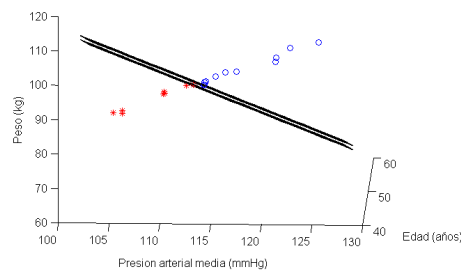


Figura 1: Representación de los planos de separación de los datos 1

Al tomar solo en cuenta las variables X_1 y X_2 el problema de programación lineal tiene solución resultado: $c = [-1.00, 0.14]$ con $\alpha = -109.86$, $\beta = -114.00$ y una maximización de $\alpha - \beta = 4.1429$. Se obtiene los conjuntos A y B representados en la tabla 2 y que se ilustra en la figura 2.

Grupo A		Grupo B	
X_1	X_2	X_1	X_2
105	47	121	48
115	49	121	49
116	49	125	52
117	50	122	56
112	51		
110	47		
110	49		
114	48		
114	47		
115	49		
114	50		
106	45		
114	46		
106	46		
113	46		
110	48		

Tabla 2: Data 2: Considerando las variables X_1 , X_2

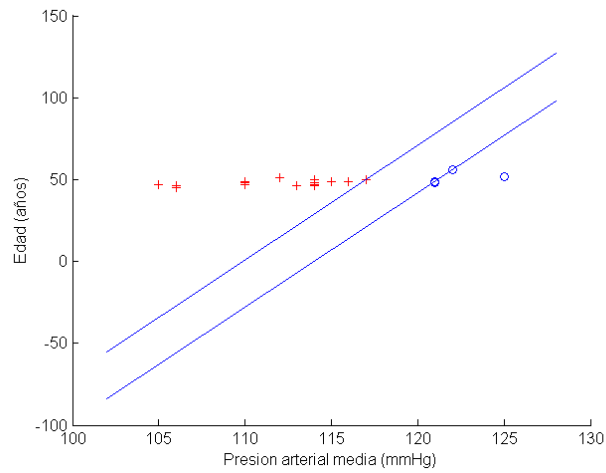


Figura 2: Representación de las rectas de separación de la Data 2

Por medio de las figuras 1 y 2, podemos notar que el método nos proporciona resultados satisfactorios para la clasificación de dos grupos de pacientes. Por teoría, la clasificación es lineal si el problema tiene como solución positiva en la maximización de $\alpha - \beta$ sujetas a ciertas restricciones. Teniendo estos resultados, se puede aportar para futuras investigaciones en el área de reconocimiento de datos y clasificación automática de datos n-dimensional, de tal manera, aligerar en el análisis del experto.

REFERENCIAS

- [1] MANGASARIAN, O. L. Linear and Nonlinear Separation of Patterns by Linear Programming *Operation Research*, Vol 3, pages 444-452, (1965).
- [2] CARLOS VÁZQUEZ ET AL.. Procesamiento y Análisis del electrocardiograma (ECG) ambulatorio: Problemas y soluciones *Ciencia en su PC - Redalyc.org*, pages 57-66, (2010).
- [3] W. HIGHLEYMAN A note on Linear Separability *IRE trans. Electronic Computers*, pages 777-778, (1961).

MODELO DE PREDICCIÓN PARA LA FORMACIÓN DE ATLETAS DE LAS LIGAS MENORES DE BÉISBOL DEL ESTADO TACHIRA

Marcel Molina

David Medina

Gerardo Delgado

Giancarlo Colmenares

mmolina@unet.edu.ve

david.medinal@gmail.com

gerardodd@gmail.com

gcolmen@unet.edu.ve

Departamento de Ingeniería en Informática, Universidad Nacional Experimental del Táchira
Paramillo, Avda. Universidad, San Cristóbal, Edo. Táchira – Venezuela

Resumen. *La presente investigación se enmarca dentro del área de la Inteligencia de Negocio con una orientación en el ámbito deportivo para el descubrimiento de conocimiento aplicado a los datos históricos de los jugadores de las ligas mayores de béisbol con el fin de encontrar modelos y patrones que ayudarán a predecir variables importantes a la hora de tomar decisiones en cuanto al rendimiento y planificación de los entrenamientos para los jugadores de béisbol que tienen un alto grado de competitividad y tienen como meta un alto rendimiento. Para realizar esto se utilizó la metodología de búsqueda de conocimiento KDD, donde para la primera fase se desarrolló un servicio web para la obtención y extracción de los datos de las ligas mayores de béisbol, seguidamente se procedió a realizar el filtrado y pre-procesado de dichos datos donde se tomaron los datos de las temporadas desde el año 1.954 hasta el 2.010, de allí se seleccionaron y calcularon una serie de variables independientes o de entrada, para posteriormente establecer cuatro perfiles para la predicción los cuales fueron: defensiva, ofensiva, pitcher y catcher; consecutivamente sobre cada una de ellas se aplicaron los diferentes algoritmos de minería de datos disponibles en la herramienta Microsoft Business Intelligence Development, luego de realizado el proceso de entrenamiento los modelos obtenidos con los algoritmos de Árboles de Decisión y Neurales obtuvieron un porcentaje aceptable en la predicción de cada uno de los perfiles buscados, siendo de un 91% de clasificaciones correctas para la variable de predicción Defensiva, para la variable de predicción catcher un 78% de clasificaciones correctas, para la variable ofensiva 82% de clasificaciones correctas y para la variable de predicción pitcher 81% de clasificaciones correctas. Posteriormente se procedió a desarrollar una aplicación en entorno web para el soporte de decisiones construido en base a los*

modelos obtenidos anteriormente, el mismo fue desarrollado en ASP.Net con uso de librería ADOMN.Net para las conexión a los diferentes modelos encontrados, una vez desarrollado el sistema se procedió a realizar la validación del modelo donde se obtuvo en promedio un 75% de clasificaciones correctas. Con los modelos conseguidos se pueden realizar consultas de predicción en la cual de acuerdo a los diferentes perfiles de los jugadores en formación se puede ayudar a definir cuál es su posición ideal.

Palabras claves: minería de datos, modelo, predicción, inteligencia de negocio, béisbol.

1. INTRODUCCION

1.1 Introducción al Problema

Los Criollitos de Venezuela es una corporación sin fines de lucro, establecida desde el año 1962 destinada a fomentar la recreación y el deporte en los jóvenes a través del béisbol. Para el funcionamiento de dicha corporación a nivel nacional, cuenta con sedes en cada estado las cuales se encargan de diseñar, idear, planificar y dirigir los torneos, entrenamientos y operatividad de la disciplina, actualmente presenta deficiencias en la calidad de los jugadores, planificación de entrenamientos, desarrollo de jugadores de alto rendimiento, conformación de selecciones, lo cual trae como consecuencia un retardo en el progreso y superación de dicha disciplina, así como también un gasto presupuestario sin ningún tipo de reconocimiento o logro a nivel nacional.

Por tal motivo se propone desarrollar una aplicación que genere la información necesaria para la toma de decisiones gerenciales de la organización en cuanto a su problemática y aplicación de nuevas directrices, buscando mejorar la ejecución de sus objetivos y aportar el conocimiento necesario para el mismo a través de técnicas de Minería de Datos aplicadas a antecedentes recolectados previamente de las Grandes Ligas de Béisbol (Major League Baseball), ya que estas poseen los estándares y cuantificaciones para el rendimiento a cumplir por los jugadores de esta disciplina. Para con esto encontrar las bases y parámetros necesarios para estandarizar un modelo con las características descriptivas o ideales de los jugadores por posición y ser aplicadas al béisbol menor en dicha corporación.

1.2 Descripción del Trabajo

1.2.1 Hipótesis

A partir de los datos históricos oficiales de las Grandes Ligas de Béisbol (MLB), ¿Es posible conseguir un modelo descriptivo y/o predictivo que se ajuste a los requerimientos y necesidades de las Ligas Menores de Béisbol del Estado Táchira, con el uso de técnicas de Minería de Datos a través de algunos algoritmos supervisados y no supervisados?

1.2.2. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un modelo descriptivo y/o predictivo para el Soporte de la toma de Decisiones en la Formación Deportiva de los Atletas de las Ligas Menores de Béisbol del Estado Táchira.

Objetivos Específicos

- Generar un mecanismo automatizado para la obtención y manejo de la data oficial manejada por las Grandes Ligas de Béisbol (MLB).
- Realizar el proceso de extracción, transformación y carga de los datos obtenidos.
- Conseguir un modelo descriptivo y/o predictivo aceptable a partir de las técnicas de Minería de Datos.
- Construir a partir del modelo descriptivo y/o predictivo un sistema de soporte de decisiones para la formación deportiva en caso de cumplir satisfactoriamente con el objetivo anterior.

2. METODOLOGIA

La investigación se desarrolla basada en la metodología de búsqueda de conocimiento en datos (KDD) utilizando técnicas de minería de datos, la fuente de datos son tomadas de la página web oficial de la Ligas Mayores de Béisbol (MLB). Se realizan los siguientes pasos, Vallejos [1]: Extraer los datos, Filtrado de los datos, Seleccionar las variables de estudio, Aplicación de las técnicas de minería de datos, Construir el sistema web con el mejor modelo conseguido y Validación del Modelo.

3. DESARROLLO Y RESULTADOS

3.1 Extracción y Filtrado de los Datos y Selección de las Variables de Estudio

La MLB maneja los datos de todos los jugadores profesionales del deporte que participan y han participado en su organización. Dichos datos van desde datos personales hasta datos específicos del rendimiento deportivo. Dentro del ámbito deportivo, se cuenta con los datos acumulados durante toda una temporada (1 año) conformada por 162 juegos por equipo, los cuales están clasificados en dos (2) categorías: defensivamente y ofensivamente. En las cuales respectivamente hay alrededor de unas ocho (8) estadísticas o variables. La página web "www.baseball-databank.org", pertenece a una organización sin fines de lucro, la cual presta a los usuarios los datos recopilados de la MLB a investigadores independientes sin fines comerciales. Para la obtención de los datos se creó un servicio web utilizando el protocolo SOAP, el mismo es desarrollado en plataforma .Net, donde se descarga la información de la página web y se almacenan en archivos de texto.

La información obtenida empieza desde principios de 1900, sin embargo dicha información no se encuentra totalmente procesable debido a la inconsistencia, datos nulos u otros tipos de ruido. Debido a esto, para fines de esta investigación primeramente son utilizados los datos a partir de 1954. Dichos datos son sometidos a un previo análisis y estudio para comprobar su validez, veracidad y congruencia. Seguidamente los mismos en primera instancia son reducidos por temporadas a partir de 1954 al 2010. Posteriormente los datos son depurados con la finalidad de eliminar y corregir datos inválidos, no congruentes y adecuados. Todo este proceso es logrado a través de sentencias SQL así como también las vistas generadas para homogenizar la data y facilitar el proceso de selección de variables.

Por otra parte, los datos de ciertas variables son sometidos a transformaciones para ser ajustados a las necesidades de los investigadores y algoritmos de minería de datos. La transformación numérica es realizada para que todos los algoritmos aplicados puedan procesarlas

(Bayes Naive, etc.) en las variables discretas: THROWS (Lanzar) y POS (Posición). Igualmente mediante sentencias SQL es aplicada la ley de Signos de la Multiplicación para cambiar los datos a valores negativos multiplicando por menos uno (-1) las variables numéricas: E, PB, WP, SB(Catcher), CS(Ofensiva), SO(Ofensiva), GIDP, L, ER, R(Pitcher), H(Pitcher), HR(Pitcher), BB(Pitcher), ERA(Pitcher), IBB(Pitcher), HBP, WHIP, OBA. Esto se realiza con la intención de ajustar los valores de las variables al comportamiento adecuado, debido a que la implementación de los algoritmos esta predeterminada a tomar los valores mayores como referencia positiva, para efectos de esta investigación mientras sean menores los valores de estas variables específicas aumenta el valor de la variable a predecir según el caso.

Una vez realizado todo este proceso, se crearon 4 vistas que corresponderán a los perfiles del estudio, *View_Definitiva_Defensiva*, Variables: Posición, A, E, PO, FPCT, Perc_Part, Experiencia, InnOuts, DP, Height, Weight, Lanzar, Prom_IO_G, *View_Definitiva_Ofensiva*, Variables: Experiencia, G, Height, Weight, AB, AVG, 2B, 3B, BATEAR, BB, CS, GIDP, H, HBP, HR, IBB, OBP, R, RBI, SB, SF, SH, SLG, G_Batting, Producción_Jugador, SO, TB, Contrib_Carreras. *View_Definitiva_Pitcher*, Variables: Experiencia, G, HEIGHT, WEIGHT, BB, H, HBP, HR, IBB, R, SO, BFP, CG, ER, ERA, GF, GS, IPOUTS, L, LANZAR, OBA, PGW, P_IxA, SHO, SV, W, WHIP, WP. *View_Definitiva_Catcher*, Variables: Experiencia, A, CS, DP, E, FPCT, G, GS, Height, Weight, InnOuts, Prom_IO_G, PB, Perc_Part, PO, SB, WP.

3.2 Uso de Técnicas de Minería de Datos

Para el estudio y aplicación de las técnicas de minería es utilizada la herramienta de SQL Server denominada Business Intelligence Development Studio®, donde son aplicados los algoritmos de: Arboles de Decisión, Reglas de asociación, Clustering, Bayes Naive, Redes Neuronales. Sobre el 80% de los datos para entrenamiento, dejando un 20% para realizar pruebas en cada una de las diferentes estructuras de minería en cada uno de los perfiles planteados que son Defensiva, Ofensiva, Pitcher y Catcher.

Al finalizar las pruebas realizadas con la herramienta Business Intelligence Development Studio® para cada una de las diferentes estructuras de minerías de datos planteadas, Definitiva Defensiva teniendo como variables de predicción: Asistencias, Errores, Porcentaje de fildeo, Puestos en outs, Posición, para el perfil Definitiva Catcher las variables de predicción: Asistencias, Caught Stealing, Errores. Porcentaje de Fildeo, Porcentaje de Participación, Puestos en Outs. Para el perfil Definitiva Ofensiva, se tiene como variables de predicción: Average, Contribución Carreras, Hits, Producción Jugador, Carreras Impulsadas y finalmente para el perfil Definitiva Pitcher se tiene las variables de predicción: Promedio Carreras Otorgadas por Juego, Perdidos, Promedio Innings lanzados por Aparición, Porcentaje de Juegos Ganados, Ponches Propiciados, Juegos Salvados, Juegos Ganados. Para cada una de las variables de predicción se realizó el entrenamiento con cada uno de los algoritmos mencionados anteriormente y se obtuvieron resultados satisfactorios (modelos con más de 75% de clasificaciones correctas) con el uso del algoritmo de Redes Neuronales en los casos de los modelos con las variables de predicción del perfil de Definitiva Pitcher (Promedio Carreras Otorgadas por Juego, Perdidos, Ponches propiciados y Juegos salvados), para las demás variables de predicción con el algoritmo de Arboles de decisión se obtuvieron los resultados satisfactorios, por tal motivo se procede a la construcción del modelo de soporte de decisiones.

3.3 Construcción del Sistema

Para la construcción del sistema se utiliza la herramienta de programación Visual Studio 2010®, codificado bajo el lenguaje C# en un entorno Web. Para el desarrollo de la aplicación se utiliza entre otras librerías, la librería ADO.Net (Active Data Object) la cual maneja la conexión a bases de datos relacionales y ejecución de consultas, la aplicación en si se utiliza para realizar consultas de los datos de entrada de cada uno de los modelos obtenidos por variables a predecir. Adicionalmente se utilizó la librería ADOM.Net (ADO.Net Multidimensional), la cual utiliza las implementaciones de ADO.Net pero se usa específicamente para conectarse con modelos de Minería de Datos de Analysis Services creados con la herramienta Business Intelligence Development Studio®, en el sistema Web desarrollado se utiliza la librería para realizar consultas de predicción a los modelos de minería de datos obtenidos, esto por medio de sentencias DMX en la cual dichas sentencias se construyen dinámicamente dependiendo de la predicción que desee realizar el usuario. El sistema facilita al usuario la realización de predicciones de todas las variables antes mencionadas en cualquiera de las estructuras de minería planteadas para un jugador cualquiera de alto rendimiento en la disciplina; adicionalmente se puede consultar los datos de entrenamiento pertenecientes a cada jugador con su respectiva variable de predicción y de esta manera observar la precisión del modelo obtenido en el estudio presentado.

3.4 Validación del Modelo

Para efectos de prueba y validación, se toma únicamente datos de jugadores venezolanos, recordando que el caso de estudio es para jugadores nacionales con un perfil de alto rendimiento. A continuación con los datos correspondientes del año 2011 los cuales no fueron tomados en cuenta para el entrenamiento de los modelos de minería de datos. Para cada perfil de predicción se realizaron pruebas con cada variable de predicción, entre los jugadores venezolanos que se tomaron están: Para la predicción defensiva Alex González, para la predicción ofensiva Miguel Cabrera, para la predicción de Catcher Miguel Montero y para la Predicción de Pitcher Félix Hernández.

Adicionalmente expertos de la Corporación Criollitos de Venezuela – Táchira utilizaron el sistema web para introducir los datos de entrada, verificar el cumplimiento de los requerimientos, la información generada para la toma de decisiones y evaluar el desempeño del sistema para la clasificación de los jugadores/peloteros pertenecientes a dicha corporación, realizaron pruebas con cada perfil de predicción a su vez con todas las variables de predicción.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el desarrollo de la investigación, se consigue que a través del algoritmo de Arboles de Decisión son encontrados los modelos que mejor se ajustan a las variables de predicción logrando clasificar con un alto nivel de precisión 19 de estas 23 variables de predicción y las 4 restantes a través de Redes Neuronales. En el transcurso de la obtención de los modelos de minería de datos, durante la etapa de preparación, se concluye que las variables más influyentes para cada una de las estructuras de minería planteadas son las calculadas: FPCT, Prom_IO_G, WHIP, OBP, entre otras, ya que generan una mayor contribución en el índice de predicciones precisas para los modelos.

Mediante la ayuda de expertos por parte de la Corporación Criollitos de Venezuela-Táchira, se determinó que las principales variables que ayudarían a la toma de decisión por estructura de minería de datos planteadas serían: "Posición" (Defensiva), la cual determina la posición más propensa al éxito del desempeño del jugador en el campo de juego, "Promedio de Innings por Aparición" (P_IxA, Pitcher), la cual sugiere la clasificación del pitcher (Abridor, relevo, cerrador, entre otros), "Porcentaje de Fildeo" (FPCT, Cárcher), la cual es indicador de la efectividad en el desempeño o actuación del jugador y por último el "Average" (AVG, Ofensiva) y la "Producción Jugador" (Prod_jugador, Ofensiva), las cuales expresan el rendimiento como bateador y el aporte en términos de carreras a su equipo.

Así mismo, sobre las pruebas realizadas a las estructuras de minería con los datos de los jugadores venezolanos, se concluye que de las veintitrés (23) variables a predecir se acierta en once (11) de ellas (verdaderos positivos) y se difiere en las restantes con un error mínimo de una clase o estrato de diferencia en cuanto a la matriz de clasificación (falsos positivos).

Finalmente con la construcción del sistema Web desarrollado se pueden llevar a cabo consultas de predicción, las cuales ayudarán a futuras tomas de decisiones; de igual manera generan un aporte de conocimiento con soporte en este estudio respecto al mejoramiento del rendimiento deportivo de los jugadores, así como también la formación de selecciones e incremento en su competitividad.

Se recomienda fomentar la recopilación y almacenamiento digital de datos y estadísticas a nivel nacional de las diferentes disciplinas deportivas, siendo de esta manera posible realizar estudios basados en esta data y de esta manera obtener patrones e información más veraz para el deporte venezolano en cuanto a la toma de decisiones y generación de conocimiento.

REFERENCIAS

- [1].Vallejos J., *Minería de Datos*, Trabajo de Adscripción. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. 2006.
- [2].Molina M., *Sistema de predicción de rendimiento semestral de los estudiantes de la Universidad Nacional Experimental del Táchira*. MSc. thesis Universidad de los Andes, Venezuela. 2.009.
- [3].Lewis M., *Moneyball: The Art of Winning an Unfair Game*. (2003). W. W. Norton 2003, 2.003.
- [4].Tang Z. & McLennan J., *Data Mining with SQL Server 2005*, Ed. Wiley, pp. 132 – 167, 187 – 207, 229 – 262, 343 – 373, 2.005.
- [5].Hernández J., Ramírez M. y Ferri C., *Introducción a la Minería de Datos*, Ed. Prentice Hall, pp. 137 – 351, 2.004.

GENERACIÓN DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO EN UN CENTRAL AZUCARERO MEDIANTE LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Colmenares G. Juan
González T. Fernando
Torres María
Ramírez P. Jesús

jccolmen@unet.edu.ve

fgtrejos@unet.edu.ve

mtorres@unet.edu.ve

jaramirez@unet.edu.ve

Programa de investigación computacional aplicada a termofluidos y estructuras, Universidad Nacional Experimental del Táchira
Av. Universidad, sector paramillo, Táchira-Venezuela

Resumen. *En la presente investigación, se caracterizó el proceso de erosión de las paredes de codos en centrales azucareras, a través de los cuales circula un fluido cargado con partículas sólidas. Se trabajó con el caso de los codos presentes en el Central Azucarero del Táchira CAZTA. Se observó que estos codos presentan gran deterioro de sus paredes debido a este efecto, hasta el punto en el cual se rompen y se presentan fugas de fluido. Para el estudio se utilizó una metodología descriptiva utilizando un diseño documental y de campo. Se utilizó la metodología de simulación numérica, por medio del software Fluent 6.3.2; el cual utiliza las ecuaciones de Navier Stokes promediadas con la definición del promedio de Reynolds (Ecuaciones RANS). En la interacción de las partículas sólidas con la fase de transporte y viceversa se utilizó un modelo de doble acople (two way coupling), y se utilizó el modelo de turbulencia k-ε. Se analizaron muestras de fluido que circula a través de los codos para determinar las características físicas de las partículas y algunas condiciones requeridas en la simulación, para luego realizar un análisis de sensibilidad de malla. Finalmente se realizó la simulación para obtener la tasa de erosión en kilogramos por cada metro cuadrado de superficie de pared del codo, valor que permite determinar el tiempo necesario para que se erosione todo el espesor de pared. Estos resultados permitieron proponer indicadores de mantenimiento que permitirían monitorear el estado de la pared del codo durante cada momento requerido,*

previando el posible momento de falla y programando mejor las actividades de mantenimiento. El resultado de la simulación numérica tiene un error del 20.83% con respecto al tiempo para falla suministrado por el departamento de mantenimiento de CAZTA.

Palabras Claves: simulación numérica, malla, tasa de erosión, indicadores de mantenimiento.

1. INTRODUCCIÓN

En una gran diversidad de procesos naturales e industriales se presenta flujo de líquidos que contienen partículas sólidas en suspensión. En el estudio de los cauces de los ríos se observa como éste cambia su forma en el tiempo, y es debido a que se presenta el efecto de erosión. Este efecto aumenta cuando aparecen partículas sólidas, las cuales son capaces de desgastar con mayor rapidez las paredes de los conductos que las transportan. En el campo industrial, existen diversas aplicaciones en las cuales se requiere el transporte de fluidos con sólidos en suspensión, entre ellas se pueden destacar la industria del cemento, la generación de energía hidroeléctrica, y la industria de la elaboración del azúcar refinado. Esta última merece atención especial, ya que en el estado Táchira se encuentra el Central Azucarero del Táchira (CAZTA), una de las más importantes centrales azucareras de Venezuela, y una industria que en su línea de producción posee diversos procesos que requieren el transporte de líquidos con partículas sólidas.

Se ha observado diversos inconvenientes en los dispositivos el transportar las partículas sólidas, tales como el deterioro acelerado de paredes de tuberías y accesorios, así como de impulsores de bombas que obligan con relativa frecuencia al departamento de mantenimiento a realizar paradas no programadas para solucionar fallas como ruptura de accesorios y fugas de jugo mezclado.

En la actualidad, gracias a potentes algoritmos computacionales y con el avance de la arquitectura del hardware computacional, es posible realizar simulaciones en donde se puedan representar las condiciones de funcionamiento de diversos elementos y, sin necesidad de ir a la realidad, predecir el comportamiento de diversas variables de interés.

Enmarcado en el uso de software de simulación computacional, en este trabajo se realiza la simulación del flujo de “jugo mezclado” en un codo de el central azucarero CAZTA, el cual ha presentado, en reiteradas ocasiones, fallas por ruptura debido a la erosión por partículas sólidas. Este estudio tiene la finalidad de estimar el tiempo de funcionamiento que pueda tener antes de fallar, de manera que el uso de la técnica aquí aplicada sirva de apoyo al departamento de mantenimiento de CAZTA para que éste pueda planificar con mayor eficacia sus actividades.

2. ECUACIONES BÁSICAS

2.1 Ecuaciones de Conservación de la masa y de la Cantidad de Movimiento

En la implementación de la metodología CFD aplicada a este estudio, se utilizan la ley de la conservación de la masa, de conservación del momento o segunda ley de Newton.

En el flujo a través del interior de un codo, considerando la interacción con partículas sólidas, las ecuaciones gobernantes utilizadas son la conservación de la masa Eq. (1) y la conservación del movimiento en cada uno de los ejes coordenados Eq. (2), Eq. (3) y Eq. (4) [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) \quad (4)$$

Para el presente estudio no se consideran los efectos de la gravedad, por lo tanto los términos fuente no se consideran.

2.2 Modelo de Erosión en paredes

Para el modelado del efecto erosivo de las partículas presentes en el fluido sobre la pared del codo, se utiliza la ecuación implementada por Fluent [2]:

$$R_{\text{erosión}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particulas}}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{\text{cara}}} \quad (5)$$

En donde $R_{\text{erosión}}$ corresponde a la tasa de erosión medida en kilogramos de material removido por cada unidad de área por unidad de tiempo; el cual es la variable a determinar. \dot{m}_p es el flujo másico de partículas en la tubería, $C(d_p)$, α , $f(\alpha)$, y $b(v)$ son elementos relacionados con la pared de la superficie, v es la velocidad relativa de la partícula, y A_{cara} es el área de la cara de la celda en la pared. Se consideran valores sugeridos por [3].

3. METODOLOGÍA

En la primera etapa del proceso de cálculo numérico, se define una malla computacional adecuada realizando un análisis de sensibilidad; para luego obtener la tasa de erosión y posteriormente estimar el tiempo que se requeriría para que, bajo ciertas condiciones, ocurra la falla en el codo. Este parámetro permitirá definir indicadores de mantenimiento que permitan al departamento de mantenimiento estimar el tiempo de falla.

3.1 Consideraciones para la simulación

Se considera la fase continua como Agua, y la fase discreta como Arena; se realizó un análisis físico para determinar la concentración de partículas sólidas. En el mismo se determinó a través de un promedio ponderado, que el tamaño de partículas es de 0,2126 mm. Se considera la densidad teórica para la arena de 2670 kg/m³.

El caudal del fluido estudiado es de 65m³/h (0,01805 m³/s), y las dimensiones del codo son las mostradas en la figura 1.

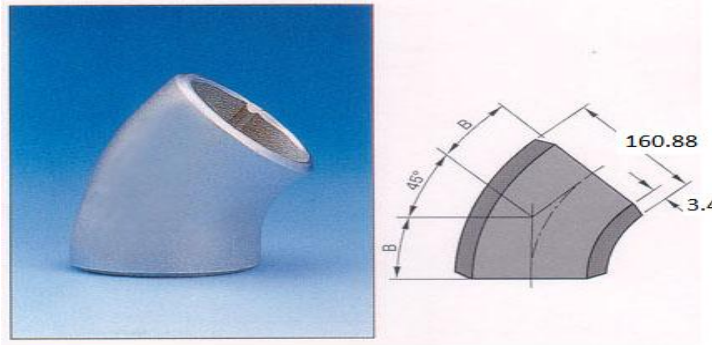


Figura 1. Dimensiones en milímetros del codo utilizado es este estudio.

Tomando en cuenta las dimensiones del codo, se tiene un diámetro interno de 154.08mm, esto implica que el área de sección transversal es de $0,01865\text{m}^2$, permitiendo luego obtener la velocidad cuyo valor es 0,9683 m/s; así mismo el flujo másico de partículas resulta ser 0,1232 kg/s.

Para realizar las simulaciones se toman en cuenta las siguientes consideraciones: El modelo de turbulencia utilizado es el k- ϵ (Standard y Realizable), se utiliza el modelo Langrangiano para la resolución de la fase discreta y la conservación de Euler para la fase continua (agua líquida). Se utiliza un modelo estocástico para la dispersión de las partículas en el fluido, incluyendo los efectos de las fluctuaciones de velocidad en el régimen turbulento. Se omiten las interacciones de las partículas entre sí; no se consideran cambios en la turbulencia debido a las partículas; se consideran todas las partículas como indestructibles y esféricas; no se considera ningún tipo de reacción química; no se considera modificación de la geometría del dominio debido a la remoción de material por efecto de la erosión; se consideran los efectos de cambios en velocidad y aceleración de las partículas sobre el fluido y viceversa; no se considera transferencia de calor; se considera el cambio de la trayectoria de las partículas debido al efecto de la fase continua sobre la fase discreta.

4. RESULTADOS

Al realizar las diversas simulaciones con la malla seleccionada, se puede observar la trayectoria de las partículas sólidas, tal como en la figura 2:

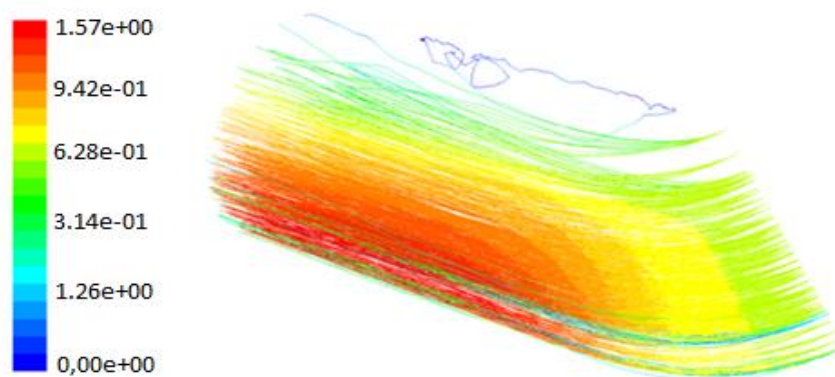


Figura 2. Trayectoria de las partículas sólidas y velocidades (m/s) en el codo.

Según [2], al dividir la tasa de erosión entre la densidad de la pared, se obtiene la velocidad de desgaste de la pared, que en las unidades utilizadas corresponde a metros/segundos; es decir, que se puede determinar el tiempo que tarda la pared en desgastarse por completo si se multiplica el espesor de la pared (e) por la densidad de la misma (ρ) y se divide entre la tasa de erosión (T_e), como se muestra en la Eq. (6):

$$t = \frac{e \cdot \rho}{T_e} \quad (6)$$

Para el presente estudio, la tasa de erosión máxima promedio resultante es de 1.49×10^{-6} kg/m²s, además se sabe que el codo es de acero al carbono cuya densidad es de 8000 kg/m³, y que el espesor de la pared del mismo es de 3.4mm, al sustituir en la ecuación 4 se obtiene un tiempo de 18255033 segundos para lograr desgastarse por completo la pared. Si se considera que la planta funciona 12 horas diarias durante 22 días al mes, se tiene entonces que el codo tardaría diecinueve (19) meses en romperse y por lo tanto presentar la falla que detendría el sistema de transporte de flujo mezclado. Por entrevista al personal de mantenimiento de la planta, el tiempo aproximado para el cambio de este codo es de dos años, evidenciándose una clara cercanía entre los valores suministrados por el departamento de mantenimiento y el tiempo que se obtiene en la simulación.

Se propone una modificación de la geometría del codo, donde se mantiene el ángulo de 45°, pero se cambia el radio de curvatura de 95,25mm a 400mm. Al realizar la simulación bajo las mismas condiciones del codo estudiado, se obtiene que la tasa de erosión disminuye a un valor de $1,01 \times 10^{-6}$ kg/m²s, esto implica una reducción de un 47,5% en dicha tasa, que se traduce en ese mismo porcentaje de aumento de la vida útil del codo. La figura 3 muestra la nueva geometría con los resultados de la tasa de erosión

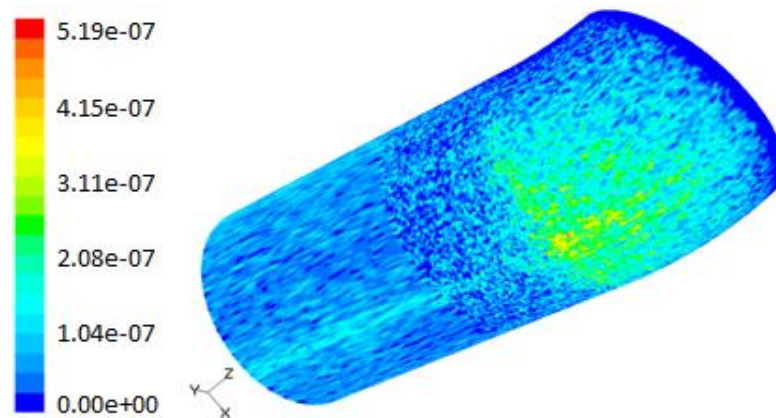


Figura 3. Resultados gráficos de la tasa de erosión en kg/m²-seg utilizando el codo con radio de curvatura modificado.

5. INDICADORES DE MANTENIMIENTO

En la tabla 1 se muestran algunos indicadores de mantenimiento propuestos en función de los resultados de la simulación numérica:

Tabla 3. Indicadores de mantenimiento propuestos

Nombre del indicador	Descripción	Ecuación
Tiempo de vida de pared (t)	Este indicador surge como resultado de una simulación utilizando software CDF, en donde se determine el tiempo de vida de una pared de una tubería o un accesorio antes de que ocurra rotura debido a la erosión	$t = \frac{e * \rho}{Te}$
Vida remanente de pared	Tiempo que se espera que dure una pared a partir de cierto instante. Se calcula como la resta del tiempo de vida de pared menos el tiempo que ha transcurrido desde el último recambio o reparación de la tubería y/o accesorio	$VRP = t - \text{tiempo transcurrido}$
Espesor remanente de pared	Espesor de la pared útil de codo restante después de transcurrido cierto tiempo de funcionamiento	$ERP = e - \frac{\text{tiempo transcurrido} * Te}{\rho}$
Porcentaje de vida restante de pared	Relación porcentual entre el espesor remanente de pared y/o accesorio y el espesor original	$PVRP = \frac{ERP}{e} * 100$

6. CONCLUSIONES

En el estudio de los dispositivos que manejan fluidos cargados con partículas sólidas en centrales azucareras, se ha observado que el deterioro de los mismos debido al efecto de la erosión, se puede caracterizar a través de la simulación numérica computarizada, encontrándose resultados cercanos a la realidad.

Se encontró que el modelo de turbulencia k-ε ofrece la mejor estabilidad en cuanto a la tasa de erosión, comparado con otros modelos de turbulencia, permitiendo concluir que éste es adecuado para este tipo de estudios.

Referencias Bibliográficas

[1]. Versteeg H K , Malalasekera W., *Introduction To Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Meth.* Longman Scientific & Technical, 1995.

[2]. Fluent. 6.3, *User's guide.*, Consultado desde el 14 de enero de 2010

[3]. J. K. Edwards, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi., *Evaluation of Alternative Pipe Bend Fittings in Erosive Service*, ASME FEDSM'00: Encuentro de verano de la división de Ingeniería de Fluidos. ASME2000, Boston, June 2000.

MODELOS DE CONOCIMIENTO PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DEL COLECTIVO DE LOS PLANES DE SALUD UNET, BASADOS EN LOS REGISTROS DE SINIESTRALIDAD

Bernal J., Mary C.

Bolívar M., Jesús W.

Darghan C., Enrique

Nimo P., Dahyana C.

mbernal@unet.edu.ve

jbolivar@unet.edu.ve

e_darghan@hotmail.com

dnimo@unet.edu.ve

Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Nacional Experimental del Táchira
Avenida Universidad, Paramillo, San Cristóbal, Estado Táchira-Venezuela

Resumen. *La presente investigación se enmarca en el área de administración de riesgos y describe la formulación de Modelos de Conocimiento basados en técnicas estadísticas y de minería de datos, para la identificación, evaluación y control de riesgos en un fondo autoadministrado de salud, específicamente que permitiera determinar la existencia de patrones de comportamiento del colectivo de los Planes de Salud UNET, a través de sus registros de siniestralidad, en un intento de describir la situación actual y comprender las fluctuaciones y desviaciones de la demanda de servicios. Para el entrenamiento y las pruebas, se utilizaron registros de siniestralidad almacenados en la Base de Datos del Sistema Administrativo Financiero de la UNET, los datos fueron extraídos a través de un proceso de extracción, transformación y carga, de donde se obtuvieron los registros de siniestralidad de los planes en el periodo 2006 – 2012. El estudio se enfocó en dos partes: predecir la cantidad de siniestrados de los planes a partir de los datos que describen a la población asegurada, determinando las clases de riesgo que mejor discriminan su comportamiento, y con base en el conocimiento de los factores que explican la variación en el número de siniestros, poder determinar, cuánto le cuesta a la administración atender a un siniestrado de cada clase de riesgo. Para su desarrollo fue aplicada la metodología KDD (Knowledge Discovery in Databases), el proceso de selección de las técnicas, se realizó de acuerdo con las características de los datos y su evaluación se llevó a cabo de manera incremental, utilizando diversas técnicas de minería, entre las que se pueden destacar: análisis de tablas de contingencia, el enfoque de regresión, redes bayesianas, árboles de decisión, redes neurales además de técnicas para el modelado de variables de recuento.*

Asimismo se trataron técnicas de metaclasificación y análisis sensible al costo para manejar los problemas de desbalanceo de clases presentes en los datos de estudio. Durante las pruebas de cada modelo se utilizaron registros de siniestralidad (2006 - 2011), a través de validación cruzada y datos segmentados en un 66% para entrenamiento y un 33% para pruebas, esto con el objetivo de evaluar comportamientos en términos de anualidades y cumplir con los criterios de calidad establecidos para interpretar los modelos obtenidos. Los resultados permitieron obtener modelos que se ajustaron (en diferente grado) y predicen la siniestralidad de los asegurados de acuerdo con la clase a la que correspondan, estas clases fueron determinadas en función de las variables tipo de personal, sexo y edad, las cuales resultaron ser las que mejor explican la variabilidad del número de siniestrados. Esta estimación sirvió para predecir el importe al que asciende el riesgo de siniestro que se encuentra en cada clase, tomando en cuenta las variables de población previamente determinadas y la variable tipo de siniestro.

Palabras Clave: Patrones de comportamiento, Minería de Datos, Knowledge Discovery in Databases, Tablas de Contingencia, Modelos de Recuento

1. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de conocimiento en base de datos brinda la posibilidad de hallar información útil, oculta en las multitudes de datos, en tal sentido la presente investigación se orienta a determinar elementos que podrían influir sobre la siniestralidad de los Planes de Salud UNET, que puedan permitir incluso realizar ajustes de la normativa y condicionado a partir de políticas consistentes, pretendiendo ayudar a la gerencia universitaria responsable de la administración directa de los mismos, a estimar o predecir la siniestralidad y comportamiento de los beneficiarios en el uso de los correspondientes servicios, midiendo su riesgo con mayor precisión, contribuyendo a mejorar los controles en el uso de estos servicios y determinando los posibles factores de riesgo a tener en cuenta para realizar la planificación anual.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se aborda el área actuarial específicamente de la Administración de Riesgos de una manera no tradicional, siguiendo la metodología propuesta por Fayyad, Piatetsky-Shapiro, & Smyth [1], para la extracción de conocimiento en bases de datos (KDD), cuyos pasos guiaron el desarrollo de las actividades realizadas para esta investigación: selección del objetivo, preproceso de datos, transformación, minado de datos e interpretación de los resultados. El proceso de selección de las técnicas, se realizó de acuerdo con las características de los datos y su evaluación se llevó a cabo de manera incremental. Las variables utilizadas son de origen categórico y durante el desarrollo de los modelos matemáticos fueron convertidas en variables ficticias (1 y 0) para su representación [2]. Una vez realizadas las pruebas se considera satisfactorio el (los) modelo(s) que tenga un 70% o más de predicciones realizadas correctamente, con un error bajo o aceptable.

3. DESARROLLO

La formulación del problema partió del estudio del proceso aleatorio S_t propuesto en [3], conocido como el proceso acumulado de los siniestros, este proceso se puede definir en función de dos variables aleatorias: N_t o número de siniestros ocurrido en el período $(0, t]$, y Y_t monto de

los siniestros ocurridos en el período $(0,t]$. Siguiendo la importancia de estas dos variables la estrategia de desarrollo estuvo dirigida a la obtención de dos modelos, uno que en una primera instancia permitiera estudiar cuales son las variables determinantes en los siniestros de los seguros de gastos médicos específicamente de los planes de salud UNET, lo cual sirve de insumo a la segunda parte del estudio que permite determinar las provisiones con las cuales debe contar la administración de los planes para cubrir el monto de la siniestralidad que presenta cada individuo de cada clase de riesgo determinada.

3.1 Modelo Número de Siniestrados por Clase de Riesgo

Para realizar la estratificación del riesgo es importante distinguir en primera instancia dos poblaciones, la que no conlleva riesgo, y la que sí lo hace. En este caso, el estudio se basa en la experiencia del número de siniestros, de modo que la población sin riesgo será la que no tenga siniestro, y la de riesgo la que tenga al menos un siniestro. Como la intención radica en identificar segmentos de usuario con siniestralidad similares, debían ser escogidas variables que describieran la población de estudio en general, tanto las afectadas como las no afectadas por siniestro, por esta razón las variables tomadas en cuenta para esta fase del estudio después de aplicar estrategias de recodificación y colapsado de categorías son: la edad cumplida por el asegurado en cada año de vigencia del seguro de gastos médicos estratificado en grupo etario E1 (0-25 años) E2 (26-44 años) E3 (45-64 años) E4 (mayores de 64 años), Sexo (**M**asculino y **F**emenino), Tipo de Personal (**D**ocente, **A**ministrativo y **O**brero), Parentesco (**T**itular, **C**onyugue, **P**adres e **H**ijos) y Estado Civil (Casado y No Casado).

Las primeras estrategias de búsqueda del modelo estuvieron enfocadas a estimar la probabilidad de ocurrencia de siniestro que se ha convertido en una variable dependiente dicotómica (presenta siniestro, no presenta siniestro) a partir de las variables independientes que puedan estar relacionadas con el hecho. Para esto se utilizaron los métodos de la Tabla 1.

Estas técnicas permitieron visualizar en su clasificación que de las variables estudiadas las que mejor discriminan la posibilidad de presentar o no siniestro es la edad, el sexo y el tipo de personal.

Tabla 1. Resultados Métodos de Clasificación

Técnica	Clase SI	Clase NO	Total	Estadístico Kappa	Área ROC
J48	22%	86%	63.7%	0.33	0.566
Perceptron Multicapa	20%	85%	62%	0.32	0.579
Red Bayesiana (TAN)	12%	87%	64.5%	0.22	0.602
Regresión Logística	15%	92%	64%	0.20	0.599

Los resultados una vez se aplicaron métodos de Coste Sensitivo para el balanceo de las clases de estudio, muestran que sólo el 64.507% de los casos son clasificados correctamente, sin embargo se manejan coeficientes de concordancia (estadístico Kappa) muy pobres y errores de clasificación muy elevados para ser considerados como modelo predictivo. Por lo tanto se utilizó análisis de tablas de contingencia para el manejo de variables categóricas, que permitió enfocar el estudio en función de tablas de frecuencia de siniestrados y no siniestrados.

Para el análisis de tablas de contingencia, se utilizaron los recuentos correspondientes a cada uno de los años de estudio, con esto se obtiene el comportamiento de cada combinación de variables anualmente manteniendo un histórico de su comportamiento durante los seis años de

estudio. La medición del suceso de interés se basó en dos tipos de indicadores [4]: **Cifras absolutas**, las cuales dan una idea de la magnitud o volumen real del suceso, como lo es el número de siniestrados; y **Tasas**, que están compuestas por un numerador que expresa la frecuencia con que ocurre un suceso y un denominador dado por la población que está expuesta a tal suceso. En este estudio representado por la variable tasa de siniestrados.

Con base en lo expuesto anteriormente y tomando en cuenta que para obtener el número de asegurados a siniestrarse, debían estimarse variables discretas con valores no negativos se utilizaron Modelos Lineales Generalizados. Se empleó la regresión de Poisson [5], para determinar las razones de tasas de incidencia, con el debido ajuste por cada una de las variables socio demográficas identificadas. Es importante resaltar que en el análisis preliminar de la data, no se determinó una sobredispersión (varianza considerablemente superior a la media) de los datos del estudio de siniestrados, ni una presencia excesiva de ceros en las variables de conteo, lo cual permitió cumplir los supuestos para la aplicación de un modelo de regresión de Poisson para datos de recuento. El modelo de regresión de Poisson es utilizado en este estudio como un método de regresión múltiple para datos de una cohorte con desenlace dicotómico y uno o más predictores categóricamente definidos. El modelo especifica que, la magnitud de la tasa es una función exponencial de una combinación lineal de covariables y parámetros desconocidos tal como se expone en la Ec. (1):

$$Tasa = e^{(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k)} \quad (1)$$

Esta ecuación puede ser reformulada como el logaritmo de la tasa, que es la variable dependiente de una función lineal, luciendo como la Ec. (2):

$$\log(tasa) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (2)$$

La ecuación anterior corresponde a una transformación logarítmica de una variable de desenlace (una tasa en este caso) relacionada con una ecuación lineal de predictores. Si la tasa se descompone en sus dos componentes (número de siniestrados en el numerador y número de asegurados en el denominador) la Ec. (2) puede ser reformulada de la siguiente manera, ver Ec. (3)

$$\text{Log}(siniestrados) = b_0^* + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (3)$$

En la ecuación (3) el logaritmo asegurados se incorpora compensado en términos estadísticos al intercepto del predictor lineal múltiple y la variable desenlace ahora es un conteo, número de siniestrados (transformados en logaritmos). En función de las ecuaciones formuladas, se construyó un modelo de regresión de Poisson a fin de ajustar las tasas según las variables que resultaron estadísticamente significativas. A continuación, y tras introducir las variables en el modelo, se realizó la prueba de la razón de verosimilitudes (likelihood ratio test) para determinar las variables que debían permanecer en el modelo final. Las variables cuyos coeficientes de regresión no fueron estadísticamente significativos se excluyeron del modelo. Por lo tanto el modelo encontrado que mejor se ajusta a los datos, cuenta con las variables tipo de personal, sexo y grupo etario como las que mejor describen la variabilidad en la tasa de siniestrados. En la siguiente tabla (Tabla 2) se muestra el análisis del desvío del modelo en conjunto:

Tabla 2. Análisis de Desviación Modelo de Regresión de Poisson

Fuente	Desviación	G.L	P-Valor
Modelo	6409.11	6	0.0000
Residuos	779.287	137	0.0000
Total	7188.39	143	
Porcentaje de desviación explicado por el modelo = 89.1591			
Porcentaje ajustado = 88.9643			

Como se aprecia en la tabla anterior, el desvío del modelo ajustado es 6409.11, que representa la reducción en la incertidumbre al incorporar en el modelo las 3 variables categóricas mencionadas (6 variables ficticias dicotómicas), frente a un modelo saturado que considera tantos parámetros como observaciones. Asimismo el p-valor del ajuste del modelo es 0.000, indica que la inclusión de las variables reduce significativamente la incertidumbre, por tanto, por lo menos una de las variable incluidas en el modelo está asociada con la tasa de siniestrados. También se obtuvo el valor del coeficiente de determinación, el cual indica que el 89.15% de la variación en el número de siniestrados está explicada por las variables incluidas en el modelo. La ecuación del modelo ajustado se muestra en la Ec. (4):

$$\hat{y} = e^{(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6)} \quad (4)$$

Dado que el p-valor para el modelo en la tabla del Análisis de la Desviación es inferior a 0.01, se considera un buen ajuste estadístico entre las variables del modelo al 95% de nivel de confianza. Por otra parte como en las pruebas de efecto del modelo se aprecia un p-valor para cada variable inferior a 0.01 a un 95% de confianza, no se elimina ninguna variable del modelo. Por lo tanto resulta un buen modelo para la estimación de siniestrados.

3.2 Modelo Monto de Siniestralidad por Clase de Riesgo

Una vez obtenida la estratificación del riesgo, se trabajó con las variables sociodemográficas y las propias del siniestro para predecir el importe al que pueden ascender las indemnizaciones para un siniestrado de cada clase de riesgo. Por tratarse de estimación de variables numéricas continuas (Bs. de indemnizaciones por asegurado) se utilizan técnicas predictivas estadísticas y de minería de datos acordes a la estimación de este tipo de atributos [6]. Para este modelo se trabaja con la población total que presentó siniestro en los seis años de estudio. Se utilizó como variable dependiente el monto invertido por siniestrado en cada año y como variables independientes: edad, sexo y tipo de personal, además de la variable Tipo de Siniestro codificada en: Cirugía/Emergencia Ambulatoria, Tratamiento Médico/Permanente, Cirugía/Emergencia Hospitalización. Los resultados de las pruebas aplicadas se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados Pruebas Predicción Monto de Siniestralidad

Algoritmo	Coef. Corr.	Error media abs.	Error absoluto relativo
Regresión Lineal	0.7935	637.3392	31.6409%
IBK	0.7489	680.5437	39.6726%
M5P	0.7535	657.1105	38.2571%

El coeficiente de determinación del modelo de Regresión Lineal, indica que se explica el 72.84% de la variabilidad del monto. Por lo tanto se considera un modelo adecuado para determinar monto de siniestralidad de acuerdo con los criterios de validación establecidos. Además de ser el que resulta más sencillo de implementar. Por lo tanto se acepta como válido para la estimación del monto por cada siniestrado, quedando el modelo expresado por la ecuación:

$$\text{Monto Siniestrado} = \beta_0 + \beta_1 \text{ Sexo} + \beta_2 \text{ Tipo de Personal} + \beta_3 \text{ Edad} + \beta_4 \text{ Tipo de Siniestro} \quad (5)$$

El cual contando con la cantidad de siniestrados, estimada en cada clase del modelo anterior, contribuye a establecer cuanto debe pagar la administración del seguro por atender a cada siniestrado, dependiendo en la clase que se encuentre. Es importante destacar que dichas estimaciones de cada clase junto con las variables del siniestro tipo de personal son las que mejor describen el comportamiento de la siniestralidad a nivel de costos entre todas las variables estudiadas.

4 RESULTADOS

Para evaluar los modelos encontrados fueron utilizados los registros de siniestralidad desde 2006 a 2011, los cuales fueron sometidos a validación cruzada y datos segmentados en un 66% para entrenamiento y un 33% para pruebas de predicción. Una vez evaluados los resultados, se propuso la validación del modelo encontrado con información de un periodo distinto a los involucrados en la fase de prueba. Este periodo corresponde a los meses de registro de siniestralidad del año 2012. Los resultados estimados por el modelo fueron aceptables en función de que se aproximaban a la tendencia que sigue la siniestralidad para este año.

REFERENCIAS

- [1]. Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., & Smyth, P. (1996). From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. *Artificial Intelligence Magazine* , 17 (3), 37-54.
- [2]. Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., & Black, W. (2007). *Análisis Multivariante*. España: Prentice Hall.
- [3]. Cruz, E. (2009). *Teoría de Riesgo. Riesgo actuarial. Riesgo financiero*. Bogota: ECOE
- [4]. Merino, T. (2007). *Medidas de Frecuencia*. Recuperado: Junio de 2012, de Universidad Católica de Chile: <http://escuela.med.puc.cl/recursos/recepidem/insIntrod9b.htm>
- [5]. Mccullagh, P., & Nelder, J. (1991). *Generalized Linear Models*. Chapman y Hall.
- [6]. Witten, I., & Frank, E. (2000). *Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Second Edition. Morgan Kaufmann.

LA HIPERTENSIÓN ARTERIAL EN VENEZUELA Y SUS FACTORES DETERMINANTES. RECOMENDACIONES DE POLÍTICAS PÚBLICAS Y DE GESTIÓN TECNOLÓGICA.

Rodrigo Mijares-Seminario

Héctor Herrera

rmijares@usb.ve

haherrera@usb.ve

Departamento de Procesos Biológicos y Bioquímicos. Universidad Simón Bolívar (USB). Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas, Venezuela.

Elena Rincón-Osorio

erincon58@gmail.com

Unidad de Políticas Públicas de la USB

Luis Azpurua

lazpurua@gmail.com

Director Médico del Hospital San Juan de Dios de Caracas. Calle C de Valle Arriba.

Yudey Rodríguez

yrodrig@usb.ve

Departamento de Ciencias Sociales de la USB.

Resumen. Objetivo: *Determinar la prevalencia y los factores determinantes fundamentales de la Hipertensión Arterial, para formular recomendaciones de políticas públicas y de gestión tecnológicas más pragmáticas, que logren su disminución en la sociedad venezolana. Métodos:* *Se realizó una revisión sistemática de la literatura en las bases de datos PubMed y LILACS. Los criterios de inclusión fueron: HTA, Venezuela y riesgos. Se escogieron artículos publicados en cualquier idioma, sin límite de tiempo. Resultados:* *La prevalencia del HTA en la zona rural es de 33%; en la zona urbana oscila entre 24 y 31%; en los niños y adolescentes es 2,5%, Los trabajos evidenciaron que los factores modificables que influyen en la aparición de la HTA, en la población venezolana, son la obesidad y las dislipidemias en gran medida. En cuanto a los no modificables se encuentran los antecedentes familiares, la raza y la edad. Igualmente los determinantes socio-económicos y la utilización de las instituciones de salud tienen influencia. En la gestión tecnológica se están implementando encuestas anuales en la población para la toma de decisiones poblacionales, en Venezuela ese esfuerzo ha sido realizado por las universidades públicas pero por su alto costo no son sistemáticas. Conclusiones:* *Incentivar estudios de prevalencia más multicéntricos; los estudios deben ser regulares en el tiempo (estudios longitudinales) para describir el aumento o no de la prevalencia; Debido a que los*

recursos públicos no son infinitos para resolver la problemática planteada, se requiere que la política pública tenga prioridad en los siguientes factores determinantes: el sobre peso, la obesidad y los trastornos de los lípidos sanguíneos. Para el seguimiento clínico se recomienda la medición de la circunferencia de la cintura. En cuanto a la tecnología es la de sistematizar encuestas a nivel nacional.

Palabras claves: hipertensión, Venezuela, factores determinantes

1. INTRODUCCIÓN

La hipertensión arterial (HTA) es una enfermedad no transmisible, generalmente asintomática que afecta a un gran porcentaje de la población adulta y genera daños a órganos nobles como corazón cerebro y riñón. Según la Organización Mundial de la Salud [1], la HTA como enfermedad no transmisible, será una de las causas principales de discapacidad funcional en las próximas dos décadas. Por tal motivo, la HTA es un problema de salud pública debido a su magnitud, los riesgos, la dificultad en la gestión, los altos costos médicos y sociales y las graves complicaciones cardiovasculares y renales [2]. Para el año 2008, la HTA afectaba a más del 40% de los adultos mayores de 25 años a nivel mundial [3], y que se espera aumente en un 60% los casos de enfermedad en 2025 debido al aumento y envejecimiento de la población [4].

2. MARCO CONCEPTUAL Y METODOLOGICO.

Una caracterización precisa de la prevalencia la HTA en un grupo poblacional específico es esencial para que se implanten políticas de intervención capaces de optimizar la aplicación de los recursos tecnológicos existentes [5]. En el campo de la salud, los determinantes son un conjunto homogéneo de variables que tienen el potencial para generar protección o daño, es decir, condicionan la salud [6-7].

Metodología: La Revisión de la literatura se realizó en dos bases de datos: LILCAS y PubMedline entre el 01/04/2013 y el 04/04/2013. En la RSL se analizaron en total 92 trabajos y se redujeron a un análisis detallado 20, siguiendo los criterios de selección y de exclusión de la literatura seleccionada.

3. RESULTADOS

En la RSL se analizaron en total 92 trabajos y se redujeron a un análisis detallado 20, siguiendo los criterios de selección y de exclusión de la literatura seleccionada. En la tabla 1 se evidencia en forma general las principales características de los trabajos evaluados.

Tabla 1. Análisis de las publicaciones de Venezuela

Características	Venezuela
Fechas de publicación	8 artículos se publican entre 2008-2012 [10-17]; 9 artículos del 2000-2007 [18-25]; 3 entre 1985-1999 [26-28].
Objetivo de los artículos	5 artículos analizan la prevalencia del HTA y los factores determinantes; 7 analizan los factores y la aparición de una EC; 5 caracterizan la

	prevalencia del Síndrome Metabólico; 2 sobre obesidad y los factores determinantes; y uno estudia el factor genético en el HTA.
Nivel geográfico del estudio	12 artículos se refieren al área urbana; 5 estudian la urbana y la rural; y 3 a la rural. En cuanto a las regiones donde se realizaron esos estudios: 5 artículos se realizaron en el Estado Lara; 5 en el Zulia; 4 en Carabobo; 2 en el Táchira; y un solo artículo en Cojedes, Mérida, Miranda y Trujillo.
Edad o condición	La mayoría no coincide en la edad de la población en estudio, por lo que nos obliga agruparlos: 3 artículos ≥ 15 años; 5 artículos ≥ 18 ; 7 artículos ≥ 20 ; 3 artículos entre 20 y 89 años; y 2 artículos para todas las edades.
Tipo de investigación	18 son estudios tipo transversal y 2 longitudinal. Las de tipo longitudinal son las realizadas por ASCARDIO en el Estado Lara en 1987 y 1997 a los mismos hogares encuestados, con el mismo objetivo [19-20].
Cantidad de encuestados en la muestra	11 artículos entre 30 y 450 encuestados; 1 entre 500 y 1.000; 6 entre 1.100 y 9.000; 2 entre 10.000 y 20.000
Encuesta y examen clínico	19 trabajos realizan la encuesta y un examen médico; Un trabajo se basa en la revisión de historias clínicas
Base de datos utilizadas	Los estudios realizados en ambulatorios y hospitales utilizan muestras que van de 70 a un máximo de 360 encuestados. Hay un trabajo que estudia la relación genética de 150 familias con respecto al HTA [26]. Las encuestas por hogares la desarrollan 6 artículos; tres se basan en la base de datos de ASCARDIO [7,19,20]. Un trabajo a nivel urbano [17], otro a nivel estatal [18]. Sus instrumentos tienen preguntas similares a la de una historia clínica, algunos agregan la raza del encuestado. Su muestra es de 1.986 a 15.000 encuestas. Hay una excepción, el trabajo de Mary et al [10] que se ocupa de 38 hogares existentes en un poblado.

Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones: En la RSL se analizaron en total 92 trabajos y se redujeron a un análisis detallado 20. El análisis se divide en dos partes: a) Un análisis general de los trabajos; y b) otro sobre los resultados y políticas que se derivan de los trabajos.

a) En el análisis general de los trabajos analizados se determina lo siguiente: coinciden en la edad de la población en estudio para expresar la prevalencia de HTA; La mayoría (35%) analizan los factores determinantes y la aparición de una EC; A nivel geográfico los trabajos recoge datos de la región Centro Occidental del País (80%). Dentro de ella la región más estudiada es la urbana (60%); El tipo de investigación más común es la transversal (90%); La cantidad de encuestados en la muestra, las más utilizada es la de 30 a 450 encuestados (55%); Las encuestas que se realizan son acompañadas con un examen médico (95%); Los estudios en su mayoría provienen de las universidades públicas (65%); ningún artículo recoge información sobre las características y composición del hogar, las viviendas y servicios conexos, gastos del hogar,

salud, educación, condición de empleo, ingreso y productividad de los que autoreportan su condición de padecer HTA.

b) Resultados de los artículos y sus recomendaciones de políticas públicas y de gestión tecnológica: Al analizar los trabajos según el tiempo de su publicación (1985-1999, 2000-2007, y 2008-2012) se pudo evidenciar aproximaciones en sus resultados. Para un mejor alcance se juntaron en trabajos realizados en las zonas rurales, urbanas, a nivel de Estado y estudios exclusivos para niños y adolescentes.

En la zona rural de Carabobo y Cojedes la prevalencia es en promedio 33%, siendo la obesidad medida en la circunferencia de la cintura el mejor predictor de enfermedades cardiometabólicas. Desde 1985 la prevalencia del HTA en el área urbana de los Estados Zulia, Carabobo, Mérida Dto Capital y Táchira se encuentra entre 24% y 31%. En cuanto a los factores de riesgo de las enfermedades cardiometabólicas coinciden en la obesidad abdominal, HTA, tabaquismo y la dislipidemia. Los trabajos publicados entre 1985 y 1999 sugieren que hay un 20% que desconoce tener HTA, y que el origen de esa enfermedad es fetal, y la prevalencia se incrementa con la edad. La prevalencia del HTA a nivel de todo el Estado Lara fue en promedio del 26%. Lo preocupante es que la pre-hipertensión aumento de 27% a 46%, siendo el grupo más joven el que presentó la situación más desfavorable, al aumentar de 37 % a 49 % Sin embargo la prevalencia del HTA en el Zulia es aproximadamente el 40%. Los factores de riesgo de las enf. Cardiometabólicas son: HTA, obesidad, sedentarismo, raza hispana-negra, y dislipidemias

La prevalencia del HTA para niños y adolescentes del sector urbano del Estado Trujillo y Lara es de 2,5 %. Los factores de riesgo más importantes fueron hipercolesterolemia e hipertrigliceridemia, al percentil 97.

Recomendaciones: Como se puede inferir en esta investigación, son múltiples los factores que influyen en disminuir la prevalencia del HTA, por lo tanto en forma general las recomendaciones son las siguientes: Incentivar estudios de prevalencia más multicéntricos a nivel nacional; Estos estudios deben ser regulares en el tiempo (estudios longitudinales); Esta información sería relevante para el Ministerio del Poder Popular para la Salud ya que puede contribuir a la difusión de este estudio y así contribuir a mejorar el Programa Nacional de las EC; Debido a que los fondos no son infinitos para resolver esta problemática planteada, se requiere que se comience por la obesidad y los trastornos de los lípidos sanguíneos.

REFERENCIAS.

[1] World Health Organization. The World Health Report 2002: reducing risks, promoting healthy life. Geneva: World Health Organization 2002.

[2] Chobanian AV, Bakris GL, Black HR, Cushman WC, Green LA, Izzo JR. JI, et al. The Seventh Report of the Joint National Committee on Prevention, Detection, Evaluation, and Treatment of High Blood Pressure: the JNC 7 report. JAMA. 2003; 289:2560-72.

[3] World Health Organization. A global brief on Hypertension. Geneva, Switzerland April 2013. Kearney PM, Whelton M, Reynolds K, Muntner P, Whelton PK, He J. Global burden of hypertension: analysis of worldwide data. Lancet. 2005; 365: 217-23.

[4] Cassani R, Nobre F, Pazin Filho A and Schmidt A. Prevalência de fatores de risco cardiovascular em trabalhadores de uma indústria brasileira. Arq. Bras. Cardiol. 2009; Vol.92, n.1, pp. 16-22.

- [5] Organización Mundial de la Salud. Health Canada 2000. Salud de la población. Conceptos y estrategias para políticas públicas saludables. Washington, D.C. 2000.
- [6] Infante E. Prevalencia de factores de riesgo para enfermedades cardiovasculares en el Estado Lara-Venezuela, (2008). Tesis doctoral presentada en la Universidad Autónoma de Barcelona-España, para optar al título de Doctora en Salud Pública. 2010
- [7] Méndez-Chacón Ericka, Santamaría-Ulloa Carolina and Rosero-Bixby Luis. Factors associated with hypertension prevalence, unawareness and treatment among Costa Rican elderly. BMC Public Health. 2008; 8:275. Disponible en: <http://www.biomedcentral.com/1471-2458/8/275>.
- [8] Barros, Marilisa Berti De Azevedo; Zanchetta, Luane Margarete; Moura, Erly Catarina De and Malta, Deborah Carvalho. Auto-avaliação da saúde e fatores associados, Brasil, 2006. Rev. Saúde Pública. 2009; Vol.43, suppl.2, pp. 27-37
- [9] Mari Andreína, Marval Yanetxy, Suárez Ana Karina, Arteaga Everilda, Martínez Elisa, Bastidas Gilberto. Síndrome metabólico en individuos de una comunidad rural. ActaMed Colomb. Octubre-Diciembre 2012; Vol. 37 N° 4, pp 177-182 .
- [10] Tirado Mery, Suárez Francys. Presencia de factores de riesgos asociados a Síndrome metabólico en la población de Guaica - Venezuela, en el período Junio - Julio 2011. Revista ANACEM. 2012; Vol.6 N°1 pp. 33-37.
- [11] Paramio A, Cala J, Tasset C. Hipertensión arterial y obesidad en un barrio del municipio Cárdenas Estado Tachira. Venezuela. Revista Habanera de Ciencias Médicas 2010;9(2) 254-262
- [12] Querales Marvin; Ruiz Nelina; Rojas Susan y Espinoza Milagros. (2011) Nivel de conocimiento sobre factores de riesgo cardiovascular en una comunidad de Naguanagua, Venezuela. Rev. salud pública. Vol.13, n.5, pp. 759-771 .
- [13] Becerra A, Torres A, Arata-Bellabarba G, Velázquez-Maldonado E. (2009) Prevalencia del síndrome metabólico en la población urbana de Mucuchíes, Mérida-Venezuela. Rev Venez Endocrinol Metab 7(3): 16-22.
- [14] Ruiz-Fernández N, Espinoza M, Barrios E y Reigosa A. (2009). Factores Cardiometabólicos en una Comunidad de Valencia, Venezuela. Rev. salud pública. 11 (3): 383-394.
- [15] Sandoval R, Vásquez L, Rodríguez M, Torres M, Paredes R, Vásquez L. Prevalencia de hipertensión arterial y dislipidemias en escolares y adolescentes en Valera Estado Trujillo-Venezuela. Gac Méd Caracas. 2009;117(3):243-249.
- [16] Bermúdez V, Pacheco M, Rojas J, Córdova E, Velázquez R, Daniela Carrillo, María G. Parra, Alexandra Toledo, Roberto Añez, Eneida Fonseca, Rafael París Marcano, Clímaco Cano, José López Miranda. Epidemiologic Behavior of Obesity in the Maracaibo City Metabolic Syndrome Prevalence Study. 2012. PLoS ONE 7(4): Disponible en: <http://www.plosone.org/article/info:doi/10.1371/journal.pone.0035392>

[17] Flores H, Silva E, Fernández V, Ryder E; Sulbarán T, Campos G, Cálmon G, Clavel E, Castillo S, Goldberg R. Prevalence and risk factors associated with the metabolic syndrome and dyslipidemia in White, Black, Amerindian and Mixed Hispanics in Zulia State, Venezuela. *Diabetes Research and Clinical Practice*. 2005; Volume 69, Issue 1 , Pages 63-77.

[18] Granero R, Finizola B, Infante E, y Salas J. (2002). Obesidad en el “Estudio de la Salud Cardiovascular del Estado Lara” (ESCEL), Venezuela 1987 y 1997. *Avanc Cardiol*. 22(3):61-68.
Granero R, Finisola B, e Infante E. (2004). Tendencias en hipertensión arterial en el “Estudio de la Salud Cardiovascular del Estado Lara” (ESCEL), Venezuela 1987 y 1997. *Avances Cardiol*. 24(3):85-89.

[19] Falcón Pérez B, Falcón Vásque B, Yépez González A. Riesgo Cardiovascular y Metabólico en una Población selectiva. Estudio CAMERISEP. *Rev Venez Endocrinol Metab*. 2007; 5 (2): 8-15.

[20] Moreno Peña L, Hernández Hervís I, Moreno Peña R, García Peñate G, González Mendoza RS. Infarto agudo del miocardio en centros de diagnóstico integral. Municipio San Francisco. Zulia. Venezuela. *Rev méd electrón*. 2007; Vol. 33, No. 2. Disponible en URL: <http://www.revmatanzas.sld.cu/revista%20medica/ano%202011/vol2%202011/tema07.htm>
Núñez R, Peña A, Pacheco B, Sánchez M, Rivera M. Obesidad en pacientes adultos del Municipio Sucre del Estado Miranda. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica* 2006; Volumen 25, número 2, pp 64-66

[21] Pereira A; Molina S; Henríquez H. Prevalencia de hipertensión arterial en pacientes con diabetes mellitus tipo 2 en el Hospital Padre Justo de la ciudad de Rubio durante el período 1996-2001. *Col. med. estado Táchira*. 2003; 12(2): 3-7.

[22] Ryder E, Silva E, Sulbarán T, Fernández V, Campos G. Black hispanics have a worse cardiovascular risk profile than mixed Hispanics in Venezuela. *Invest Clin*. 2007; 48(1): 45 – 55.
Sukerman E, Guardia M, Aragonés A. La hipertensión arterial en padre e hijos de pacientes hipertensos. *Gac Méd Caracas* 1998;106(1):25-29.

[23] Hernández R, Chacón L, Hernández A, Agueror, Hernández G, Armas M, Armas M, Guerrero J. Estudio de la Prevalencia de la Hipertension Arterial En Barquisimeto, Venezuela. *Boletín Médico de Postgrado*. 1994; Vol. X N° 3
http://bibmed.ucla.edu.ve/EDOCS_PSM_UCLA/BM1003/BM100311.pdf

[24] Orellana K. (1985). Estudio Epidemiologico la Hipertension Arterial en Barquisimeto. *Boletin Medico de Postgrado*. Vol.1, No. 1. Enero-Marzo, 1985. Disponible en: http://bibmed.ucla.edu.ve/EDOCS_PSM_UCLA/BM0101/BM010103.pdf

LECCIONES GERENCIALES Y DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA EN LA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LA ATENCIÓN EN UN SERVICIO DE CARDIOLOGÍA: ESTUDIO DE CASO EN CARACAS-VENEZUELA

Rodrigo Mijares-Seminario.

rmijares@usb.ve

Departamento de Procesos Biológicos y Bioquímicos. Universidad Simón Bolívar (USB) .
Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas, Venezuela.

Elena Rincón-Osorio

erincon58@gmail.com

Unidad de Políticas Públicas de la USB

Luis Azpurua

lazpurua@gmail.com

Director Médico del Hospital San Juan de Dios de Caracas. Calle C de Valle Arriba.

Rosa Reyes

rereyes@usb.ve

Departamento de Biología de Organismos de la USB.

RESUMEN: *El objetivo de la investigación fue evaluar la efectividad medida en la calidad y la cobertura, de acuerdo con el Programa Cardiovascular, la atención prestada a los pacientes con Infarto Agudo al Miocardio en un servicio de cardiología durante el período 1990 – 2009. Se diseñó un estudio longitudinal con instrumentos validados por la Sociedad Venezolana de Cardiología. Se pudo conocer la calidad percibida en uno de los años estudiados, y durante 20 años, la tecnología médica, los procesos médicos para atender los pacientes y los riesgos que implican estar hospitalizados dentro de la institución de salud. Los resultados evidenciaron que luego del aumento de la cobertura en 167%, a partir del año 2005, hubo una caída del 46% de la calidad de atención (proceso médico). La disminución de la calidad de la atención fue debido a la imposición de un aumento de la cobertura en el Hospital sin consultar los actores fundamentales y sin mejorar los procesos institucionales (sistema de información, planificación, distribución de los recursos y evaluación).*

Palabras claves: Calidad de la atención. Cobertura. Infarto Agudo al Miocardio.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque la mortalidad por enfermedad coronaria (EC) ha venido disminuyendo en algunos países de forma constante [1], en Venezuela se mantiene un aumento en las mismas. En el caso de las cardiopatías isquémicas ésta presenta una TEM de $75,8 \times 100.000$ habitantes [2]. Para el mejoramiento de esta problemática se desarrolla el Programa para EC, donde especifica que para mejorar las condiciones de salud de los pacientes con IAM, se deben asumir las normas de la *American College of Cardiology* y la *American Heart Association* (ACC/AHA) y las referidas por la Sociedad Venezolana de Cardiología (SVC) [3], su cumplimiento vamos a denominar “medicina por evidencia”. Para conocer cómo se comporta la calidad de la atención cuando aumenta la cobertura de un Servicio de Cardiología (SC), caso del Hospital Militar “Dr Carlos Arvelo” de Caracas (HMDCA), se realiza una evaluación a la atención prestada a los pacientes con infarto agudo al miocardio (IAM).

Por tal motivo, el objetivo de la investigación fue la de evaluar la calidad vs la cobertura del SC del HMDCA, a la atención prestada a los pacientes con IAM de acuerdo con los criterios del Programa Cardiovascular durante el período 1998 – 2009.

2. MARCO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO.

Calidad de la atención médica: Donabedian [5] propuso una clarificación de la técnica para evaluar la calidad a través de los análisis de estructura (25%), proceso (75%) y resultado. Ahora bien, la calidad de los servicios de salud tiene dos grandes dimensiones: la calidad técnica, y la calidad percibida por los usuarios [6]. La calidad técnica consiste en la aplicación de la medicina por evidencia (en el caso del IAM es la aplicación de los protocolos de la ACC y AHA) y la tecnología médica de modo que rinda los máximos beneficios para la salud, sin aumentar de forma proporcional los riesgos (ver figura 1)

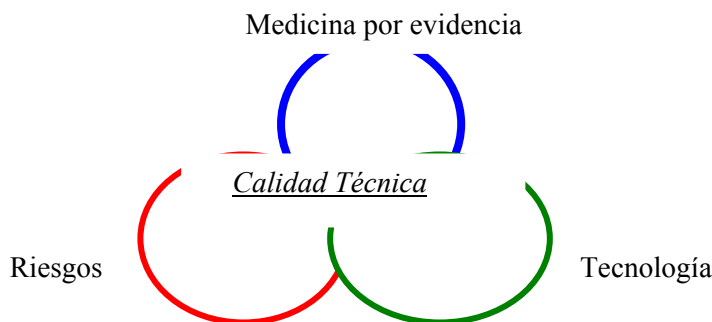


Figura 1: Aspectos fundamentales de la calidad técnica. Donabedian [5]

El subsector salud del Ministerio del Poder Popular para la Defensa (MPPD)

La Dirección General de Salud Militar (DGSM) del MPPD es la dependencia rectora en materia de salud dentro del MPPS, cuya función es establecer las políticas y estrategias que garantizan el cuidado integral de la salud al personal militar y sus familiares amparados por la ley, como lo estipula el artículo 8 de la Ley Orgánica de Seguridad Social.

A partir de los nuevos planes de salud establecidos por el gobierno del presidente Hugo Chávez, se incorporó a los hospitales militares a la Misión Barrio Adentro (MBA). Esto trajo como consecuencia un crecimiento en la cobertura, generando la saturación de los mismos,

debido a que permanecieron con las mismas capacidades (opinión del Director de la DGSM, Díaz 2010). Lo expuesto anteriormente deriva en una demanda del personal de pacientes no afiliados a esos centros de salud (ver figura 2).



Figura 2. Fuente: División de Planificación y Presupuesto de la Dirección General de Salud Militar.

Esta situación se refleja en la prestación de los servicios de salud, ocasionando insatisfacción de los pacientes y dificultad para garantizar la salud del venezolano (ver figura 3).

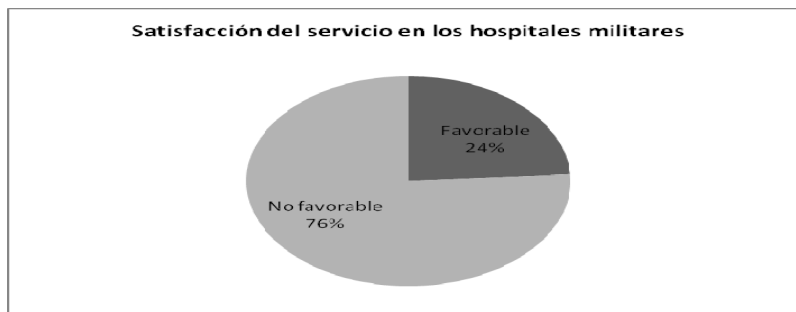


Figura 3. Fuente: División de Salud de la Dirección General de Salud Militar (encuesta realizada entre 2005-2006).

La metodología se analiza en la tabla 1.

Tabla 1 Métodos.

Características	Medicina por evidencia	Tecnología Riesgo	hospitalario
Unidad de análisis	Pacientes con IAM	Espacio y equipos del SC	Los desechos hospitalarios
Tipo de diseño	Retrospectiva		
Levantamiento de la información	Indirecta: el cuerpo residente del SC.	Directa: el investigador	

Período evaluado	Estudio longitudinal 1990-2009		
Normas	ACC/AHA [4]		Manejo de desechos hospitalarios [19]
Criterio	Efectividad medida en la calidad técnica y la cobertura		
Instrumentos	Williams, et al., 2006 [21]	Abarca una tecnología básica Es avalado por la SVC	Elaborado por Mata, Reyes y Mijares [19]
Cuantificación del instrumento.	Muy bueno: cumple la normativa en un 95% o más; b) bueno: entre un 80% y un 95%; c) regular: entre un 80% y un 70% ; d) malo: entre un 70 y 50%; e) muy malo, cumple con menos del 50%. Para determinar el valor de la calidad técnica se siguen los fundamentos de Donabedian. El promedio de los valores que se tengan de la tecnología y el riesgo hospitalario, van a representar el 25% de su valor. Posteriormente, se obtiene el 75% del valor del proceso médico. La suma de esos dos valores es el porcentaje total de la calidad técnica.		
Cobertura	Información suministrada por la Oficina de Estadística y de Historias Médicas del Hospital Militar “Dr. Carlos Arvelo”.		
Nivel de atención	Tercer nivel de atención o especializada		

Fuente: elaboración propia. Abreviaturas: SV C: Sociedad Venezolana de Cardiología; SC: Servicio de Cardiología.

3. RESULTADOS

Para la cuantificación del cumplimiento de las normas establecidas por la ACC/AHA especificado en la metodología se intentó realizar la auditoría llamada “muestreo irrestricto aleatorio” (Universidad Central de Venezuela, 1994). Este método otorga a cada historia médica una probabilidad igual de quedar incluida en la muestra y con su ayuda la selección de una muestra estadísticamente representativa, se reduce solamente a evaluar a aquellas historias que la conforman. El método recomienda que una buena muestra pudiera ser del 4% o hasta el 3% (el estudio incluyó más del 5% de las historias clínicas por año).

Este método de selección aleatoria de las historias médicas no se pudo realizar debido a que el 47% de las historias clínicas seleccionadas no se ubicaron¹. Igualmente llama la atención la disparidad en la cantidad de pacientes atendidos, especialmente en el año 2005 con siete (7) pacientes. Para el investigador es una pérdida de información en los registros del HMDCA. La situación se debe a las siguientes limitaciones, a saber²: incorrecta clasificación de las historias médicas, espacio reducido y tecnología obsoleta; La Comisión Técnica del Hospital no cumple con lo establecido en la normativa³ sobre la auditoría médica, puesto que las historias no son

¹ Se solicitó al Departamento de Registros Médicos la lista por año del número de pacientes egresados del Hospital con diagnóstico por IAM. La lista contiene el número de la historia clínica, días de hospitalización, y fecha de egreso. Con esa lista el investigador selecciona las historias a ser evaluadas. Al no conseguirse el número de historias seleccionadas es que el investigador asegura que el 47% de las historias no se ubicaron.

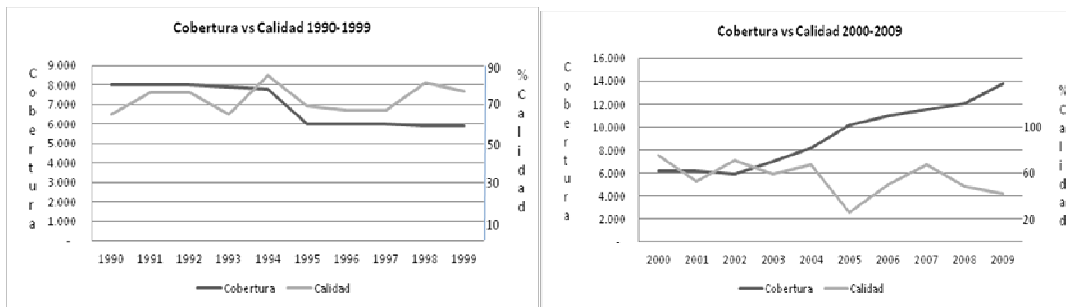
² Información recabada en el Departamento de Registros Médicos del HMDCA

³ En el Código de Deontología Médica en su artículo 171 ordena un sistema de auditoría médica permanente.

evaluadas; En 1990 se trasladaron al sub-sótano del Hospital una cantidad importante de historias médicas, muchas se dañaron debido a las inundaciones y filtraciones de agua que presenta dicho sector; En 1999 la Comisión de Epidemiología recomendó que se quemaran las historias restantes.

Por tal motivo se seleccionaron las historias médicas de aquellas que aun permanecían en el archivo móvil. No obstante, se siguió cumpliendo el orden cronológico de la investigación. Las historias fueron evaluadas por un grupo de tres profesionales del HMDCA, liderados por un médico residente III de la especialización de cardiología.

Luego del análisis se determina que el primer período (grafica 6) la cobertura estuvo entre 6.000 y 8.000 hospitalizados con un promedio de 7.000. La calidad para ese periodo oscila entre 65 y 80%, con un promedio de 73%. Este primer período se caracteriza por que son atendidos los militares y afiliados con derecho. El segundo periodo (ver grafico 7), desde el 2000 al 2004 se comporta igual que el primer periodo; es desde el 2005 cuando la cobertura comienza a incrementarse alcanzando los 14.000 hospitalizados, la media es de 11.700 hospitalizados. La calidad oscila entre 25 y 67%, con una media del 46%. Comparando los dos períodos, se observa un crecimiento en el segundo período (2005-2009) en cuanto a la cobertura en la hospitalización en un 167% y con respecto al promedio de la calidad, esta disminuyó en un 63%. Pensamos que influye el aumento del ingreso, especialmente a partir del 2005 si n mejorar los procesos básicos institucionales como son: el sistema de información, planificación, presupuesto y evaluación (inexistente para el momento de la investigación).



Gráfica 6. Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Las EC han venido disminuyendo en los países desarrollados. En el caso de Venezuela, esta presenta una de las mayores TEM de AL y lo preocupante es que va en ascenso, especialmente el IAM. El Sistema de Salud Venezolano tiene un programa para las EC, específicamente el tratamiento del IAM mediante los protocolos derivados de la ACC/AHA. En el marco conceptual se determinó que la efectividad medida en la calidad y la cobertura es uno de los criterios más importantes para esa evaluación. Debido a la ausencia de un organismo en Venezuela que evalúe la calidad de la atención médica, la investigación recomienda y desarrolla el concepto de calidad técnica. Por tal motivo, se evalúa el SC del HMDCA en cuanto al cumplimiento de la medicina por evidencia, el riesgo y su tecnología e incorpora la cobertura. El estudio abarca desde 1990 al 2009, dividiéndose el estudio en dos períodos bien diferenciados.

Los resultados evidencian que la calidad técnica ha disminuido de 72% en 1991; 68% en 2002 y 50% en el 2009.

Pensamos que disminución de la calidad técnica del SC es debido a la imposición de un aumento de la cobertura del HMDCA. Esta orden no fue acompañada con las mejoras en los procesos institucionales básicos como son: el sistema de información, planificación, presupuesto y evaluación.

Recomendamos esta metodología para mejorar los servicios de cardiología del país.

REFERENCIAS

- [1] Manderbacka K, Elovainio M. La complejidad de la asociación entre posición socioeconómica e IAM. *RevEspCardiología*. 2010; 63: 1015-8
- [2] Organización Panamericana de la Salud. Situación de salud en las Américas. Indicadores básicos. 2009. Washington, D.C. EE.UU.
- [3] Ministerio de Salud. Normas para el manejo y tratamiento de las enfermedades cardiovasculares prioritizadas. Actualización del 2006. Caracas. Venezuela.
- [4] Asociación Financiera- Gestión-Evaluación de las Colectividades Territoriales de Francia. Évaluation des politiques publiques. Les Éditions de L'Épargne. Francia. AFIGESE-CT 2001. P 10.
- [5] Donabedian A. Evaluating the Quality of Medical Care. *Milbank Mem Fund Q*. 1966; 44: 166-206.
- [6] Ross A; Cevallos J; Infante A: La calidad y la reforma del sector de la salud en América Latina y el Caribe. *RevPanam Salud Pública/Pan Am J Public Health*. 2000; Volumen 8, Números 1/2, pp. 93-97.
- [7] Mata A, Reyes R, Mijares-Seminario R. Manejo de desechos hospitalarios en un Hospital Tipo IV de Caracas, Venezuela. *Interciencia*. 2004; V. 29, No. 2, pp. 89-93.
- [8] Mijares R, Lara L, Della P, y Rincón E. Gestión tecnológica en un Ministerio de Salud: Caso Venezuela. *Rev. Sanidad Militar México*. 2004; 58 (6), pp. 434-442.
- [9] Walter C A strange form of declaring a health emergency: the case of Venezuela. *Medical Journal World*. December 2009; Vol. 55, No. 4, pp. 157-159.
- [10] Mijares R. Sistema Logístico de Mantenimiento para el Hospital Militar "Dr. Carlos Arvelo". Trabajo de grado para optar a la Maestría en Gerencia Logística de la Universidad Politécnica de la Fuerza Armada de Venezuela (IUPFAN). Caracas-Venezuela. 1995
- [11] Della Valle P. Aspectos tecnológicos de un modelo para la atención de pacientes cardiopatas. Tesis de post grado para optar al título de Ing. Biomédico. Universidad Simón Bolívar. Venezuela. 2002.

MÉTODO Y RESULTADOS EN LA CERTIFICACIÓN DE EQUIPOS MÉDICOS Y PARAMÉDICOS.

Luis Lara Estrella*

Ricardo Silva

Rodrigo Mijares-Seminario

Leicy Andreyna Hernández.

rjsilvab@gmail.com

rmijares@usb.ve

andreyna85@gmail.com

Departamento de Procesos Biológicos y Bioquímicos. Universidad Simón Bolívar (USB).
Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas, Venezuela.

Ruben Lugo

Zaida Sierra

rubendlugo@gmail.com

zsierra@usb.ve

Laboratorio de Biociencias Integradas adscrita al Laboratorio D de la USB.

Resumen. *Se consideraba que todo equipo o material de uso en medicina humana debe estar sujeto a registro y control por parte de las autoridades sanitarias del país de origen. Esto con el fin de garantizar que dicho equipo o material sea "seguro y efectivo". En Venezuela, el registro y control está regulada por la resolución No. DM-001 0-99 de fecha 21/09/1999 (Gaceta Oficial No. 36.843 del 3/12/1999). En su Artículo 1, la resolución establece que: "Toda persona jurídica legalmente constituida en Venezuela interesada en fabricar, importar, comercializar o prestar servicios de mantenimiento de materiales y equipos de uso en los niveles del área de la salud, debe previamente inscribirse en el Registro Sanitario Nacional. Método: el Artículo 4 establece que: "Los materiales y equipos utilizados en el área de la salud humana deben ser registrados en la Dirección correspondiente del Ministerio con competencia en Salud, contemplada en el Artículo 1° de esa Resolución." Entre los recaudos exigidos para la obtención de dicho registro, el interesado debe presentar una Certificación*

de Calidad expedida por una institución acreditada (Artículo 6, numeral f). Entre estas instituciones acreditadas se encuentra la Universidad Simón Bolívar. El Método utilizado se afianza en: a) La seguridad de que un equipo o material médico no comprometa la salud del ciudadano bajo ninguna circunstancia; y b) Su efectividad dependerá de que cumpla las funciones para las cuales fue diseñado y construido, de acuerdo a las especificaciones técnicas del fabricante. Por otra parte, con el fin de asegurar el servicio posventa de un equipo o material médico, la empresa representante o vendedor del equipo, debe contar con la infraestructura necesaria para honrar la garantía y ofrecer repuestos y servicio técnico en caso de ser requerido. Resultados: la USB ha realizado aproximadamente más de 5000 certificaciones, teniendo con tacto permianente con más de 50 Empresas Nacionales e Internacionales. Conclusión: con la finalidad de cumplir el Registro y Control de Materiales y Equipos Médicos, la USB ha diseñado una metodología para realizar la certificación. Sin embargo, en estos momentos se está realizando una revisión sistemática de la literatura para encontrar elementos conceptuales y metodológicos que actualicen y mejoren lo realizado hasta ahora. Igualmente la USB ha presentado a las Sociedades Científicas Médicas y a las autoridades del Ministerio de Salud una metodología para certificar servicios médicos.

Palabras claves: registro y control de materiales y equipos médicos; certificación; seguridad; efectividad.

1. INTRODUCCIÓN

Internacionalmente se considera que todo equipo o material de uso en medicina humana debe estar sujeto a registro y control por parte de las autoridades sanitarias del país de origen, esto con el fin de garantizar que dicho equipo o material sea "seguro y efectivo".

En Venezuela, el registro y control de materiales y equipos médicos está regulada por la resolución No. DM-001 0-99 de fecha 21 de Septiembre de 1.999 (Gaceta Oficial No. 36.843 del 3/12/1999) [1].

En su Artículo 1, la resolución establece que: "Toda persona jurídica legalmente constituida en Venezuela interesada en fabricar, importar, comercializar o prestar servicios de mantenimiento de materiales y equipos de uso en los niveles del área de la salud, debe previamente inscribirse en el Registro Sanitario Nacional que al efecto lleva la Dirección de Regulación y Control de Materiales, Equipos, Establecimientos y Profesiones de la Salud, adscrita a la Dirección General Sectorial de Contraloría Sanitaria."

Por su parte, el Artículo 4 establece que: "Los materiales y equipos utilizados en el área de la salud humana deben ser registrados en la Dirección correspondiente de este Ministerio contemplada en el Artículo 1° de esta Resolución."

Entre los recaudos exigidos para la obtención de dicho registro, el interesado debe presentar una Certificación de Calidad expedida por una institución acreditada (Artículo 6, numeral f) [1].

Con el fin de satisfacer esta legalidad, el Estado Venezolano cuenta con instituciones calificadas, que disponen de infraestructura y personal especializado, las cuales pueden garantizar los procesos que permitan emitir el debido certificado, basados en el principio antes expuesto de "seguridad y efectividad". Entre estas instituciones se encuentra la Universidad Simón Bolívar (USB).

La seguridad de un equipo o material médico está sujeta a que no comprometa la salud del ciudadano bajo ninguna circunstancia y su efectividad, dependerá de que cumpla las funciones para las cuales fue diseñado y construido, de acuerdo a las especificaciones técnicas del fabricante (es decir, que el equipo haga lo que debe hacer). Constituyéndose estos dos aspectos en elementos de juicio suficientes para emitir el certificado de calidad.

Por otra parte, con el fin de asegurar el servicio posventa de un equipo o material médico, la empresa representante o vendedor del equipo, debe contar con la infraestructura necesaria para honrar la garantía y ofrecer repuestos y servicio técnico en caso de ser requerido, para lo cual deberá suministrar toda la información correspondiente.

2. MÉTODO.

El Método se realizó luego de un análisis de las principales entidades que a nivel internacional ejecutan estas actividades. Una de las principales es la *U.S. Food and Drug Administration* (U.S. FDA)[2]. Una de las seis oficinas de la FDA es el Centro de Equipos y Salud Radiológica que tienen dentro de sus responsabilidades: la aprobación previa a la comercialización de nuevos dispositivos médicos; establecer estándares de fabricación y normas de funcionamiento; y realizar informes de seguimiento de mal funcionamiento de los dispositivos [3].

Otra guía fundamental son las Normas ISO 9000. Las normas ISO 9000 son normas de "calidad" establecidas por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) que se componen de estándares y guías relacionados con sistemas de gestión, aplicables en cualquier tipo de organización y de herramientas específicas como los métodos de auditoría (el proceso de verificar que los sistemas de gestión cumplen con el estándar). Su implementación en las empresas, aunque supone una cierta dedicación, ofrece una gran cantidad de ventajas [4].

Actualmente, en los sistemas reguladores de dispositivos médicos del mundo coexisten dos enfoques para garantizar la calidad, ellos son: Sistemas de Gestión de la Calidad (SGC) basados en la norma internacional ISO 13485:2003 [5] y las normativas de Buenas Prácticas de Fabricación [6]. La ISO 13485 ha sido adoptada por las agencias reguladoras de Europa, Canadá, Australia y Japón, entre otros países. En MERCOSUR y en los EEUU prevalece el enfoque de las Buenas Prácticas de Fabricación (BPF), compatibles con la ISO 13485 en su edición anterior de 1996.

Aunque la ISO 13485 sea una norma independiente, ella está basada en la ISO 9001 (Oficina Nacional de Normalización, 2008) y sigue el formato de esa norma para la conveniencia de los usuarios. Los cambios están vinculados al cumplimiento de los requisitos regulatorios para los equipos médicos armonizados internacionalmente. Como resultado, la norma incluye algunos requisitos específicos para los equipos médicos y excluye algunos de los requisitos de la ISO 9001, que no han sido considerados apropiados como requisitos regulatorios. Las dos normas tienen diferencias fundamentales. La propia ISO 13485 en su Anexo B (informativo), da una justificación detallada para las diferencias entre ambas normas.

3. RESULTADOS.

Los resultados se dividen en: a) método implementado por la USB para entregar el Certificado de Calidad; y b) Cuantificación de los trabajos realizados.

Método implementado por la USB

La Documentación exigida para la obtención del registro sanitario de productos, materiales y equipos médicos importados es la siguiente [1]:

- Registro Sanitario de la Empresa.
- Certificación de Libre Venta del producto a registrar, expedida por las autoridades del país de origen.
- Poder para importar, fabricar o registrar en Venezuela, emitido por el propietario del producto y otorgado a la empresa solicitante del Registro Sanitario.

- Certificación del cumplimiento de las buenas prácticas de manufactura expedida por la Autoridades competentes del país de origen.
- Certificación de pruebas analíticas y/o clínicas que comprueben la calidad y eficacia de las características de escritas del producto, realizadas en el país de origen, anexando protocolos de calidad, estabilidad y/o actividad que garanticen la conservación del producto, según el caso.
- Certificación de Calidad (ver páginas siguientes) y protocolo de los análisis, de acuerdo a la comprobación satisfactoria de las características del producto, expedida por una de las Instituciones acreditadas por el Ministerio de Salud y Desarrollo Social.

La Universidad Simón Bolívar, como institución calificada para certificar equipos médicos y paramédicos, le hace llegar por este medio los requisitos que deben cumplir la persona o empresa solicitante de este tipo de servicio.

El procedimiento

El Procedimiento para solicitar la certificación de calidad por parte de la USB:

1.- El interesado podrá obtener toda la información referente a este servicio a través de la Fundación de Investigación y Desarrollo (FUNINDES) de la USB o del Laboratorio de Biociencias Integradas adscrita a la Laboratorio D de la USB.

2.- El interesado deberá suministrar toda la información referente a la empresa solicitante:

- Nombre de la Empresa
- Persona a contactar
- Dirección y teléfonos de la empresa
- Capacidad técnica
- Lista de los equipos a certificar con su respectiva documentación técnica (catálogos y hojas técnicas)
- Estimación de precio de venta aproximado

3.- También se debe suministrar las características de la empresa fabricante de cada uno de los equipos a ser evaluados:

- Nombre de la Empresa
- Dirección y teléfonos de la empresa
- Áreas de desarrollo
- Capacidad técnica

4.- En caso de que el o los equipos cuenten con un certificado de su país de origen (Ej. FDA-USA), la solicitud deberá ser acompañada de la documentación referente a la certificación internacional.

5.- Para la expedición del Certificado por parte de la USB, es necesario que el equipo se encuentre operativo en Venezuela con el fin de constatar su operatividad por parte de nuestros especialistas. Si el equipo no se encuentra en Venezuela y la documentación presentada satisface los requisitos exigidos, procederemos a emitir un certificado provisional y una recomendación para su importación, dirigida al ente oficial respectivo. Una vez que el equipo ingrese al país y se encuentre operativo, se procederá a la visita técnica y se suministrará el Certificado definitivo.

6.-Para la expedición de Certificado BPM. La gestión de calidad de una empresa está basada en primer lugar, en las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), que asimismo son el punto de partida para la implementación de otros sistemas de aseguramiento de calidad, como el sistema de Análisis de Riesgos y Control de Puntos Críticos (ARCP ó HACCP) y las Normas de la Serie ISO 9000, ISO 13485.

7.- Si la persona o empresa solicitante no dispone de la documentación mencionada en el párrafo 3, o si el equipo es de fabricación nacional, y existe la norma para la certificación del

equipo y de sus accesorios, la podrá adquirir a través de Fondo Norma, en el Edificio de Fondo Común, Avenida Andrés Bello, Caracas y remitirla a nuestras oficinas. Nuestros especialistas procederán a su estudio para definir el protocolo o conjunto de ensayos requeridos.

8.- Si además de no poseer la documentación requerida, tampoco existe la norma legal correspondiente, procederemos a establecer nuestro propio protocolo y realizar las pruebas respectivas.

9.- Si los documentos presentados son válidos, o si es factible iniciar los procedimientos, luego de una evaluación exhaustiva de su contenido y constatado que contiene todos los elementos de juicio suficientes, se dará inicio al proceso de certificación, lo cual le será notificado al interesado.

Procedimiento para la certificación de calidad: En el caso de la certificación de calidad de equipos médicos, el mismo debe garantizar dos características, la seguridad y la efectividad del mismo.

Se entiende por Seguridad el hecho de que el equipo no debe someter al paciente a riesgos adicionales a los propios del procedimiento implicado. NORMA ISO 14971:2007. Mientras que efectividad implica que el dispositivo debe realizar la función para el cual fue diseñado y construido, dentro de las especificaciones técnicas del fabricante (no del usuario). Igualmente se realizará una visita a la empresa con la finalidad de comprobar la dirección fiscal, ubicación, procesos de ingreso administrativo, proceso de ensamblaje de ser el caso, proceso de manufactura de ser el caso, observación de la calidad de atención al usuario

Exigencias de Buenas Prácticas de manufactura

Las buenas prácticas de manufactura pretenden incorporar principios fundamentales que deben regir los procesos de fabricación y dentro de esas exigencias, se muestran los siguientes aspectos:

- Que los procesos de fabricación deben encontrarse escritos, definidos y que se revisen sistemáticamente a la luz de la experiencia.
- Los equipos estén calificados y los procesos validados.
- Que se cuenten con los recursos necesarios para la correcta elaboración de medicamentos, dispositivos o equipos.
- Personal entrenado y apropiadamente calificado para controles en proceso.
- Instalaciones y espacios adecuados.
- Servicios y equipamientos apropiados.
- Rótulos, envases y materiales apropiados.
- Instrucciones y procedimientos aprobados.
- Transporte y depósito apropiados.
- Que los procedimientos estándares de operación (SOPs) se redacten en un lenguaje claro e inequívoco, que sean específicamente aplicables a los medios de producción disponibles.

Cuantificación de los trabajos realizados: la USB ha realizado aproximadamente más de 5000 certificaciones, teniendo contacto permanente con más de 50 Empresas Nacionales e Internacionales.

CONCLUSIÓN:

Con la finalidad de cumplir el Registro y Control de Materiales y Equipos Médicos, la USB ha diseñado una metodología para realizar la certificación. Sin embargo, en estos momentos

se está realizando una revisión sistemática de la literatura para encontrar elementos conceptuales y metodológicos que actualicen y mejoren lo realizado hasta ahora. Igualmente la USB ha presentado a las Sociedades Científicas Médicas y a las autoridades del Ministerio de Salud una metodología para certificar servicios médicos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Registro y Control de Materiales y Equipos Médicos. Gaceta Oficial No. 36.843 del 3/12/1999. Disponible en la página web:
http://www.avedem.com.ve/site/images/stories/pdfs/Normativa_vigente_Registro_Sanitario.pdf
- [2] U.S. Food and Drug Administration. Disponible en: <http://www.fda.gov/>
- [3] Food and Drug Administration. Disponible en:
<http://www.fda.gov/aboutfda/enespanol/default.htm>
- [4] Normas ISO. Disponible en: http://www.qualityteam-2.consulting.com/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=58
- [5] Norma ISO 13.485. Disponible en:
<http://www.nqa.com/esp/atozservices/article.asp?SECTION=1034&ARTICLE=1078>
- [6] Norma de las Buenas Prácticas de Fabricación. Disponible en:
<http://apps.who.int/medicinedocs/documents/s18835es/s18835es.pdf>

ANÁLISIS DE LOS REQUERIMIENTOS DE INTEROPERABILIDAD PARA LA HISTORIA CLÍNICA ELECTRÓNICA DE ACUERDO AL MARCO DE INTEROPERABILIDAD VENEZOLANO

Leicy Andreyana Hernández

Rodrigo Mijares-Seminario

andreyana85@gmail.com

rmijares@usb.ve

Departamento de Procesos Biológicos y Bioquímicos. Universidad Simón Bolívar (USB).
Valle de Sartenejas, Baruta, Caracas, Venezuela.

Resumen

La Historia Clínica Electrónica (HCE), facilita la gestión de los sistemas de salud, a su vez, permite el manejo de grandes volúmenes de información en un espacio físico reducido gracias a la utilización de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC's), apoyando la optimización en la gestión de los servicios de salud. Las TIC's permiten el manejo informatizado de los sistemas de salud fundamentándose en el uso de estándares que garantizan la interoperabilidad, la cual se define como la capacidad de procesar e intercambiar información entre sistemas informáticos. Actualmente en Venezuela se cuenta con un Marco de Interoperabilidad (MIO) con el cual se han realizado pruebas piloto en algunos organismos nacionales. **Objetivo:** Analizar los requerimientos de Interoperabilidad para la Historia Clínica Electrónica de acuerdo al Marco de Interoperabilidad Venezolano versión 1.0 publicado en el año 2011. **Metodología:** Los pasos a considerar para llevar a cabo el objetivo principal son los siguientes: (a) Conocer las bases de interoperabilidad en Venezuela en materia de e-Salud; (b) Elaboración de un cuestionario con el fin de conocer la situación actual en el país en cuanto a e-Salud se refiere; (c) Comparación de los requerimientos de interoperabilidad definidos por el MIO con los adaptados en otros países. **Resultados:** Actualmente en Venezuela se han realizado pruebas piloto significativas con el MIO en algunos organismos nacionales; en el sector salud no ha ocurrido de la misma manera, hasta los momentos las experiencias han sido pocas. **Conclusión:** la propuesta de la investigación incluye el análisis de las iniciativas y políticas que se han establecido en materia de e-Salud en Venezuela, ya que éstas se consideran la base fundamental para el posterior análisis de los requerimientos de Interoperabilidad para la Historia Clínica Electrónica de acuerdo al mencionado marco Venezolano.

Palabras claves: Políticas en e-Salud; Historia clínica electrónica; Interoperabilidad.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el área de la salud ha experimentado avances significativos, gracias a la aplicación de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC's). Las mismas se consideran un apoyo fundamental, ya que comprende una serie de herramientas que pueden ser adaptadas de acuerdo a los requerimientos presentados en los servicios de salud. Por otra parte, se considera que para lograr una utilización óptima de las TIC's en el área de la salud, es necesario tener como base, las políticas sanitarias establecidas en una nación. A través de estas, es posible conocer las necesidades que presenta la sociedad y así, el planteamiento de iniciativas para la aplicación de las TIC's se presenta de una manera más concreta y viable.

En este trabajo se plantea el análisis de los de interoperabilidad para la Historia Clínica Electrónica de acuerdo al Marco de Interoperabilidad venezolano. La investigación inicia con la etapa de análisis de la situación actual en Venezuela, en cuanto a e-Salud ó salud electrónica se refiere, siendo la interoperabilidad y la Historia Clínica Electrónica componentes de la misma. El estudio está basado en la propuesta de estrategias a favor de la implementación de la interoperabilidad en el sector salud y el análisis de los criterios establecidos por el Marco de Interoperabilidad venezolano para su adaptación a la Historia Clínica Electrónica.

Para el logro de los objetivos planteados, es fundamental iniciar con el desarrollo de algunos conceptos básicos: Historia Clínica, e-Salud, Historia Clínica Electrónica e interoperabilidad. Luego, se continuará con el análisis de la situación actual Venezuela en materia de e-Salud y sus componentes: Historia Clínica Electrónica e Interoperabilidad. Seguidamente se identificarán los estándares y normativas nacionales e internacionales, requeridos para la implementación de la Historia Clínica Electrónica en el país y se analizarán los criterios establecidos en el Marco de Interoperabilidad venezolano y se definirán aquellos aplicables a la interoperabilidad de la Historia Clínica Electrónica. Finalmente, se analizarán los marcos de interoperabilidad de algunos países latinoamericanos, con el objeto de conocer el alcance de interoperabilidad y la existencia de la posible consideración del sector salud en el mismo.

MÉTODOS

El primer paso en la metodología se caracterizó por la revisión bibliográfica. Se utilizaron los siguientes medios electrónicos: Revista e-Salud, Journal of Health Informatics, Journal of Medical Informatics, Research in computing and library and information science, Journal of the American Medical Informatics Association, Elsevier, OMS, OPS.

En la búsqueda bibliográfica también se incluyeron las bases de datos Pubmed y LILACS (Literatura Latinoamericana y del Caribe en Ciencias de la Salud), sin embargo no se localizaron artículos que se relacionaran estrechamente con e-Salud y sus componentes: interoperabilidad y HCE. Los artículos analizados se encuentran descritos a través de una Revisión Sistemática de la Literatura en el *Anexo 2*. En el proceso de revisión bibliográfica, se analizaron a su vez, estrategias propuestas para Latinoamérica en materia de e-Salud. Las mismas se consideraron relevantes para el presente estudio, por resultar la base para establecer iniciativas en el área.

El segundo paso, constó de la elaboración de una encuesta compuesta por preguntas propuestas por la OMS y otras propias del investigador con el fin de conocer la situación actual en cuanto a e-Salud se refiere: En la primera etapa de investigación, se analizaron los diversos planes, informes de avance y programas propuestas por la OMS y OPS para promover u optimizar las acciones en materia de e-Salud en la región de Latinoamérica y el

Caribe. Esta fase permitió indagar respecto a las estrategias y acciones que apoyaran al cumplimiento de las metas en el presente año y períodos posteriores, según lo definido en cada uno de los propósitos planteados.

La segunda etapa, constituyó el análisis e identificación de las estrategias contenidas en las propuestas de los organismos mencionados. A su vez se realizó una investigación documental exhaustiva en las bases de datos electrónicas, portales web de organismos nacionales e instituciones universitarias, con el objeto de conocer las actividades que se han llevado a cabo en el país de acuerdo a la formulación y adopción de políticas en e-Salud y la implementación de HCE estándar en instituciones de salud.

Para tal efecto, se consideraron aquellas acciones que se adaptaran en mayor medida a los requerimientos del presente estudio y a las deducciones que arrojó la investigación realizada.

En la tercera etapa, se procedió a elaborar la encuesta que consta de preguntas del tipo abiertas bajo el contexto de e-Salud y sus componentes: HCE e interoperabilidad. Las preguntas formuladas van dirigidas a expertos en el sector salud y el área de tecnologías en salud. El diseño del instrumento se caracteriza por poseer en la parte inicial los datos personales del entrevistado, seguido de la definición de los términos claves: e-Salud, HCE y MIO; una pregunta de selección simple y finalmente, la serie de preguntas de opinión. Con respecto a la población entrevistada, la misma proviene de instituciones prestatarias de salud e institutos de investigación y desarrollo en tecnologías médicas.

En el tercer paso, se analizaron los criterios de interoperabilidad generales establecidos por los diversos marcos de interoperabilidad adaptados por otros países. Se describieron los aspectos de base social y técnico analizados establecidos en el Libro blanco de interoperabilidad de Gobierno Electrónico para América Latina y el Caribe y los documentos de interoperabilidad propios de los siguientes países latinoamericanos: México, Colombia, Uruguay, Argentina, Brasil y Venezuela.

RESULTADOS

- 1- Revisión bibliográfica: Una vez realizada la revisión bibliográfica de las bases de e-Salud y los componentes de interoperabilidad y HCE en Venezuela y el resto de Latinoamérica. Se logró constatar lo siguiente:

La utilización de las TIC's permiten optimizar los procesos que se llevan a cabo en el ámbito sanitario, desde su aplicación en centros de salud hasta el sistema nacional de salud, una de las implementaciones mas usuales y de mayor relevancia dentro de una institución de atención sanitaria es la HCE. Algunos de los estudios analizados en la presente investigación proponen la como objetivos, la descripción de las bases fundamentales de una HCE y de la interoperabilidad:

a- HCE:

Desde el punto de vista sociopolítico:

-Análisis del proceso de la formación de política sanitaria a través de la HC

Desde el punto de vista técnico:

-Definición de los componentes estructura, aplicación, utilidad y acceso

-Categorización de los estándares para la utilización de la HCE

-Conocer las barreras de la HCE en el entorno y práctica médica

b- Interoperabilidad:

-Definición de patrones de comunicación para la salud

-Integración sistemática de las plataformas tecnológicas de la Universidad de Carabobo, en su Facultad de Ciencias de la Salud-Sede Aragua, con la del Sistema Público Nacional de Salud, a través del desarrollo de productos de las Nuevas Tecnologías de Información y Comunicación.

-Descripción de estrategias que hagan posible la interoperabilidad técnica, semántica y organizacional

Por otro lado, se procedió a considerar algunas acciones formuladas por la OMS y adaptar las mismas a las condiciones analizadas en Venezuela. Con el fin de establecer estrategias a futuro, que permitan la implementación de dichos avances y la formulación de iniciativas en materia de e-Salud.

Tabla 18. Acciones a promover en Venezuela de acuerdo al plan de estrategias de la OMS (2011). Fuente: Elaboración propia

Estrategias	Descripción
<p>Promover, ejecutar y evaluar políticas públicas que apoyen al uso de las TIC's en el ámbito sanitario</p>	<p>-Objetivo 1: Apoyar la formulación y adopción de políticas públicas en e-Salud centradas en las personas.</p> <p>El presente estudio representa un avance en la formulación de políticas públicas en e-Salud ya que analiza y desarrolla los lineamientos necesarios para la implementación de las TIC's en el sector salud, a través de la interoperabilidad.</p> <p>Dicho esto, se proponen acciones que apoyaran el objetivo descrito en Venezuela:</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Planificar y desarrollar equipos de trabajos en las instituciones de salud y entes relacionados al sector y plantear como objetivo único el análisis situacional en lo que a e-Salud se refiere en los estados del país. b- Desarrollar investigaciones en las universidades e institutos con el fin de conocer los factores de carácter social y tecnológico que influyen en la utilización de la e-Salud. <p>-Objetivo 2: Apoyar el establecimiento de una sociedad de índole pública o privada que participe en la toma de decisiones en materia de e-Salud, tanto en la formulación de políticas como de estándares</p> <p>Acciones que apoyaran el objetivo descrito en Venezuela:</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Establecer convenios entre universidades e institutos de investigación y desarrollo en el sector salud, con el fin de crear sociedades que aporten conocimiento de carácter tanto social como tecnológico. b- Organizar actividades entre sociedades médicas e institutos tecnológicos y crear grupos de discusiones para obtener información prioritaria proveniente de cada uno de estos. A partir de allí, se elaboran criterios que apoyen a la toma de decisiones en materia en e-Salud. <p>-Objetivo 3: Ayudar a definir las prioridades políticas a nivel nacional y regional relacionadas con la e-Salud</p>

	<p>Acciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Elaborar instrumentos que permitan obtener información respecto a las necesidades presentadas en el país en materia de e-Salud. Se requiere que dicho instrumento especifique cada uno de los componentes propios de la e-Salud, con el objeto de observar el comportamiento de las necesidades de acuerdo a cada estado de país.
Favorecer la interoperabilidad de los sistemas de salud	<p>En el caso de esta estrategia, se considerará un único objetivo por estar relacionado con la e-Salud.</p> <p>Objetivo 1: Apoyar la interoperabilidad tecnológica y organizacional en los sistemas de salud</p> <p>Acciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Promover la utilización del MIO en el sector salud. <p>En la actualidad se está desarrollando un proyecto de telesalud para establecimientos de nivel I en atención sanitaria, utilizando los lineamientos del MIO, lo cual se considera un avance en materia de e-Salud.</p>
Utilizar herramientas y metodologías basadas en las TIC's para mejorar la salud pública	<p>En esta estrategia se presenta el mismo caso anterior y se considerarán dos objetivos</p> <p>Acciones:</p> <p>Objetivo 1: Identificar el marco legal necesario para el uso de las TIC's en el intercambio de información clínica en el sector sanitario</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Analizar la normativa legal propuesta como base por el MIO e investigar aquella especificada para el sector salud en Venezuela b- Identificar la normativa legal internacional para la utilización de las TIC's y considerarla como herramienta de apoyo en caso de requerirla. <p>Objetivo 2: Promover el desarrollo sostenible, ampliable e interoperable de los programas e iniciativas centradas en la e-Salud</p> <ul style="list-style-type: none"> a- Investigar los proyectos que se llevan a cabo en la actualidad en materia de e-Salud y velar por el cumplimiento de los objetivos b- Establecer actividades entre instituciones de salud en las cuales se identifiquen las necesidades en materia de interoperabilidad

2- En la encuesta realizada para conocer la situación actual en Venezuela en materia de e-Salud se obtuvieron los siguientes resultados:

- a. En la pregunta N° 1: Referente a los desafíos que influyen en el desarrollo de una estrategia nacional de e-Salud, las respuestas fueron muy variadas, dos de ellas coincidieron en la falla de recursos económicos.
- b. En la pregunta N° 2: Acerca de la implementación a corto plazo de la HCE estándar en Venezuela, las respuestas describieron una posición negativa.

- c. En la pregunta N° 3: Se hace referencia a la influencia en la adaptación de la HCE a los requerimientos del MIO. Dos de las cinco respuestas estaban condicionadas a la consideración de factores y criterios
- d. En la pregunta N° 4: Referente a la influencia del estudio en la implementación de nuevas estrategias de e-Salud en el país, todas respuestas resultaron positivas
- e. En la pregunta N° 5: Se requiere de la opinión de los encuestadores para conocer los motivos de la no consideración (en un inicio) del área de salud en las prácticas del MIO. Las respuestas suministradas se comportaron de manera similar, liderando las opciones: Otras prioridades y desconocimiento al respecto
- f. En la pregunta N° 6: Acerca de las áreas en las que podría apoyar la OPS a Venezuela en materia de e-Salud, las opciones predominantes fueron Telemedicina e e-Learning. Estas representan las experiencias de mayor alcance en cuanto a componentes de e-Salud se refiere en el país.

3- Se analizaron los criterios de interoperabilidad generales establecidos por los diversos marcos de interoperabilidad adaptados por otros países y se obtuvieron los siguientes resultados:

a. Aspecto social: todos los marcos de interoperabilidad tienen como objetivo fundamental, promover la utilización las TIC's en la sociedad. A su vez, existen acciones concretas descritas a continuación:

-México, en su documento de interoperabilidad destaca la adaptación de las herramientas de las TIC's de acuerdo a las condiciones de los ciudadanos, tomando en cuenta aquellos que presentan discapacidad. Por otro lado, considera dentro de sus criterios de interoperabilidad, modelos de plataformas para sectores específicos y el sector salud es uno de ellos. Esta afirmación, permite el inicio de estrategias concretas basadas en TIC's, en materia de e-Salud. De allí, la relevancia de considerar dicho marco, como un modelo a seguir para las futuras versiones del MIO venezolano.

-Uruguay a su vez, plantea en su documentación diversos entornos de servicios de interoperabilidad. En los mismos, se hace referencia a los registros de servicio relacionados con el sector salud, denominado: "Certificado de nacidos vivos". Este registro permite afianzar las bases establecidas en cuanto a interoperabilidad en e-Salud en el país. Es relevante destacar que a través de la implementación del "Programa Salud.uy", se logrará una orientación única basada en: HCE, imagenología y la conectividad entre las instituciones de salud. (Presidencia de la República Oriental del Uruguay, 2013)

b. Brasil y Colombia proponen acciones concretas para la adopción de estándares. Estas estrategias permiten que dichas adopciones se lleven a cabo de manera controlada y con un nivel más alto de adaptación, de acuerdo a las necesidades presentadas por cada nación.

Con respecto a las dimensiones de interoperabilidad, todos los países, hacen referencia a la aplicación de los tres niveles fundamentales: Técnica, Semántica y Organizacional; a excepción de Colombia que no considera ésta última. A continuación se observa la aplicación de dimensiones adicionales u otra manera de clasificar las mismas:

-Colombia, expresa en su documento la utilización de un tipo diferente de dimensión, la Político/Legal

-En el Libro Blanco se hace referencia a una dimensión adicional, la de Gobernanza

-Venezuela, describe en el MIO las dimensiones a manera de niveles y las mismas están contenidas dentro de la dimensión Temática. La clasificación de dichos niveles, se considera

una ventaja al momento de implementar la plataforma de interoperabilidad ya que aporta especificaciones adicionales que podrían ser consideradas cuando se requieran procesos de adaptación en plataformas interoperables.

CONCLUSIONES

Luego de desarrollar la metodología planteada y analizar los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

1. Las investigaciones realizadas en Venezuela en materia de e-Salud, específicamente en HCE, proporcionan un gran aporte tecnológico y una plataforma de interoperabilidad considerable para el logro de la implementación de la HCE. Sin embargo, la promoción y el desarrollo de políticas en materia de e-Salud no tuvo la presencia necesaria en dichas investigaciones.
2. A partir de la encuesta aplicada a expertos en el área de e-Salud, se pudo afirmar que es fundamental promover estrategias y acciones que permitan conocer las necesidades de la sociedad en el sector salud. De esta manera, la aplicación de las TIC's se realizará de una manera mas efectiva y confiable.
3. Con respecto a la adopción de estándares y normativas en Venezuela, se consideró que existe una visión concreta de la necesidad de utilizar estándares abiertos e internacionales para lograr la interoperabilidad en e-Salud. De la misma manera, en el MIO se describen estándares de interoperabilidad generales que sirven de referencia al momento de la implementación de la interoperabilidad en la HCE.
4. La adaptación de los criterios de interoperabilidad de HCE, en función de aquellos descritos en el MIO, permitió el análisis y la descripción de aspectos técnicos que son fundamentales para la interoperabilidad en la HCE.
5. La descripción y el análisis de los diversos marcos de interoperabilidad de países latinoamericanos, permitió conocer la descripción de los enfoques sociales, técnicos y legales orientados a los criterios de interoperabilidad. A partir de allí, se definieron acciones consideradas relevantes para la investigación, de acuerdo a los enfoques mencionados. Finalmente, se organizó un cuadro comparativo y se analizaron las bases contempladas para cada enfoque. En el mismo se observó que los marcos

REFERENCIAS

- OMS (2011). Estrategia y plan de acción sobre e-Salud. Washington, D.C., EUA.
- OMS (2005). Asamblea Mundial de la Salud. Mayo del 2005. Ginebra (Suiza). (resolución WHA58.28).

MODELADO EN ESPACIO DE ESTADO DE UNIDADES DE PRODUCCIÓN HOLONICAS

Juan Cardillo

ijuan@ula.ve

Edgar Chacón

echacon@ula.ve

Departamento de Sistemas de Control/ Departamento de Computación, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Av. Alberto Carnevalli, Edf B, La Hechicera, Mérida, Edo Mérida, Venezuela.

Resumen. *La automatización del proceso de producción necesita de un modelo completo para poder: “planificar”, “coordinar”, “programar”, y “ejecutar” el proceso. El resultado es sintetizar el esquema de toma de decisiones, esto es, generar: el “gestor”, el “coordinador” el “supervisor” y “regulador” requeridos, basados en la planificación/programación/ejecución. Si bien es cierto que el modelo completo del proceso productivo es posible obtenerlo, este no es un modelo útil para ser usado en tiempo real debido a su complejidad. El poder manejar la complejidad en los procesos productivos ha conllevado a estructurar modelos con esquemas distribuidos interconectados tanto física como lógicamente usando el Modelo de Negocio. El Modelo de Negocio usa la Cadena de Valor para establecer los subsistemas (Unidades) que conforman el proceso productivo. Si bien es cierto que el modelo de negocio muestra una estratificación clara del modelo global, su composición implica la obtención del modelo complejo inicial. Así, manejar la complejidad de los procesos productivos, no solo es la disgregación en unidades funcionales (unidades de producción) que componen el proceso, sino el de establecer, en vez de composición de modelos, una abstracción de modelos propios de la unidad (imagenes) que conlleva a la integración física y lógica de las unidades con un mínimo numero de variables pertinentes, es decir, definir el espacio de estado de la unidad. En este trabajo se presentará una descripción del espacio de estado para Unidades de Producción Holónica, en donde la unidad es modelada con modelos interactuantes, cada modelo corresponden a una imagen de los componentes del sistema asociado. Así, el modelo global del proceso es obtenido, solo, de la composición de los modelos de último nivel de cada unidad.*

Palabras Claves: Unidad Producción Holónica, Modelado de sistemas complejos, Descripción en espacio de estados, Modelo de Negocio.

1. INTRODUCCIÓN

Para dar flexibilidad y completa autonomía a la Unidad de Producción (UP), se propone sustituir la jerarquía y el empotramiento por un modelo plano de toma de decisiones como muestra la figura 1, que es una variación del modelo propuesto en [1]. Este consta de 4 sistemas de toma de decisiones: Gestión, que genera lo que se va hacer; Coordinación, que fija las interrelaciones entre las etapas; Supervisión que asegura los reguladores necesarios para seguir el proceso en las consignas dadas y Regulador que asegura la operación local de cada lazo del proceso. Este esquema permite establecer un modelo global manejable de la unidad a partir de cuatro modelos interactuantes. Una de las dificultades es que en los esquemas clásicos tanto para supervisores coordinadores y gestores están basados en modelo asociados a variables de proceso. Esto crea confusión a la hora de poder determinar hasta donde llegan las funciones del supervisor /coordinador y gestor englobando todo en un esquema de supervisión en el cual la explosión de estados es limitante, sin poder determinar el estado del proceso/unidad. En los procesos productivos modelados con estructuras jerárquicas se tiene metodologías para determinar los modelos y esquemas de toma de decisiones en cada nivel [2,3,4]. Al establecer una estructura basada en el modelo de negocio y cadena de valor en donde a cada eslabón de la cadena se le asocia una unidad de producción, la Unidad debe ser autónoma y flexible. Autónoma en el sentido de poseer mecanismo para planificar/coordinar/supervisar y regular la unidad y flexibles para poder reconfigurarse [5, 6,7,8]. Así en este trabajo se pretende dar una referencia para establecer de forma clara los modelos asociados para el sistema de planificación/coordinación/supervisión/regulación para establecer la síntesis del gestor/coordinador/supervisor/regulador de una UP y que ellos representen el modelo global de la UP, proporcionando el estado de cada uno de los sistemas y por ende el de la unidad. Se considera que los modelos del proceso en cada etapa son continuos o continuos a trozos cuyas representaciones son ecuaciones diferenciales, por lo tanto en conjunto de controladores para cada región de operación es también continuo. Los modelos para la gestión, la coordinación, supervisión son considerados sistemas a eventos discretos cuyas representaciones, en nuestro caso, son Redes de Petri (RdP) [9]. Así el modelo del sistema de supervisión captura-transforma las dinámicas continuas en discretas (a eventos). Por lo que el modelo global de la unidad queda representado como un modelo de sistema híbrido.

El artículo está estructurado de la siguiente manera, la unidad 1 una introducción. Unidad 2, descripción de la estructura y el modelo de conocimiento de la unidad de producción, esta incluye la definición del espacio de estado. Unidad 3 Conclusiones

2. ESTRUCTURA Y MODELO DE LA UNIDAD DE PRODUCCIÓN

En esta sección se definirá en qué consisten, de forma genérica, los 4 sistemas de UP y la descripción del espacio de estado de cada uno de ellos.

2.1 Sistema de Gestión

El sistema de Gestión es el encargado de negociar las órdenes de producción, esto es evalúa las órdenes de producción (acepta o rechaza), establece la planificación de las órdenes aceptadas y además replanifica las órdenes de producción por fallos en la ejecución de órdenes de trabajo asociadas a una orden de producción. Este conoce de las recetas y su proyección en el proceso de producción por lo tanto establece la alineación de las etapas, la configuración de cada etapas y la secuencia de operaciones en la etapa.

Entradas externas: Órdenes de producción, materia prima e insumos

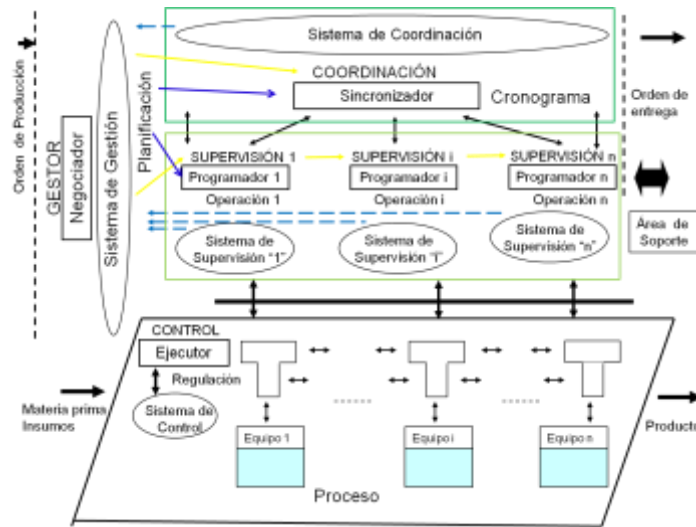
Entradas internas: Estado de las etapas y alineación, evolución del cronograma

Figura 1: Modelo de una Unidad de Producción

Proceso: Sistema de Gestión

- Evaluar Órdenes de Producción y Estado de la Unidad (calidad, cantidad, tiempo, confiabilidad)
- Evaluar la receta (lo produzco : aceptado(calidad, cantidad), rechazado)
 - Proyectar la receta sobre los recursos: Evaluar requerimientos de materia prima e insumos (los tengo: aceptado, rechazado),
 - Evalúa Recursos y Alineaciones admisibles (modelo RdP),
 - Establecer cronograma de asignaciones de materia prima (tiempo, cantidad, calidad), Determinar Configuración: Asignación de recursos físicos (alineación de etapas, controladores y parámetros y tiempo/consignas), Determinar modo almacenamiento y entrega de producto
 - Asignar Cronogramas y Programas, ((status, tiempo/lotes); status: aceptado, rechazado)
 - Actualizar Planificación, establecer cronograma, programas (status, tiempos),
 - Seguir las órdenes de producción y estado de la unidad
 - Estado de la orden/cronograma de producción (evolución; estatus): (Inicio; aceptado, degradado, fallo), (Elaboración,%; aceptado, degradado, fallo), (Finalización; ok, degradado, fallo), a partir del estado de las ordenes de trabajo
 - Estado de la Unidad (Condición, confiabilidad)
 - Estado del flujo de producto: identificación por lote (debido a materia prima), conciliar producto a la entrada y a la salida de la unidad (cantidad, calidad, tiempo/condición entre etapas, tiempo/condición en la unidad)
 - Estado de la Alineación
 - Establecimiento de condición de continuación de orden o reinicio de proceso o replanificación de la orden si fallo.
 - Almacén/Despacho orden de producción y reinicio de la unidad: Almacenamiento de producción según orden, Entrega de la producción según orden

Salidas externas: Condición de la Unidad, estatus de las ordenes de producción.

Salidas al sistema de coordinación: cronograma actualizado y configuración de las etapas

Estado del sistema de gestión (variables de gestión):

- Estado de la orden de producción (evolución; estatus)

- Estado de la Unidad: Calidad del producto de entrada, Calidad del producto elaborado, Rendimiento de la unidad, Confiabilidad de la Unidad, Costo de producción de la Unidad

Así el modelo asociado al sistema de Gestión está compuesto por el modelo imagen, en RdP, del proceso coordinado en la alineación establecida $R_{pg_i} = (P_{pg_i}, T_{pg_i}, A_{pg_i}, B_{pg_i})$ en la orden de producción “i” dada, con un Gestor, en RdP, $R_{Gpc_i} = (P_{Gpc_i}, T_{Gpc_i}, A_{Gpc_i}, B_{Gpc_i})$, con cálculo de indicadores $\bar{I}_{SG} = I_{SG}(R_{pg_i}, R_{Gpc_i})$, asociados al estado del sistema de gestión según el tipo de proceso, que se calculan a partir de la variables de coordinación, producción y proceso.

2.2 Sistema de Coordinación/Supervisión

El Sistema de Coordinación/Supervisión es el encargado de evaluar, seguir cronograma/secuencia de operaciones dado por planificación. Realiza la sincronización entre las etapas de la unidad (evalúa y controla la alineación entre etapas).

Entradas externas: cronograma de asignación de materia prima e insumos y de sincronización con las etapas, Secuencia de operación y los valores consignas tanto de flujo de producto como de operación en la etapa

Entradas internas: Estado de las etapas, alineación actual, variables asociadas a condición de equipos, variables asociadas a flujo de materia prima e insumos

Proceso: Sistema de Coordinación/Supervisión

- Evaluar del Cronograma la configuración de las etapas y Estado de las Etapas, secuencias asociadas a la etapa.
- Establecer la configuración de las etapas: Establecer la alineación entre las etapas: estatus de la alineación y consignas de sincronización, Establecer la configuración de la etapa.; estatus de la etapa, establecer Consignas de sincronización, Establecer los puntos de consigna, tipo de controlador y parametros
- Seguimiento de la configuración de las etapas:
- Evaluar el estado del cronograma (evolución; estatus): Estado de las Etapas (Condición, confiabilidad), Estado del flujo de producto entre etapas: identificación por lote (debido a materia prima), conciliar producto a la entrada y a la salida entre etapas (cantidad, calidad, tiempo/condición en etapas, tiempo/condición en las etapas)
- Seguimiento de la configuración de la etapa: Evaluar el estado del secuencia de operación (evolución; estatus), Estado de la Etapa (Condición, confiabilidad)
- Estado del flujo de producto en la etapa: conciliar producto a la entrada y a la salida entre etapas (cantidad, calidad, tiempo/condición en la etapa, tiempo/condición)
- Establecimiento de condición de continuación de configuración o reinicio de las etapas o reconfigurar el cronograma si fallo.

Salidas externas: Estado de las etapas (Status, confiabilidad) y Configuración (alineación actual de las etapas), evolución del cronograma (estatus), consignas de la secuencia

Salidas al sistema de Coordinación/Supervisión: Secuencia de operación de cada etapa actualizada y configuración de los equipos

Estado del sistema de Coordinación/Supervisión (variables de coordinación/Producción):

- Estado del cronograma (evolución; estatus)
- Estado de la configuración (alineación): Cantidad y calidad de producto transportado entre etapas, Conciliar producto entre etapas (modelo con retardo), Rendimiento, confiabilidad y costo de la configuración

Así el modelo asociado al sistema de coordinación está compuesto por el modelo imagen, en RdP, del proceso supervisado en la configuración establecida $R_{ps_i} = (P_{ps_i}, T_{ps_i}, A_{ps_i}, B_{ps_i})$ en la alienación “i” dada, con un coordinador, en RdP, $R_{Cps_i} = (P_{Cps_i}, T_{Cps_i}, A_{Cps_i}, B_{Cps_i})$, con cálculo de indicadores $\bar{I}_{sc} = I_{sc}(R_{ps_i}, R_{Cps_i})$, asociados al estado del sistema de coordinación según el tipo de proceso, que se calculan a partir de la variables de proceso.

2.4 Sistema de control

El Sistema de control es el encargado de evaluar y seguir la consigna establecida por el supervisor. Realiza el seguimiento de las variables involucradas en el proceso (evalúa y controla cada lazo del proceso), detección de alarmas por anomalías

Entradas externas: Consignas, tipo de controlador y parámetros del controlador.

Entradas internas (capturadas): Variables de proceso controladas y controlables asociadas a cada lazo.

Proceso: Sistema de Control

- Evaluar la condición de variables controladas y controlables
- Evaluar condición de los equipos.
- Establecer condición del lazo: Evaluar error de seguimiento asociado al punto de consigna de lazo, Evaluar condición de los equipos, Verificar el flujo y calidad del producto , Seguimiento de la consigna
- Evaluar el error de seguimiento asociado al punto de consigna estado (evolución; estatus)
- Determinar el estado del proceso
- Determinar estado del flujo de producto en el proceso: conciliar producto a la entrada y a la salida del proceso (cantidad, calidad, tiempo/condición en la etapa, tiempo/condición)
- Establecimiento de condición de continuación asociada a la consigna o reinicio del proceso o reconfiguración si fallo.

Salidas externas: Valores de las variables controladas, Estados de los equipos y del flujo de producto (indicadores, alarmas)

Estado del sistema de control (variables de proceso):

- Error de seguimiento
- Condición de los equipos de lazo
- Estado de la configuración del lazo: Cantidad y calidad de producto elaborado en la etapa, Conciliar producto entrada/salida en la etapa (modelo con retardo), Rendimiento, confiabilidad y costo de los equipos

Así el modelo asociado al sistema de control está compuesto por el modelo del proceso $\dot{x}(t) = f(x(t), u_i(t), X_i, Y_i, U_i), x(0) = x_0, y(t) = h(x(t))$, en el punto de operación (X_i, Y_i, U_i) , con controladores de lazo $u_i(t) = g_i(x, \alpha_i, X_i, Y_i, U_i; t)$ y indicadores $\bar{I}_{sc} = I_{sc}(x, u)$ asociados al estado del sistema de control según el tipo de proceso, que se calculan a partir de la variables de proceso.

3. CONCLUSIONES

- La descripción del espacio de estado presentada, permite establecer el estado de la unidad por medio del sistema gestor. Este es calculado a partir de los espacio de estado de los demás modelos de la unidad asociados a la toma de decisiones.

- La importancia de establecer el espacio de estado, es que es el conjunto mínimo de variables requeridas para poder establecer el comportamiento de la unidad, con la definición establecida en el enfoque holónico.
- El uso del enfoque holónico en este caso, es para poder cumplir con los requisitos de flexibilidad y autonomía y para ello es necesario un modelo dinámico de la unidad que permita realizar tales configuraciones y donde la toma de decisiones es realizada por la ella

Agradecimiento

CDCHT- ULA, Proyecto ECOS-NORD; Automatización de sistemas de producción con supervisión autónoma y coordinación distribuida utilizando el enfoque holónico.

REFERENCIAS

- [1]. Edgar Chacon, Juan Cardillo, German Zapata, Rafeal Chacon, Online production Scheduling and re-scheduling in autonomous, intelligent distributed environments, Intech Diciembre 2011 <http://www.intechopen.com/books/production-scheduling>.
- [2]. ISA (2000). *ANSI/ISA-S95.00.01-2000 Enterprise-Control System Integration Part 1: Models and Terminology*, ISA.
- [3]. Chacón E., Besembel I., Narciso F., Montilva J., Colina E. An Integration Architecture for the Automation of Continuous Production Complexes. *ISA Transactions. Journal of the American Institute of Physics*. Vol 41, N° 1, pag. 95-113, 2002.
- [4]. Giebels, M. M. T., Kals, H. J. J. & Zijm, W. H. M. (2001). Building holarchies for concurrent manufacturing planning and control in etoplan, *Computers in Industry* 46(3): 301–314.
- [5]. McHugh P., Merli G., Wheeler W. A. *Beyond Business Process Reengineering: Towards the Holonic Enterprise*, John Wiley, New York, N.Y, 1995.
- [6]. Ulieru M., Brennan R., Walker S. The Holonic enterprise: A model for internet-enabled global manufacturing supply chain and workflow management. *Integrated Manufacturing System*, 8 (13), 538-550, 2002.
- [7]. Brusel H., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L., Peeters P. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computer in Industry*. Vol. 37. 1998. pp. 255-274.
- [8]. University of Hannover. 2000. Holonic Manufacturing Systems. Web Page, <http://hms.ifw.uni-hannover.de/>
- [9]. David, R. & Alla, H. (2005). *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*, Springer.

LISTA DE AUTORES

A

Adrianza, A EC-73, BSB-85
 Aguilar, J EC-7, EC-91
 Alarcón, A EC-85
 Alexandrino, P TCA-67
 Almonacid, C TCA-55
 Altuve, M EC-73, EC-79, BSB-85
 Altuwaijri, O BSB-103
 Álvarez, A BSB-67, OP-25
 Álvarez, M OP-37
 Amador, B BSB-1
 Amaya, J TCA-85, MM-61, OP-7
 Andrade, M MM-67
 Aponte, J PI-61
 Araujo, C MF-7
 Araujo, P MM-49
 Arteaga, J GG-33
 Arvelo, L GG-27
 Asencio, K TCA-25
 Asuaje, M TCA-91
 Augustinavicius, G MM-91
 Ávila, G EC-79
 Azpúrua, L VA-19, VA-25

B

Barboza, S TCA-73
 Barrueta, M GG-15
 Bastardo, J MF-43
 Belandria, N GG-21, GG-33
 Bensamoun, S CI-33
 Beria, A EC-49
 Bermúdez, J MF-13
 Bernal, M. OP-7, VA-13
 Berroterán, M BSB-37, BSB-109
 Besançon, G MF-55, MF-81, TCA-13, EC-1
 Blanco, A MSM-7, MF-1, MF-37
 Bolívar, J VA-13
 Bongiorno, F GG-21, GG-33, TCA-73
 Borges, H MSM-13
 Borregales, M TCA-91

Bossio, B MSM-7, MF-19
 Bourges, G MSM-19
 Bravo, A EC-19, PI-1
 Brea, E OP-19
 Buitrago, S TCA-43
 Burgos, J MSM-25
 Bustamante, J BSB-91

C

Cabrera, J BSB-67, OP-25
 Camargo, E EC-91
 Caminos, F MF-31
 Caminos, L BSB-43
 Canache, J TCA-37
 Candal, M TCA-55, BSB-37, BSB-49, BSB-79
 Cappelletto, J TCA-91
 Caralli, A EC-37, EC-55
 Cardillo, J VA-43
 Carmona, R PI-25
 Caropresse, G EC-43
 Carrero, W BSB-55
 Carvajal, P EC-25
 Casanova, E MSM-7
 Casteleiro, M CI-1
 Castellanos, J GG-27, TCA-37
 Castillo, F GG-21
 Castillo, J MM-43
 Cedeño, F OP-55
 Cedeño, J BSB-55
 Cereska, A MM-91
 Cerrada, M GG-1, GG-9
 Cerrolaza, M MM-85, BSB-55
 Cevallos, J EC-85
 Chacón, C MM-97
 Chacón, E VA-43
 Chacón, R GG-21, TCA-73
 Chirivella, P OP-55
 Cho, A PI-73, OP-55
 Colina, J GG-7
 Colmenares, G MM-79, PI-49, VA-1

Colmenares, J	MF-49, TCA-31, VA-7	Fernández, J	MF-93
Colominas, I	CI-1	Figueroa, J	MM-79
Contreras, P	MSM-25	Flores, E	TCA-79, MM-31
Córdova, L	MM-43	Flores, J	MF-7
Crespo, A	MF-69	Flores, S	OP-55
Cuadros, J	EC-19		
Cueto, L	PI-67	G	
Cunha, S	TCA-67,OP-43	Gagnoud, A	MM-25
		García, A	BSB-43
D		García, E	OP-43
D'Armas, H	MSM-37	García, J	MSM-1
Da Silva, C	MM-19	García, J	MF-37
Dao, T	CI-33	García, J	MF-69
Dapena, E	EC-7	García, R	MF-25
Darghan, E	VA-13	García, X	MSM-57
Darias, J	TCA-7	Georges, D	MF-55, MF-81, EC-1
Dávila, E	BSB-19	Giannacopoulos, D	MM-7
Dávila, L	TCA-73	Gil, Á	MM-79, EC-7
Davoust, L	MM-25	Glod, A	EC-25
Day, S	MSM-63	Godoy, D	TCA-19
Del Mar, A	PI-1	Goncalves, A	TCA-49
Delgado, G	VA-1	González, A	BSB-43
Díaz, M	GG-33	González, F	MF-31, MF-49, VA-7
Díaz, Y	OP-43	González, M	MSM-31
Du Terrail, Y	MM-25	González, M A	GG-15
Duarte, V	EC-67	González, O	MSM-51
Dulhoste, J	MF-55, MF-81, TCA-13, EC-1	González, Y	EC-67, BSB-13, BSB-25, BSB-31
Durán, F	EC-19	Graciano, C	MSM-13, MSM-51
Durán, M	BSB-7	Grande, D	PI-61
		Griffiths, D	CI-15
E		Guerra, B	EC-73, BSB-85
Eblen, A	EC-55	Guevara, J	MF-25, MM-97
Elberg, M	GG-15, GG-51, GG-57	Guillén, B	PI-13
El-Kurdi, Y	MM-7	Guillén, M	MF-55, MF-81, TCA-13, EC-1
Escalante, R	MM-19, MM-67, MM-73		
Espitia, R	MM-73	Gutiérrez, C	EC-49
		Gutiérrez, G	TCA-7
F		Gutiérrez, J	GG-63
Faria, R	OP-43		
Fenton, G	CI-15	H	
Fernández, D	MM-7	Hernández, C	GG-55

Hernández, E	EC-61	Martínez, E	EC-25
Hernández, L	VA-31, VA-37	Martínez, G	MSM-13, MSM-37, MSM-51
Herrera, H	VA-19	Marturet, G	MF-87
Ho-Ba-Tho, M	CI-33	Mata, O	TCA-61
Hoyos, L	BSB-91	Materano, G	MF-61
Huang, J	CI-15	Maza, D	TCA-25
I			
Ibarra, E	PI-37	Medina, D	VA-1
Idler, V	TCA-1	Medina, E	MSM-57
Infante, S	OP-13	Medina, M	MSM-19
J			
Jabbour, G	MM-55	Medina, R	EC-19, PI-1, PI-13, PI-37
Jiménez, C	EC-31, EC-61	Mehri, M	MM-7
Jiménez, O	TCA-43	Mena, C	PI-19
Jorge, A	TCA-67	Mendez, Y	TCA-67
K			
Klarica, S	GG-9	Mendoza, T	EC-49
L			
Lammardo, A	BSB-61, BSB-109	Meziat, R	CI-41
Lara, L	VA-31	Mielgo, J	PI-43
Leal, R	EC-91	Mijares, R	VA-19, VA-25, VA-31, VA-37
León, F	GG-33	Molina, M	PI-49, VA-1
León, J	MF-25	Monsalve, M	GG-63
Linares, P	GG-27	Montilla, C	MF-1
Llanes, L	MSM-37	Montilla, G	EC-55
Loaiza, N	MF-37	Montoya, D	EC-43
Lobo, E	PI-67	Morales, R	TCA-61
López, M	PI-55	Moreno, C	OP-37
Lugo, R	VA-31	Moreno, F	PI-7
Luis, M	MM-37	Moret, L	OP-49
M			
Maldonado, J	MM-55, PI-67, OP-49	Müller-Karger, C	BSB-1, BSB-49, BSB-61 BSB-79, BSB-109
Malpica, W	EC-97	N	
Manzo, D	GG-27	Navarrina, F	CI-1
Marinilli, A	MSM-45	Nieto, F	MM-85, BSB-7
Martín, M	MM-1, MM-13, PI-25, PI-43, PI-55, PI-61	Nieves, A	MSM-61
		Nimo, D	TCA-85, OP-7, VA-13
		Niño, Z	MM-37
		Nogueira, X	CI-1
		Núñez, T	EC-19

O			
O'Neill, B	GG-21	Rodríguez, R	MM-37
Ojeda, J	PI-7, PI-19	Rodríguez, S	BSB-19
Ojeda, L	GG-51	Rodríguez, Y	VA-19
Orso, J	EC-13	Rojas, F	EC-49
Otero, B	MM-43, MM-97	Rojas, J	MM-13
		Rojas, L	MF-1
		Rojas, O	MSM-63, MM-43
		Rojas, R	BSB-73, BSB-97, OP-31,
P		Rosales, W	MF-31, TCA-31
Paiboon, J	CI-15	Rubio, H	EC-13
Paredes, J	EC-85, BSB-73, PI-13	Rubio, I	MF-55, MF-81, EC-1,
París, J	CI-1		EC-13
Parra, A	TCA-85	Rueda, A	PI-25, PI-31
Pelliccioni, O	TCA-55,BSB-37,BSB-49, BSB-79, BSB-91		
Pérez, B	BSB-25	S	
Pérez, N	OP-1	Saavedra, I	MF-25
Petit, J	MSM-57	Salas, M	GG-9
Pinto, F	GG-1	Sánchez, B	BSB-97
Plata, R	MM-13	Sánchez, I	TCA-25, TCA-49, BSB-25
Provenzano, S	TCA-73, MM-49	Sánchez, L	OP-13
		Santos, R	MF-13, MF-55, MF-81, TCA-13, EC-1
R		Sanz, C	BSB-67
Ramírez, E	PI-7, PI-19	Sarcos, A	MF-49, TCA-31
Ramírez, J	MF-49, TCA-31, BSB-73, VA-7	Savill, M	MF-61
Ramírez, N	OP-7	Seijas, C	EC-37, EC-55
Ramos, D	PI-49	Severeyn, É	EC-79
Rey, D	TCA-79, MM-31,MM-37	Shmueli, A	TCA-91
Reyes, R	VA-25	Sierra, Z	VA-31
Rincón, E	VA-19, VA-25	Silva, R	VA-31
Rincón, J	MF-7	Sosa, G	GG-9, GG-15, TCA-43
Rincón, L	MSM-25	Stanko, M	TCA-91
Ríos, A.	EC-91	Suveges, J	TCA-67
Rivas, F	GG-57		
Rivas, R	EC-7	T	
Rivero, P	GG-1	Tarazona, M	MM-61
Roa, P	MSM-1	Teixeira, P	MSM-31, MF-19
Rodríguez, G	MF-75	Toledo, J	EC-25, EC-49
Rodríguez, J	GG-27	Toro, J	MF-75, MF-93
Rodríguez, M	MF-43, BSB-85, EC-73	Torrealba, R	BSB-1
Rodríguez, O	PI-7, PI-19	Torres, F	MM-1

Torres, J	GG-39, GG-45	Vargas, E E	TCA-79-MM-31
Torres, M	MF-31, MF-69, VA-7	Vásquez, J	TCA-85
Torres, R	GG-45, GG-39	Vásquez, M	OP-1
Torres, W	EC-49, PI-25, PI-31, PI-43, PI-55, PI-61	Velasco, M	EC-67
	PI-55	Vera, M	PI-1
Torreyes, M	EC-91	Villamar, C	MF-13
Travé, L	OP-19	Villazana, S	EC-37, EC-55
Tremante, P		Vito, A	BSB-25
		Vivas, J	BSB-13, BSB-19
U		Volcanes, V	GG-9
Ucar, R	GG-33		
Urbina, R	TCA-49	W	
Urdaneta, V	MSM-57	Wong, S	EC-73, EC-79, BSB-85
Uzcátegui, G	BSB-13, BSB-25		
V		Y	
Valbuena, O	PI-1	Yusti, F	EC-31
Valencia, L	MM-85		
Valera, J	BSB-109	Z	
Valera, M	MF-25	Zambrano, J	TCA-19, MM-7
Vargas, A	BSB-31	Zambrano, L	BSB-61
Vargas, E	TCA-79	Zuriguel, I	TCA-25