

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Martín R. Ramos de V.
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ebert Brea B, MSc, PhD.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Martín R. Ramos de V.
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, 2012

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 06 de junio de 2012

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Martín R. Ramos de V., titulado:

“DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO y con Mención Honorífica y Mención Publicación.


Prof. José Mora
Jurado


Prof. Rafael Malpica
Jurado


Prof. Ebert Brea
Prof. Guía



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



ACTA

Quienes Suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Central de Venezuela para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller **MARTÍN R. RAMOS DE V.**, Cédula de Identidad N° V-18.587.569, bajo el título **"DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA"**; a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de Ingeniero Electricista, dejan constancia de lo siguiente:

Considerando que el Trabajo Especial de Grado presentado y defendido por el Bachiller en referencia, presenta un grado de originalidad y excelencia tanto en su contenido como en su presentación formal que lo convierte en una fuente referencial útil, acuerda por unanimidad solicitarle a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA**, al Trabajo Especial de Grado antes mencionado.

En Caracas, a los seis días del mes de junio de dos mil doce.


Prof. José L. Mora
Jurado


Prof. Rafael Matpica
Jurado


Prof. Ebert Brea
Profesor Guía



"50 AÑOS DE LA CREACIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DEL INSTITUTO DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES"

Edificio Escuela de Ingeniería Eléctrica, piso 1, oficina 201, Ciudad Universitaria, Los Chaguarramos, Caracas 1051, D.F.

TELÉFONOS. (VOZ) +58 212 6053303 (FAX) +58 212 6053105

E-Mail: cie-pot@ucv.ve



ACTA

Quienes Suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Central de Venezuela para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller MARTÍN R. RAMOS DE V., Cédula de Identidad N° V-18.587.569, bajo el título "DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA"; a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de Ingeniero Electricista, dejan constancia de lo siguiente:


*Considerando que el Trabajo Especial de Grado presentado y defendido por el Bachiller en referencia, presenta un grado de originalidad y excelencia tanto en su contenido como en su presentación formal que lo convierte en una fuente referencial útil, acuerda por unanimidad solicitarle a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN PUBLICACIÓN**, al Trabajo Especial de Grado antes mencionado.*

En Caracas, a los seis días del mes de junio de dos mil doce.


Prof. José F. Mora
Jurado


Prof. Rafael Malpica
Jurado




Prof. Ebert Brea
Profesor Guía

"50 AÑOS DE LA CREACIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DEL INSTITUTO DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES"

A mis padres, abuelos y hermanos

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Mercedes y Alberto, por darme su apoyo incondicional y por todo el cariño que me han brindado a lo largo de los años, por darme un modelo a seguir, por haberme hecho el hombre que soy. Espero que estén tan orgullosos de mi como yo lo estoy de ustedes.

A mis hermanos, Alejandra, Yolanda y Alberto, por quererme y ser el motivo de tantos recuerdos felices.

A mis abuelos, Asunción, Yolanda, Alberto y Ricardo por ayudar a mis padres a criarme y formarme, así como el cariño que me brindaron a lo largo de los años.

Al profesor Ebert Brea, por mostrar confianza en mis habilidades y servir de guía en este proceso. Sin su colaboración, este trabajo hubiera sido imposible.

A mis compañeros de Facultad, Adriana, Valeria, Vanessa, Alejandro, Carlos y Kenneth, por ser mis amigos desde el comienzo de este viaje.

A mis compañeros de Escuela, Elena, Erika, María Gabriela, Carlos, Gregory, Luis y Rubén, por brindarme, no solo su amistad, sino su apoyo y asistencia en los momentos más difíciles. No hay palabras suficientes para agradecer su ayuda.

A mis amigos del DIOC, por brindarme un lugar donde siempre me sentí bienvenido.

Y finalmente, al personal docente y administrativo de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y de la Facultad de Ingeniería.

Martín R. Ramos de V.

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA

Tutor Académico: Prof. Ebert Brea B, MSc, PhD. Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. 2012, xiii, 81 hojas.

Palabras Claves: sistema eléctrico de potencia, método Monte Carlo, planificación, riesgo.

Resumen.- La mayoría de los estudios de factibilidad económica se realizan de forma determinista, pudiendo sus análisis arrojar conclusiones no muy acertadas debido a las aleatoriedades que influyen en los sistemas. Ha comenzado una tendencia de considerar las aleatoriedades como elemento importante a la hora de la planificación de un proyecto, contando con el apoyo de las computadoras. En este trabajo se presenta el problema de cómo estudiar la sustentabilidad de un sistema eléctrico de potencia, tomando en cuenta las aleatoriedades más significativas y factores de riesgo. Para comprender el funcionamiento de un sistema de potencia, se procedió con una investigación bibliográfica sobre los elementos que lo conforman, desde sus características operativas hasta datos económicos que ayuden a determinar la rentabilidad. Se delimitó el sistema bajo estudio, estableciendo los parámetros y las variables de interés, así como sus límites. Se modelaron las series de tiempo de la demanda y así determinar los ingresos económicos del sistema. Se estimó como las fallas disminuyen las capacidades de transmisión. Se utilizó la programación lineal, específicamente el modelo de transporte, para simular la repartición de la energía. Se representó algorítmicamente un modelo que tome en cuenta aleatoriedades del sistema. Estas variables estocásticas fueron simuladas utilizando el método de Monte Carlo. Este modelo se probó a través de un conjunto de experimentos, con la finalidad de verificar que el mismo responde de la forma esperada. Una vez finalizada la verificación del modelo, se estructuraron una serie de experimentos con el fin de estudiar diferentes escenarios y así determinar qué condiciones establecen la sustentabilidad de la expansión en el sistema eléctrico de potencia.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	VI
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
MARCO HISTÓRICO	4
2.1. RESEÑA HISTÓRICA	4
2.2. ESTUDIO DE ANTECEDENTES	5
MARCO TEÓRICO	8
3.1. MÉTODO DE MONTE CARLO	8
3.1.1. Definición	8
3.1.2. Análisis de Riesgo	9
3.2. SISTEMA DE POTENCIA	10
3.2.1. Generación	10
3.2.2. Transmisión y Distribución	12
3.3. CONCEPTOS DE INGENIERÍA ECONÓMICA	14
3.3.1. Capital e interés	15
3.3.2. Diagramas de flujo de efectivo	16

3.3.3.	Costos fijos, variables e incrementales	17
3.3.4.	Tasa de retorno mínima atractiva	18
3.3.5.	Método del valor presente	19
3.3.6.	Inflación	19
3.4.	TEORÍA DE GRAFOS	20
3.4.1.	Definición	20
3.4.2.	Representación de grafos por una matriz de incidencia	20
3.4.3.	Representación de grafos por una matriz de adyacencia	21
3.5.	CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA	22
3.5.1.	Estimación de la media	23
3.5.2.	Estimación de la varianza	24
3.5.3.	Estimación de una proporción	25
3.6.	CONCEPTOS DE ALGORITMIA	25
3.6.1.	Definición	25
3.6.2.	Representación algorítmica	26
MARCO METODOLÓGICO		27
4.1.	PROPÓSITO DE ESTUDIO	27
4.2.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	28
4.3.	PLANTEAMIENTO DE SUPUESTOS	29
4.4.	FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	29
4.4.1.	Identificación de variables y parámetros	29
4.4.2.	Relaciones entre los componentes del sistema	30
4.4.3.	Datos para el experimento de simulación	30
4.4.4.	Verificación y validación del modelo	31
4.5.	ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL	32
4.5.1.	Formulación del algoritmo	32
4.5.2.	Código del programa	32

4.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
PROPUESTA METODOLÓGICA	33
DESCRIPCIÓN DEL MODELO	38
6.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	38
6.2. PLANTEAMIENTO DE SUPUESTOS	42
6.3. FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	44
6.3.1. Identificación de variables y parámetros	44
6.3.2. Relaciones entre los componentes del sistema	47
6.3.3. Datos para el experimento de simulación	49
6.3.4. Verificación y validación del modelo	50
6.4. ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL	51
6.4.1. Formulación del algoritmo	51
6.4.2. Código del programa	56
PRUEBAS EXPERIMENTALES	57
7.1. ESQUEMA DE EXPERIMENTACIÓN	57
7.1.1. Resultados de la experimentación	59
ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
CÓDIGO IMPLEMENTADO EN VISUAL BASIC	72
REFERENCIAS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
3.1. Diagrama de flujo de efectivo	17
6.1. Diagrama unifilar del sistema de potencia a estudiar	38
6.2. Sistema de potencia a estudiar representado como un grafo	39
7.1. Tarifa baja crecimiento constante sin expandir el sistema	60
7.2. Tarifa baja crecimiento constante	61
7.3. Tarifa baja crecimiento en alza	62
7.4. Tarifa baja crecimiento en baja	63
7.5. Tarifa alta crecimiento en alza	64
7.6. Tarifa alta crecimiento constante	65
7.7. Tarifa alta crecimiento en baja	66
I.1. Hoja de Excel con los datos de la simulación	72

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
6.1. Cambios de las capacidades de la expansión	41
6.2. Capacidades de transmisión usadas en el modelo de simulación . .	49
6.3. Capacidades de generación usadas en el modelo de simulación . .	50
7.1. Tarifas usadas en el modelo de simulación	57
7.2. Valores de las constantes α_{tipo} y β_{tipo} para los diferentes escenarios	58

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería, las decisiones se realizan muchas veces bajo condiciones de incertidumbre que involucran riesgos asociados a la falta de certeza de la ocurrencia o no de un evento. Dado que la expansión de un sistema eléctrico de potencia representa una inversión cuantiosa, es necesario poder estimar si dicho proyecto es sostenible.

Para ello, se plantea crear una metodología que estudie el riesgo de realizar una inversión, producto de alguna expansión sobre el sistema eléctrico de potencia¹, utilizando el método de Monte Carlo, tomando en cuenta las variables tanto deterministas como estocásticas más importantes.

Los fundamentos teóricos considerados en este trabajo de grado fueron la teoría de simulación por Monte Carlo, varios conceptos de ingeniería económica, aplicaciones de la estadística para el manejo de los datos, la teoría de grafos, conceptos básicos de algoritmia y la descripción de un sistema eléctrico de potencia.

La propuesta metodológica expuesta en este trabajo consiste en describir un sistema eléctrico de potencia como un grafo, por el cual circulará la energía consumida por los clientes en un período de tiempo. Las capacidades de transmisión en cada período y los consumos de energía de los usuarios serán tratadas como variables aleatorias, simulando las fallas ocurridas en la línea de transmisión y las variaciones en el consumo.

Una vez determinada la energía que circula por el sistema, se procede a calcular

¹En este trabajo se denominará ocasionalmente sistema de potencia en lugar de decir sistema eléctrico de potencia.

la entrada de dinero y las salidas, determinando de esta forma si la expansión sobre el sistema eléctrico de potencia es sustentable o no. También se calcula el consumo insatisfecho, en caso de existir, de los clientes.

El contenido del Trabajo Especial de Grado se encuentra estructurado en diez capítulos. El capítulo I contiene el planteamiento del problema y los objetivos del trabajo, tanto general como específicos. En el capítulo II se presenta el marco histórico del método de Monte Carlo, con un respectivo estudio de antecedentes del problema. El capítulo III, el marco teórico, introduce los conceptos a utilizar en este trabajo. El marco metodológico, expuesto en el capítulo IV, se especifican los pasos fundamentales para el desarrollo del trabajo. En el capítulo V se describe la propuesta metodológica para estudiar la factibilidad económica y su impacto de alguna expansión de un un sistema eléctrico de potencia. El capítulo VI describe un modelo hipotético al cual se le aplicará la metodología descrita en el capítulo anterior, reportándose en el capítulo VII los resultados obtenidos por la simulación, y siendo analizados en el capítulo VIII. Finalmente, en los capítulos IX y X se presentan, respectivamente, las conclusiones y recomendaciones.

Adicionalmente se anexa la copia del código desarrollado para las simulaciones y las referencias bibliográficas.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mayoría de los estudios de factibilidad económica en distintas áreas se realizan de forma determinista, en consecuencia los análisis pudieran arrojar conclusiones incorrectas. Ha comenzado una tendencia a incluir las aleatoriedades como elemento importante a la hora de la planificación de un proyecto, contando con el apoyo de las computadoras.

En este trabajo de grado se presenta el problema de cómo estudiar la susten-

tabilidad de nuevas inversiones de expansión en un sistema eléctrico de potencia, tomando en cuenta las aleatoriedades más significativas y factores de riesgo, tales como: las variaciones en la demanda de energía eléctrica, los ingresos producto de las tarifas, los gastos asociados a la expansión del sistema eléctrico de potencia, como la construcción de líneas de transmisión, subestaciones; los gastos productos por la ocurrencia de fallas, entre otras variables que pudieran ser de importancia.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Diseñar una metodología para evaluar la expansión de un sistema de potencia.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Describir los componentes de un sistema de potencia desde la visión técnica y económica.
2. Delimitar un sistema de potencia el cual será el objeto de estudio.
3. Caracterizar la demanda.
4. Analizar y caracterizar la distribución probabilística de las fallas.
5. Modelar matemáticamente el sistema de potencia a simular.
6. Verificar la funcionalidad del modelo.
7. Experimentar escenarios en el modelo.

CAPÍTULO II

MARCO HISTÓRICO

2.1. RESEÑA HISTÓRICA

El método Monte Carlo surgió por los años 1944, impulsado por dos grandes acontecimientos: el éxito de las pruebas nucleares en Alamogordo y la creación de la primera computadora electrónica, sustituyendo las antiguas máquinas electro-mecánicas.

Esto marcó el renacimiento de una técnica matemática conocida anteriormente como el muestreo estadístico, la cual cuenta con usos aislados y sin desarrollar en tiempos anteriores. Por ejemplo, en la segunda mitad del siglo XIX, un grupo de personas realizaron experimentos en los cuales lanzaban una aguja de forma aleatoria en una tabla marcada con líneas rectas y paralelas para inferir el valor de π mediante observaciones del número de intercepciones entre las agujas y las líneas (Hammersley y Handscomb, 1975).

Temprano en el siglo XX, escuelas de estadística británicas trabajaron en una especie de método de Monte Carlo poco sofisticado, pero fue usado con carácter didáctico, no para propósitos de investigación. Era visto como una especie de laboratorio donde los estudiantes podían confirmar la teoría de las probabilidades.

En 1908, Student (citado por Hammersley y Handscomb (1975)) usó el muestreo experimental para ayudarlo en su descubrimiento de la distribución del coeficiente de correlación.

La posibilidad de aplicar el método Monte Carlo a problemas deterministas fue notada por los científicos John von Neumann, Nicholas Metropolis, Enrico Fermi

y Stanislaw Ulam, durante su trabajo en Los Álamos, los cuales lo utilizaron para computar problemas de física nuclear. El nombre de Monte Carlo fue sugerido por Metropolis, haciendo referencia a un tío de Ulam que pedía prestado dinero porque el tenía que ir a Monte Carlo, ciudad famosa por sus casinos y juegos de azar.

Fue este grupo de científicos quienes no sólo redescubrieron independientemente el método Monte Carlo, sino además aseguraron que sus colegas científicos conocieran las posibilidades y potencial del método, así como sus aplicaciones a la física.

Los últimos años marcan un repunte en el uso del método Monte Carlo, ya que es la mejor (si no la única) vía para resolver problemas particulares.

La información de esta reseña fue tomada de un libro titulado *Monte Carlo Methods* escrito por Hammersley y Handscomb (1975) y de un artículo escrito por el mismo Nicholas Metropolis titulado *The Beginning of the Monte Carlo Method*, publicado por *Los Alamos Science Special Issue* en 1987 (Metropolis, 1987).

El método de Monte Carlo será tratado de forma más detallada en el capítulo III; en la página 8.

2.2. ESTUDIO DE ANTECEDENTES

Expandir un sistema de potencia no es una decisión sencilla de tomar debido a los altos costos que implica. Esto lleva a pensar que desarrollar una metodología que tome en cuenta los riesgos de expandir un sistema de potencia es un aporte importante en el campo de la ingeniería eléctrica.

Las técnicas de análisis de riesgo pueden ser una herramienta fundamental para la toma de decisiones de índole económica, las cuales podrían ser utilizadas

por los planificadores de diversos proyectos en distintas áreas para entender que factores pueden ser perjudiciales; así como la probabilidad de que esos factores produzcan resultados adversos.

En el entorno de la ingeniería eléctrica de potencia, se encuentran diversos trabajos sobre el análisis de riesgos, tales como el de Kasim y cols. (2010) en el cual usan la técnica del “Bootstrapping” para medir el riesgo de un sistema de potencia tomando en cuenta los indicios de falla en el sistema y la incertidumbre de las variaciones en la carga.

También se tiene el trabajo de Schreiner y Balzer (2007) en el cual se usa el método de Valor en Riesgo (VaR por siglas en inglés), que es una popular técnica en el mundo financiero, la cual mide la peor pérdida esperada dado un límite de tiempo bajo condiciones normales de mercado y bajo un nivel de confianza establecido, pero aplicado a la transmisión y distribución de energía eléctrica.

Un trabajo que utiliza tanto el método de Monte Carlo como los conjuntos difusos, es el de Li y cols. (2008), con el cual capturan la aleatoriedad, la representación de las cargas como variables difusas y los parámetros que componen las salidas de servicio del sistema.

Específicamente sobre usos del método de Monte Carlo aplicado en el área se tiene el trabajo de Pantos y cols. (2004), en el cual toman previsiones para un sistema de potencia en estado operativo usando el análisis de flujo de carga.

En Venezuela, los estudios sobre análisis de riesgo surgieron en diferentes universidades nacionales en varias áreas. Oliveira (2005) desarrolló un modelo de análisis de riesgos crediticios para una empresa de seguros nacional, con el fin de optimizar el sistema de selección de riesgos de la empresa.

Gómez (1995) elaboró una metodología para el análisis de riesgo que permi-

tiese detectar, evaluar y controlar las posibles causas de riesgos que afectan el desarrollo de un proceso industrial, y facilitar con ello, la toma de decisiones de la empresa.

Pisani (2003) desarrolló una metodología para evaluar un proyecto de inversión de una compañía de telecomunicaciones inalámbricas; que permitió identificar las variables y eventos de riesgo más importantes que pudiesen afectar la rentabilidad del proyecto; usando para ello técnicas de simulación de Monte Carlo para la obtención de resultados. Los mismos demostraron que las técnicas de análisis de riesgo constituyen una herramienta importante para la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre.

Finalmente, en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela, el único antecedente relacionado con el análisis de riesgo bajo condiciones de incertidumbre es el Trabajo de Grado de Martínez (2009), el cual desarrolló una metodología para evaluar la expansión de los servicios básicos ofrecidos por un sistema de telefonía móvil celular, permitiendo así estudiar de forma cuantitativa la fiabilidad o sustentabilidad de un proyecto de inversiones para la ampliación del sistema.

La metodología propuesta por Martínez (2009) está basada en un modelo matemático y computacional, el cual realiza evaluaciones del sistema a través del método de Monte Carlo.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. MÉTODO DE MONTE CARLO

3.1.1. Definición

Hammersley y Handscomb (1975) definen al método de Monte Carlo como la rama de las matemáticas experimentales encargadas de estudiar los sistemas, mediante experimentos con números aleatorios. Estos experimentos pueden ser análisis de sistemas, problemas numéricos, o actividades que involucren incertidumbres de procesos. Wittwer (2004) afirma que este método tiene como meta definir como la *variación aleatoria, desconocimiento de un parámetro* o el *error* afecta la sensibilidad, desempeño o la confiabilidad del sistema que está siendo modelado.

Una simulación por Monte Carlo es un método que evalúa un sistema determinista usando series de números aleatorios como entrada. Este método se usa cuando el sistema es complejo, no lineal o involucra parámetros no conocidos o estocásticos. Estas simulaciones tienen un gran número de corridas, por lo que se recurre al uso de computadores para realizarlas (Wittwer, 2004).

El método Monte Carlo puede clasificarse como un método de muestreo, debido a que los números aleatorios, generados con una determinada función de densidad de probabilidades, simulan una muestra de la población real. Por eso se trata de elegir funciones de densidades cuyas distribuciones se asemejen a los datos que se tengan o cumplan con el criterio del experimentador.

Para efectuar un estudio de simulación por Monte Carlo, Sullivan y cols. (2004)

establecen que el primer paso es elaborar un modelo analítico que represente, bajo un conjunto de condiciones, una situación real. El segundo paso es identificar la distribución de probabilidad de cada variable de incertidumbre presente en el modelo, a partir de datos históricos o conjeturas. Una vez determinadas estas variables, se usan para determinar el resultado de una salida del modelo.

Al repetir esto muchas veces este proceso de muestreo, se generan datos que pueden ser representados como histogramas o convertirlas en barras de error, predicciones de confianza, zonas de tolerancia e intervalos de confianza.

3.1.2. Análisis de Riesgo

Las simulaciones por Monte Carlo son usadas habitualmente en el ámbito de la economía para el análisis de riesgo y la toma de decisiones, como ayuda cuando hay dudas presentes en las tendencias de los mercados, fluctuaciones y demás factores desconocidos.

Se puede definir riesgo como la incertidumbre producida en el rendimiento de la inversión debida a los cambios producidos en el entorno. Por otra parte, el análisis de riesgo consiste en un estudio cuantitativo de la incertidumbre presente en un sistema, el cual permite estimar la probabilidad de un evento, como por ejemplo: el riesgo en sistemas de negocios, ingeniería, entre otras; ofreciendo un índice de medición de la fiabilidad del sistema (Martínez, 2009).

Los sistemas eléctricos de potencia no están exentos del riesgo, especialmente a la hora de tomar decisiones sobre expandirlo o no. Adicionalmente, es importante ver la confiabilidad del sistema, es decir, si el mismo puede surtir la suficiente energía eléctrica a los consumidores.

3.2. SISTEMA DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia es una red de elementos eléctricos usados para generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica. Todos los sistemas eléctricos de potencia se encuentran divididos en tres partes fundamentales como lo son: la generación, la transmisión y la distribución.

3.2.1. Generación

Es la conversión de cualquier forma de energía a energía eléctrica. Ésta se realiza en las plantas eléctricas, siendo los generadores las máquinas eléctricas encargadas de esto, ya que se les entrega energía cinética y la transforman en energía eléctrica.

Según Wildi (2007) las plantas de generación pueden clasificarse conforme a la fuente primaria de donde se extrae la energía:

1. *Plantas de Generación Térmica:* las plantas de generación térmica producen electricidad a partir del calor liberado por la combustión de carbón, petróleo o gas natural. La mayoría de las plantas tienen capacidades entre 20 MW y 1500 MW (Wildi, 2007) a fin de alcanzar una alta eficiencia y economía de una instalación grande.

Por lo general, las plantas térmicas se localizan cerca de un río o lago porque se requieren grandes cantidades de agua de enfriamiento para condensar el vapor a medida que sale de las turbinas. Estas plantas tienen una eficiencia cercana al 45 % debido a las pérdidas de las turbinas;

2. *Plantas de Generación Hidroeléctrica:* las plantas de generación hidroeléctrica convierten la energía potencial proveniente de una caída de agua en energía eléctrica mediante el movimiento de una turbina hidráulica acoplada a un generador sincrónico. Debido al hecho de que la potencia que se puede

extraer de una caída de agua depende de su altura y caudal, el tamaño y la ubicación física de una planta hidroeléctrica dependen de estos factores, además del ambiental. En conclusión, no se puede construir una planta hidroeléctrica en cualquier lugar. Es importante destacar, que los recursos hidráulicos en la mayoría de los países industrializados se han desarrollado ampliamente (Wildi, 2007);

3. *Plantas de Generación Nuclear:* las plantas nucleares producen electricidad a partir del calor liberado por una reacción nuclear. Cuando el núcleo de un átomo se divide en dos se libera una enorme cantidad de energía térmica, la cual es utilizada para convertir agua en vapor y mover una turbina. Una planta nuclear es idéntica a una térmica, con la diferencia de que se reemplaza la caldera por un reactor nuclear.

Aun cuando se puede explotar el viento, las mareas y la energía solar, estas fuentes energéticas representan una pequeña parte de la energía necesaria, y son poco fiables a la hora de planificar un sistema eléctrico de potencia.

No obstante, Wildi (2007) ofrece otra subdivisión, la cual establece el criterio en el tiempo en que suministran energía, encontrándose los siguientes tipos de plantas de generación:

1. *Plantas de Potencia Base:* suministran toda la potencia en todo momento. Las plantas nucleares y plantas de carbón están bien adaptadas para suministrar la demanda base;
2. *Plantas de Potencia Intermedia:* pueden responder relativamente rápido a cambios de demanda, casi siempre agregando o suprimiendo una o más unidades de generación. Las plantas hidroeléctricas son muy adecuadas para este propósito;

3. *Plantas de Potencia Pico*: suministran potencia durante intervalos breves a lo largo del día. Estas plantas se deben poner en servicio con mucha rapidez. Por consiguiente, están equipadas con motores primarios tales como diesel, turbinas de gas, motores de aire comprimido o turbinas de almacenamiento y bombeo que se pueden arrancar en unos cuantos minutos.

3.2.2. Transmisión y Distribución

Toda la electricidad producida en los centros de generación se debe transportar hacia los grandes centros poblados, que por lo general se encuentran bastante alejados uno del otro. Para realizar esta labor de forma eficiente se cuenta con el transformador; el cual eleva el voltaje generado en las plantas a unos niveles que disminuyan las pérdidas por efecto Joule. Los transformadores se colocan en subestaciones, las cuales están interconectadas por líneas de transmisión, siendo éstas un grupo de conductores suspendidos de grandes torres metálicas que transmiten la potencia eléctrica desde los generadores hasta la carga.

Una vez que la línea de transmisión se aproxima a los puntos donde debe ser distribuida la energía eléctrica, es necesario reducir los niveles de voltaje por medio de transformadores reductores; para facilitar así el transporte de energía a los grandes centros industriales y residenciales de las ciudades.

Subestaciones

Una subestación eléctrica es la exteriorización física de un nodo de un sistema eléctrico de potencia, en el cual la energía se transforma a niveles adecuados de tensión para su transporte o distribución. Está conformada por un conjunto de equipos utilizados para controlar el flujo de energía y garantizar la seguridad del sistema por medios automáticos de protección.

Una subestación puede estar asociada con una central generadora, controlando

directamente el flujo de potencia eléctrica al sistema, con transformadores de potencia llegando a la tensión deseada. También puede conectar diferentes rutas en el mismo nivel de tensión. Algunas veces, una subestación desempeña las dos funciones.

Básicamente una subestación consiste en un número de circuitos de entrada y salida, y contiene los siguientes componentes principales: transformadores, interruptores, seccionadores, reactores, transformadores de corriente, transformadores de tensión, pararrayos, etc.

Líneas de Transmisión

La energía eléctrica es transportada por conductores tales como líneas de transmisión elevadas y cables subterráneos, los cuales poseen importantes propiedades eléctricas que afectan en gran medida la transmisión de energía eléctrica.

Según Wildi (2007) las líneas de transmisión pueden clasificarse de acuerdo con el nivel de tensión a la cual operan:

1. *Líneas de extra alto voltaje (EAV)*: se utilizan cuando las plantas de generación están muy alejadas de los centros de carga. Estas líneas se ponen en una clase aparte debido a sus propiedades eléctricas especiales. Operan a tensiones de hasta 800 kV y alcanzar longitudes de 1000 km;
2. *Líneas de alto voltaje (AV)*: conectan las subestaciones principales con las plantas de generación. Las líneas se componen de conductores aéreos o cables subterráneos que operan a voltajes por debajo de 230 kV. En esta categoría también se encuentran las líneas que transmiten energía entre dos sistemas para incrementar la estabilidad de la red;
3. *Líneas de mediano voltaje (MV)*: enlazan los centros de carga con una de las muchas subestaciones de la compañía de electricidad. Por lo general, el

voltaje oscila entre 2,4 kV y 69 kV. Forman parte de sistemas radiales, los cuales son adecuados para suministrar energía a varios centros de carga, como bloques residenciales, industrias pesadas, centros comerciales, entre otros;

4. *Líneas de bajo voltaje (BV)*: son conductores aislados, generalmente de aluminio, que a menudo van de un transformador de distribución a la entrada del consumidor. Pueden ser elevadas o subterráneas, donde el transformador actúa como una subestación miniatura. Opera en un rango de 600 V o menos.

El diseño de una línea de transmisión depende de los siguientes criterios:

1. la cantidad de potencia activa que se tiene que transmitir;
2. la distancia a la que se debe llevar la energía eléctrica;
3. el costo de la línea;
4. crecimiento esperado de la carga eléctrica;
5. consideraciones estéticas, congestión urbana y facilidad de instalación.

Una línea de transmisión está compuesta por: conductores, aisladores, pararrayos, amortiguadores, Estructuras de soporte.

3.3. CONCEPTOS DE INGENIERÍA ECONÓMICA

Los proyectos de ingeniería no sólo deben ser realizables en el aspecto físico, sino también en el económico. Su rendimiento a lo largo de un período de tiempo puede determinar la viabilidad del proyecto, es decir, sus utilidades deben exceder

los costos asociados con el diseño e implementación. Es importante proveer bienes y servicios que satisfagan al consumidor con un costo asequible.

En esta sección se definen los conceptos de ingeniería económica que serán empleados a lo largo del trabajo.

3.3.1. Capital e interés

El término capital se refiere a la riqueza en forma de dinero o propiedades que puede utilizarse para generar más riqueza (Sullivan y cols., 2004). Ludwig von Mises, en su obra *La Acción Humana*, (citado por Toro (1993)) define el capital como la suma equivalente de dinero de todos los activos menos la suma equivalente de dinero de todos los pasivos en cierto momento de cierta unidad empresarial. No importa en qué puedan consistir estos activos, ya sean terrenos, edificios, equipos, herramientas, derechos, documentos por cobrar, efectivo o lo que sea.

Como este trabajo incluye la aplicación de capital durante largos períodos de tiempo, es necesario considerar su efecto. Básicamente, el dinero tiene más valor hoy que dentro de unos años o más tiempo por el efecto del interés que pueda generar. Podemos concluir que el capital es una función del tiempo y es incorrecto comparar cantidades de dinero referidas en distintos momentos del tiempo.

El interés puede ser visto como un índice utilizado para medir el rendimiento del capital. Toro (1993) lo define como el pago correspondiente a los servicios del capital; o también, como el monto que hay que pagar para recibir un préstamo destinado a la adquisición de bienes de capital, con los cuales, producir otros bienes.

Existen dos clases de interés: el simple y el compuesto.

Se dice que el interés es *simple* si la utilidad que se obtiene es una proporción

lineal de la cantidad inicial de capital, la tasa de interés y el número de períodos de interés de inversión. En la práctica comercial contemporánea no es común que se utilice el interés simple.

Por otro lado, se dice que el interés es *compuesto* siempre que el cobro de éste por cualquier periodo se base en la cantidad principal que resta más cualquier cargo por intereses acumulados hasta el comienzo de ese período. En este caso, se genera una ganancia sobre el interés ganado en forma previa. Este efecto se le conoce como capitalización. En la práctica, el interés compuesto es mucho más común que el simple, y es el que se usará en este trabajo.

3.3.2. Diagramas de flujo de efectivo

Un diagrama de flujo de efectivo es una representación gráfica de los movimientos de efectivo, considerando su magnitud y dirección (ingresos o egresos), a lo largo del tiempo dividido en períodos determinados (trimestres, semestres, años, entre otros). El diagrama de flujo de efectivo emplea varias convenciones (Sullivan y cols., 2004):

1. la línea horizontal es una escala de tiempo, con el avance del tiempo de izquierda a derecha. Cada marca sobre esta línea indica un período de tiempo que puede estar en meses, años o cualquier cantidad de tiempo conveniente;
2. las flechas significan flujos de efectivo y se colocan al final del período. Las flechas que apuntan hacia abajo representan egresos (salidas de capital) y las flechas hacia arriba representan ingresos (entradas de capital). La longitud de las flechas viene dada por la magnitud de la cifra asociada.

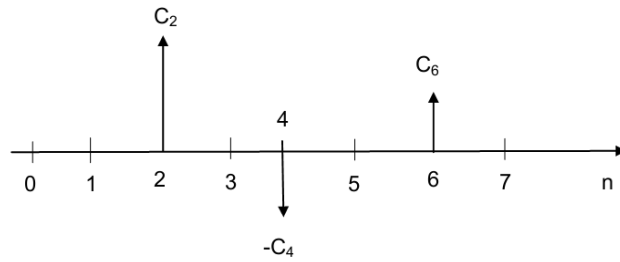


Figura 3.1: Diagrama de flujo de efectivo

Una cierta cantidad de dinero en un momento del tiempo, puede tener un equivalente en otro momento. La acción de referir dinero a un momento particular es conocido como *trasladar el dinero en el tiempo*. Para trasladar una cierta cantidad C_0 de cualquier unidad monetaria a n períodos en el futuro a una tasa de interés periódica i , se emplea la siguiente ecuación:

$$C_n = C_0(1 + i)^n, \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad (3.1)$$

donde C_n indica el equivalente en dicha unidad monetaria de la cantidad C_0 n períodos en el futuro.

Si se quiere trasladar el dinero al pasado, se utiliza la siguiente fórmula:

$$C_0 = C_n \left(\frac{1}{1 + i} \right)^n, \quad \forall n \in \mathbb{N}. \quad (3.2)$$

3.3.3. Costos fijos, variables e incrementales

En economía, el costo es el valor monetario del consumo de factores que supone el ejercicio de una actividad económica destinada a la producción de un bien o servicio. Todo proceso de producción de un bien o servicio supone el consumo o

desgaste de una serie de factores productivos.

Los *costos fijos* son aquellos que no resultan afectados por cambios en el nivel de actividad de las operaciones, dentro de un rango de la capacidad de producción instalada (Sullivan y cols., 2004). Los costos fijos típicos incluyen seguros de inmuebles, impuestos, administración general y salarios administrativos, entre otros.

Los *costos variables* son aquellos que están asociados con la operación y que varían en relación con la cantidad de producción. Por ejemplo, los costos del material y la mano de obra que se usan en un producto o servicio son costos variables, pues su total varía con el número de unidades que se producen, aún manteniendo los mismos costos por unidad (Sullivan y cols., 2004).

Por último, los *costos incrementales* son aquellos que resultan del incremento en la producción de una o más unidades de un sistema. Se asocia con frecuencia a decisiones del tipo “hacer o no hacer” que implican un cambio limitado en el nivel de producción (Sullivan y cols., 2004).

3.3.4. Tasa de retorno mínima atractiva

La Tasa de Retorno Mínima Atractiva (TREMA), que a veces se conoce como la *tasa de interés efectiva o tasa por superar*, se elige para maximizar el bienestar económico de una organización.

La TREMA es establecida por la alta dirección de una empresa, teniendo en cuenta varias consideraciones como la cantidad de dinero disponible (así como su procedencia; es decir, si son capital propio de la empresa o son productos de un préstamo), el número de proyectos disponibles, el grado de riesgo, el tipo de actividad económica: financiera, industrial, servicios, entre otras (Sullivan y cols., 2004).

3.3.5. Método del valor presente

El método del valor presente (VP) se basa en el concepto del valor equivalente de los flujos de efectivo relativos a un punto del tiempo, en este caso presente. Es decir, todos los flujos de capital se descuentan al momento presente del tiempo con una tasa de interés que por lo general es la TREMA (Sullivan y cols., 2004).

Para encontrar el Valor Presente (VP) en función del interés por período, se aplica la ecuación:

$$v_p(i) = \sum_{k=0}^n f_k(1+i)^{-k}, \quad \forall i \in \mathbb{R}, \quad (3.3)$$

donde f_k denota una cantidad de capital en un k -ésimo instante de tiempo.

La ecuación (3.3) sólo se puede aplicar bajo el supuesto de que la tasa de interés se mantiene constante a lo largo de los $(n+1)$ períodos.

3.3.6. Inflación

Los precios de los bienes y servicio rara vez se mantienen constantes por largos períodos de tiempo. Estos se ven afectados por la inflación, ocasionando un aumento de precios y en consecuencia, la pérdida del valor del dinero. Sabino, precisa el término en su obra *Diccionario de Economía y Finanzas*, (citado por Toro (1993)): La inflación consiste en un aumento general de los precios que obedece a la pérdida de valor del dinero, producto de que la oferta monetaria crece más que la oferta de bienes y servicios.

La medida del cambio del poder adquisitivo de una moneda producto de la inflación se le llama *tasa de inflación de precios*. La forma como afecta a las sumas de dinero a lo largo del tiempo sigue el modelo matemático descrito por

las ecuaciones (3.1) y (3.2), con la diferencia de que se sustituye la tasa de interés por la de la inflación.

3.4. TEORÍA DE GRAFOS

Para modelar el sistema eléctrico de potencia, se hará uso de la teoría de grafos, por lo que es importante aclarar algunos de los conceptos básicos sobre la materia.

3.4.1. Definición

Un *grafo finito* G es un par de conjuntos; (X, U) , tales que $U \subset X^2$. X es un conjunto finito, no vacío, cuyos elementos se llaman *nudos*¹ o *vértices*. U es un conjunto de pares de vértices de $X \times X$ que definen una relación R , de modo que si los nudos están en la relación, existe al menos un *arco* o *línea* que los una (Giudici y Bris, 1997; Goberna y cols., 2004).

Si $u = (a, b) \in U$, los nudos a y b son la *cola* y *cabeza* del arco u . Si $u = (a, a)$, se dice que u es un *bucle* (básicamente, un arco que regresa al punto de partida). Los grafos suelen representarse mediante figuras planas, siendo los nudos pequeños círculos mientras que los arcos son representados por flechas.

Un grafo (X, U) del que se tiene alguna clase de información cuantitativa se le conoce como red. Se pueden representar problemas de demandas o existencias en los nudos, costos o capacidades de transmisión a través de los arcos, entre otros.

3.4.2. Representación de grafos por una matriz de incidencia

Los grafos pueden representarse con una matriz. Dado un grafo G con m nudos y n arcos, sin bucles, se define la matriz de incidencia $A_{m \times n}$, como $A = [a_{jh}]$, donde

¹En este trabajo se hablará con el término nudo a lo que en Venezuela se le denomina nodo.

$$a_{jh} = \begin{cases} +1 & , \text{ si el nudo } j \text{ es cabeza del arco } u_h; \\ -1 & , \text{ si el nudo } j \text{ es cola del arco } u_h; \\ 0 & , \text{ si no ocurre ninguna de las dos cosas,} \end{cases}$$

es decir: la columna h -ésima de A , la cual corresponde al arco u_h , se forma poniendo $+1$ en la fila j -ésima si el nudo j es su cabeza, -1 si es su cola o 0 en cualquier otro caso. (Goberna y cols., 2004)

Se puede ver un ejemplo de como se vería dicha matriz:

$$A_{m \times n} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \cdots & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ m \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & -1 \\ 0 & -1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & -1 \end{pmatrix} \end{matrix}. \quad (3.4)$$

3.4.3. Representación de grafos por una matriz de adyacencia

Otra forma de representar grafos es haciendo uso de su *matriz de adyacencia*, la cual es un arreglo cuadrado de $m \times m$ elementos, donde tanto las filas como las columnas representan los nudos del grafo (Giudici y Bris, 1997).

Así, un grafo G con m vértices, la matriz $A = [a_{jh}]$ es la matriz de dimensión $m \times m$, en la cual a_{jh} es igual a 1 si m_j es adyacente con m_h y 0 si no lo es.

Se puede ver un ejemplo de como se vería dicha matriz:

$$A_{m \times m} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \cdots & m \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ m \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}. \quad (3.5)$$

Es importante hacer notar que si los grafos son simples (no tienen lazos) los elementos $a_{jh} = 0$ si $j = h$, esto significa que los elementos de la diagonal principal de la matriz de adyacencia son siempre 0. Si las flechas carecen de orientación, todos los elementos $a_{jh} = a_{hj}$, es decir, la matriz es simétrica.

3.5. CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

En el mundo, es prácticamente imposible estudiar de forma completa una población de interés, por lo que se hace uso de la inferencia estadística; donde se puede obtener información de una población usando una muestra de la misma.

Un *estadístico* se define como cualquier función de las observaciones de una muestra que no contenga parámetros desconocidos. Se denomina *estimador* de un parámetro desconocido a la estadística que corresponde a dicho parámetro. Es importante tener presente que un estimador es una variable aleatoria. El valor numérico de un determinado estimador es conocido como *estimación* y se calcula con datos de la muestra (Montgomery, 1991).

Se requieren dos propiedades de los estimadores para que sean considerados como efectivos:

1. debe ser *insesgado*; es decir, el promedio a largo plazo o valor esperado del estimador debe ser el parámetro que se está estimando;

2. debe tener varianza mínima.

A veces es preferible dar un intervalo que se espera contenga el valor del parámetro bajo estudio, este intervalo es conocido como *intervalo de confianza*. Sea θ un parámetro desconocido, para obtener una estimación del intervalo de θ se necesita determinar la estadística $\hat{\Theta}$ de manera que se cumpla el enunciado de probabilidad (Montgomery, 1991):

$$P(\hat{\Theta} - k \leq \theta \leq \hat{\Theta} + k) = 1 - \alpha, \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (3.6)$$

El intervalo

$$\hat{\Theta} - k \leq \theta \leq \hat{\Theta} + k, \quad (3.7)$$

se denomina intervalo de confianza de $100(1 - \alpha)\%$, con un nivel de significación α , del parámetro θ . La ecuación (3.7) se llama intervalo de confianza al 95% para θ si $\alpha = 0,05$. En otras palabras, se tiene el 95% de confianza en que el intervalo calculado contiene el verdadero parámetro de la población (Walpole y Myers, 1984). Cuando el intervalo de confianza es más ancho, se puede tener más confianza en que el intervalo dado contenga el parámetro desconocido. Idealmente, se prefiere un intervalo corto con un alto grado de confianza.

3.5.1. Estimación de la media

La media muestral \bar{x} es un estimador puntual de la media poblacional μ . Ésta mide la tendencia central de la muestra y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (3.8)$$

Para calcular el intervalo de confianza al $100(1 - \alpha)\%$ para μ , conociendo σ (desviación estándar) se usa la siguiente desigualdad (Walpole y Myers, 1984):

$$\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.9)$$

donde \bar{x} es la media de una muestra de tamaño n , tomada de una población con varianza σ^2 conocida y $z_{\alpha/2}$ es el valor de la distribución normal estándar que deja un área de $\alpha/2$ hacia la derecha.

Para muestras de tamaño $n \geq 30$, la teoría del muestreo garantiza un grado de confianza bueno para poblaciones cuya forma no sea normal. Como generalmente no se conoce la σ de la población, puede reemplazarse con la desviación estándar muestral s , eso si $n \geq 30$ (Walpole y Myers, 1984).

3.5.2. Estimación de la varianza

La varianza muestral s^2 es un estimador puntual de la varianza poblacional σ^2 . Ésta mide la dispersión y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}. \quad (3.10)$$

Para calcular el intervalo de confianza al $100(1 - \alpha)\%$ para σ^2 , se usa la siguiente desigualdad (Walpole y Myers, 1984):

$$\frac{(n-1)s^2}{\chi_{\alpha/2}^2} < \sigma^2 < \frac{(n-1)s^2}{\chi_{1-\alpha/2}^2}, \quad (3.11)$$

donde s^2 es la varianza de la muestra aleatoria de tamaño n , y $\chi_{\alpha/2}^2$ y $\chi_{1-\alpha/2}^2$ son los valores de una distribución ji cuadrada con $v = n - 1$ grados de libertad que deja áreas de $\alpha/2$ y $1 - \alpha/2$ respectivamente, hacia la derecha.

3.5.3. Estimación de una proporción

Un estimador puntual de la proporción p en un experimento binomial está dado por la estadística $\hat{P} = X/n$. Por lo tanto, la proporción de la muestra $\hat{p} = x/n$ será utilizada como la estimación puntual para el parámetro p .

Para calcular el intervalo de confianza al $100(1-\alpha)\%$ para p , se usa la siguiente desigualdad (Walpole y Myers, 1984):

$$\hat{p} - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}\hat{q}}{n}} < p < \hat{p} + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}\hat{q}}{n}}, \quad (3.12)$$

donde \hat{p} es la proporción de éxitos en una muestra aleatoria de tamaño n , $\hat{q} = 1 - \hat{p}$ y $z_{\alpha/2}$ es el valor de la distribución normal estándar que deja un área de $\alpha/2$ hacia la derecha. Todo esto con $n \geq 30$.

3.6. CONCEPTOS DE ALGORITMIA

Parte de la propuesta metodológica contendrá un algoritmo, por lo que es prudente aclarar que es el concepto de algoritmo y algunas de sus propiedades.

3.6.1. Definición

Puede definirse que un *algoritmo* es un método efectivo de realizar un proceso expresado en una lista finita de instrucciones bien definidas (Hartley, 1987).

Según Knuth (1968), cinco características fundamentales de todo algoritmo son :

1. *Carácter Finito*: un algoritmo debe terminar después de un número finito de iteraciones;
2. *Carácter Decisivo*: cada instrucción debe ser clara y concisa, de forma que especifique que se va a hacer;
3. *Entradas*: son variables iniciales que establecen las condiciones al comienzo del proceso;
4. *Salidas*: son variables terminales producto del fin del proceso marcado por el algoritmo;
5. *Eficacia*: un algoritmo debe lograr el resultado para el que fue creado, sus operaciones deben poder realizarse en un período finito de tiempo.

3.6.2. Representación algorítmica

Hay diversas maneras de expresar como funciona un algoritmo. Entre las más comunes se encuentran: el lenguaje natural, el pseudocódigo, los diagramas de flujo y los lenguajes de programación (Martínez, 2009).

En el capítulo VI, se hará uso del pseudocódigo para expresar los pasos que se deben realizar para aplicar la metodología diseñada en este trabajo de grado. Un pseudocódigo es una descripción del algoritmo, que a pesar de que se asemeja a un lenguaje de programación, no utiliza el código de ningún lenguaje en específico; más bien, utiliza verbos para determinar los pasos del algoritmo, como las comparaciones lógicas, lazos iterativos, asignaciones de variables, cálculo de operaciones, entre otros.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describen los principales aspectos que fundamentan los métodos empleados para alcanzar los objetivos fijados en este trabajo.

La estructura metodológica seguida en este trabajo se encuentra sustentada sobre los principios de análisis de sistemas y modelos de simulación; siendo estos temas desarrollados ampliamente por diversos autores.

Para alcanzar una solución, hay que seguir un esquema sistemático que define un método, o mejor dicho, una metodología. Primero, se requiere concebir un modelo que refleje de forma aproximada el comportamiento real del sistema. Este modelo debe representarse de forma matemática y lógica, permitiéndole al experimentador manipularlo para poder representar un caso de estudio mediante el ajuste de sus variables. Este modelo debe reportar datos, y es aquí donde intervienen los métodos de *simulación*; siendo esta una herramienta para el análisis de sistemas, la cual permite alcanzar una solución más rápida que emplear un método analítico. Es importante destacar que además la simulación presenta un banco de prueba para el comportamiento del modelo bajo distintos escenarios.

4.1. PROPÓSITO DE ESTUDIO

El primer paso en cualquier investigación consiste en especificar de forma concisa el propósito perseguido por el estudio que se lleva a cabo. Siguiendo esta idea, resulta importante aclarar cuáles son los criterios que prevalecen tras la investigación de acuerdo a los objetivos perseguidos.

Todo esto conlleva a la necesidad de fijar compromisos entre los factores

involucrados. Estos criterios, fijados de acuerdo al propósito de estudio, determina el valor de los resultados obtenidos. De lo anteriormente expuesto se deriva la practicidad de los estudios de simulación; ya que permite experimentar con los diferentes criterios a través de la combinación de diversos factores y niveles.

El propósito de los estudios de simulación puede ser muy variado, sin embargo, para este trabajo consiste en realizar modelos de sistemas complejos en los que se consideran factores de costos, fallas y riesgos en el tiempo, en el cual se pueden controlar variables y parámetros para observar el desempeño del sistema bajo distintos escenarios, de esta manera se pueden evaluar las relaciones de causa y efecto que existen entre los elementos del sistema.

4.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Un sistema se define como un conjunto de elementos que se encuentran vinculados entre sí, a través de interacciones o dependencia, todo con la finalidad de llevar a cabo un proceso o realizar un objetivo. Se define como *componentes* a los elementos u objetos que conforman un sistema y *relaciones* a los vínculos existentes entre ellos. Cada componente de un sistema presenta un conjunto de propiedades o *atributos*, de los cuales sólo se toma en consideración aquellos que influyen en el desempeño del sistema.

A pesar de esto, algunos componentes y atributos pueden ser omitidos a la hora de modelar el sistema; esto es debido a que un modelo es una aproximación del sistema real. Aquello que define cuáles componentes del sistema son considerados o no, se le conoce como *frontera*, la cual es especificada por el analista. Aquellos elementos que quedan fuera de esta frontera; pudiendo pertenecer al sistema o no, pero que influyen en el mismo conforman el *entorno*.

El sistema es descrito a través de la explicación de sus componentes y de sus

relaciones; así como de identificar las variables y parámetros que rigen el sistema. El apreciar las variables y parámetros permiten estudiar los diversos estados del sistema.

4.3. PLANTEAMIENTO DE SUPUESTOS

Un *supuesto* es una idea que no se puede expresar en la proposición del modelo, pero es algo bajo lo que se funda la validez del mismo. Esto se realiza con el fin de simplificar el modelo de un sistema muy complejo (Mize y Grady, 1968).

Es de extrema importancia establecer los supuestos que rodean al modelo, ya que éstos establecen la frontera del sistema bajo estudio, precisan las condiciones de experimentación y limitan como será la interpretación de resultados.

Un tipo de supuesto son los que excluyen aspectos que influyen de manera despreciable en la respuesta esperada, pero que están presentes en la realidad. Otros se manejan para determinar una distribución aleatoria aún cuando se desconoce la distribución real. Dependiendo del sistema estudiado, pueden plantearse otros tipos de supuestos.

4.4. FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

4.4.1. Identificación de variables y parámetros

Las variables se definen como atributos del sistema que toman distintos valores de acuerdo a la fluctuación de los estados del sistema. Se pueden clasificar como aleatorias o deterministas.

Las variables *aleatorias* son aquellas cuyos valores se obtienen de un experimento aleatorio, es una relación entre un fenómeno estocástico y un conjunto de valores numéricos. Intuitivamente, una variable aleatoria puede tomarse como

una cantidad cuyo valor no es fijo pero puede tomar diferentes valores.

Las variables *deterministas*, en cambio, toman valores de procesos predecibles.

Un *parámetro* es una cantidad sobre la cual no se busca estudiar relaciones de causa y efecto.

4.4.2. Relaciones entre los componentes del sistema

Una vez descritas las variables del modelo, es necesario establecer cual es la relación matemática que hay entre ellas, para de esta forma crear la analogía entre las cantidades calculadas y las físicas.

Otro tipo de relaciones importantes son las lógicas, las cuales determinan comportamiento del tipo condicional.

4.4.3. Datos para el experimento de simulación

Los modelos de sistemas complejos requieren de una gran cantidad de datos que se deben tomar en cuenta para poder realizar la simulación. La obtención de dichos datos es una tarea complicada. Mize y Grady (1968) plantean que la recolección de datos puede provenir de diversas fuentes; tomando en cuenta el tipo de estudio que se realiza.

A pesar de lo anterior, los autores especifican dos categorías principales (Mize y Grady, 1968):

- datos históricos del sistema en particular;
- registro de datos empíricos.

Es deber del experimentador especificar la procedencia de los datos que se

usan para la simulación. Se debe aclarar los valores asignados a los parámetros fijados, así como las distribuciones probabilísticas de las variables aleatorias.

Es muy común no disponer de todos los datos requeridos, por lo que el experimentador debe realizar consideraciones y estimaciones lógicas de dichos datos; así como recurrir al juicio de expertos en el área o extraer otros sistemas similares para extraer la información necesitada.

4.4.4. Verificación y validación del modelo

Una vez desarrollado el modelo, se debe verificar que el mismo represente de forma efectiva lo que el analista ha definido como sistema; garantizando que las características más importantes del mismo, así como su comportamiento, estén reflejados en el modelo. Las relaciones matemáticas y lógicas deben ajustarse a la interacción de los componentes del sistema.

La verificación consiste en que el sistema se comporte de forma esperada y puede lograrse observando si el modelo presenta respuestas similares a lo que experimentaría el sistema real. También, se pueden comparar resultados obtenidos del modelo con cálculos obtenidos analíticamente.

Por otra parte, la validación consiste en comparar el modelo con un sistema real, cotejando los resultados con datos históricos del sistema. Un buen modelo debe ser capaz de aproximarse a la realidad, pero éste, al ser una aproximación, no es lógico esperar que entregue resultados iguales a los reales, debido al uso de supuestos e incontables variables que no se tomaron en cuenta. En conclusión, las respuestas obtenidas por un modelo están sujetas a un error.

De no superar las pruebas de verificación o validación, Se concluye que no se puede confiar de los resultados arrojados por el modelo, por lo que se debe realizar un proceso de revisión, ya sea reajustando los datos, revisando que las

interacciones entre las variables sean las correctas y en algunos casos, modificando los supuestos tomados en cuenta para la elaboración del modelo hasta que se logre una verificación o validación positiva.

4.5. ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

4.5.1. Formulación del algoritmo

Al tener el modelo matemático del sistema completado, se tiene que generar un algoritmo previo a cualquier simulación computacional. El algoritmo da las instrucciones de forma clara y precisa para poder ejecutar todas las operaciones lógico matemáticas del modelo y así poder obtener los resultados deseados.

4.5.2. Código del programa

Una vez finalizado el algoritmo, se deben traducir las instrucciones del mismo en comandos del lenguaje de programación en el cual se desee implementar el modelo.

4.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Finalmente, el último paso es el de analizar la información suministrada por los resultados de la simulación. Es importante destacar que en los modelos con altos volúmenes de información y presencia de variables aleatorias, es necesario utilizar métodos estadísticos.

Algunas pruebas que pueden realizarse son las de análisis de estadística descriptiva, interpretación de curvas de funciones de distribución acumulativa o densidad de probabilidades, análisis de varianza, pruebas de bondad de ajustes, pruebas de correlación entre variables y técnicas de análisis espectral o análisis de sensibilidad (Díaz y cols., 1996).

CAPÍTULO V

PROPUESTA METODOLÓGICA

El objetivo principal de este trabajo de grado es el de desarrollar una metodología para evaluar la rentabilidad económica de realizar un determinado plan de expandir un sistema de potencia, ya sea por habilitar nuevas líneas, incorporar nuevas plantas o subestaciones, así como la aparición de nuevos centros de demanda, utilizando una simulación por Monte Carlo. Un analista que desee aplicar esta metodología a un sistema eléctrico de potencia específico debe seguir las siguientes indicaciones.

Para cumplir con el propósito del estudio, el sistema eléctrico de potencia se ve como un modelo de repartición de una cantidad promedio de energía a los centros de consumo en un intervalo de tiempo.

Para poder describirlo, se usó la teoría de grafos, modelo sugerido por Fortoul (2011) donde se representan tres tipos de nudos:

- (a) *Nudos de Origen*: el primer nivel del grafo representa los puntos de generación del sistema;
- (b) *Nudos Intermedios*: el segundo nivel representa las subestaciones del sistema de potencia;
- (c) *Nudos Terminales*: por último, el tercer nivel representa los centros de consumo de energía.

Dentro de este modelo, los nudos terminales o de carga, se encuentran subdivididos en tres categorías, dado la naturaleza de sus cargas, cada cual con un

patrón de crecimiento y esquema tarifario diferente.

- *Clientes Residenciales,*
- *Clientes Comerciales,*
- *Clientes Industriales.*

Teniendo el diagrama unifilar del sistema de potencia real, incluyendo las posibles expansiones que se deseen realizar, debe realizarse una conversión a un diagrama de grafos, convirtiendo los puntos de generación, de transformación y de demanda en nudos y las líneas de transmisión en arco que unen los nudos.

Estos nudos tienen asociado varias variables, si son nudos de generación, se les asocia con una capacidad de generación de energía; si son de demanda, se les asocia con el consumo de energía.

Es importante que el analista defina que clase de consumo hay en esos nudos, así como su comportamiento en el tiempo, ya que con estos valores, se genera una serie de tiempo que modele como evoluciona el consumo de energía a lo largo del mismo; teniendo presente si crece o decrece, la velocidad de dicha tasa de cambio y las aleatoriedades a las que está sometido.

A continuación se asocian a los arcos las capacidades de transmisión de las líneas. Las capacidades instaladas serán disminuidas en cada lapso simulando las fallas que sufren las líneas, las cuales se reflejan en interrupciones del servicio.

Los planes de expansión serán tomados en cuenta como una incorporación de nuevos nudos al sistema (en caso de que se incorpore un centro de generación nuevo, una subestación o un centro de carga) o la modificación de las capacidades nominales de los arcos.

Estos planes, tardan un tiempo en incorporarse, por lo que el analista debe determinar el tiempo de inicio (en el cual se deberá empezar con la procura y construcción de la expansión del sistema; representando un costo para la empresa que deberá ser registrado en la simulación) y un tiempo de finalización, donde el grafo se ve alterado.

Una vez registrados los valores, se procede, con el uso de generadores aleatorios, a alterar los valores de capacidad y a determinar las demandas. Con esos valores, se establecen las ecuaciones del sistema, las cuales siguen un modelo de transporte (Prawda, 1982).

Ellas dependen del tipo de nudo al cual representan: si es un nudo original o de generación, la energía que sale debe ser menor a la capacidad instalada; si es un nudo intermedio la energía que entra al nudo es igual a la que sale y finalmente si es un nudo terminal o de consumo, la energía entrante es igual a la transmitida.

Otra condición que debe cumplir el modelo de transporte es que la energía no puede ser menor a cero y que no supere la capacidad de los arcos.

Tomando en cuenta todo esto, se minimiza la función objetivo utilizando métodos de programación lineal, siendo esta función la suma de la energía que circula por cada arco en un período específico.

En definitiva, el modelo de programación lineal a resolver queda expresado con el siguiente conjunto de ecuaciones e inecuaciones¹:

¹Aunque x_{ij} para todo i, j son variables aleatorias, éstas serán representadas con letras minúsculas, para no confundirlas con el vector X

$$\text{minimizar } \sum \sum x_{ij}, \quad (5.1)$$

sujeta a

$$\sum x_{ij} - \sum x_{jk} \geq -a_j, \quad (5.2)$$

$$\sum x_{ij} - \sum x_{jk} = 0, \quad (5.3)$$

$$\sum x_{ij} - \sum x_{jk} = b_j, \quad (5.4)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq C_{ij}. \quad (5.5)$$

Se destaca que los planes de expansión modifican el grafo, por lo que los parámetros de las ecuaciones pueden cambiar, así como adicionar nuevas ecuaciones al modelo.

Una vez resuelto el modelo de programación lineal, se procede a facturar los egresos e ingresos del sistema: El ingreso viene dado por la energía facturada en el lapso; mientras que los egresos es una combinación de los gastos fijos, gastos variables, los costos de la energía generada y los costos de expansión. El balance se logra como la sustracción de las cantidades mencionadas anteriormente.

Para poder hacer comparaciones económicas y así tomar la decisión más rentable, esta variable deberá ser llevada a valor presente, tomando en cuenta el interés y la inflación.

Otra variable que se desea saber es el consumo insatisfecho, que es la cantidad de dinero que representa la energía que se demandó pero no se pudo vender. Se toma en cuenta los tres tipos de consumidor. Al igual que el balance, esta variable deberá ser llevada a valor presente.

La última información que se requiere es la penalización de dinero que recibe el dueño del sistema por toda la energía no vendida. Este indicador será la suma

de los tres consumos insatisfechos en valor presente.

Todo lo anterior se realiza en un período de estudio fijado por el analista, el cual, adicionalmente debe definir una subdivisión de tiempo que marca los lapsos en los que se desea ver la evolución del sistema de potencia. Este proceso se repite una cantidad m de veces, la cual está determinada por la precisión de las medidas que desee el analista.

Cuando se tengan todos los datos de las corridas, se presentan los datos con un histograma y una función de acumulación, las cuales servirán para darle al analista la capacidad de visualizar todos los datos recolectados y así poder tomar una decisión.

En caso de querer saber cuál es el intervalo de confianza de la muestra de la población, se deben aplicar conceptos de estadística para tener una medida de cuan certera es la probabilidad de ruina o de que no se pueda satisfacer una cierta cantidad de consumo, entendiendo como probabilidad de ruina la probabilidad de tener un balance económico negativo.

CAPÍTULO VI

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En este capítulo se presenta un caso de estudio hipotético, el cual tiene como propósito aplicar la metodología propuesta a un sistema eléctrico de potencia, bajo un conjunto de escenarios y poder así evaluar la sustentabilidad de los nuevos proyectos propuestos sobre el sistema eléctrico de potencia, mediante la probabilidad de ruina asociada al proyecto. Otro parámetro a estudiar es la capacidad del sistema eléctrico de potencia de suministrar la energía eléctrica a sus clientes.

6.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para la simulación, se utilizó un sistema de potencia con la siguiente topología:

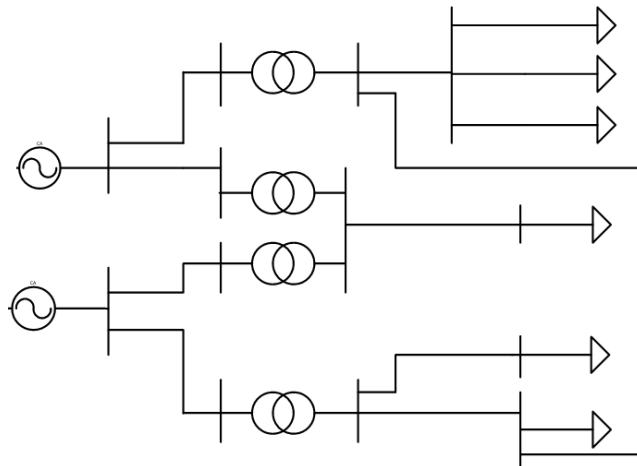


Figura 6.1: Diagrama unifilar del sistema de potencia a estudiar

Como se puede observar en la figura 6.1, el sistema presenta dos plantas generadoras, tres puntos de transformación y seis circuitos de cargas, las cuales

a su vez están divididas en tres circuitos residenciales, dos comerciales y uno industrial.

Ahora, llevada a su representación como grafo:

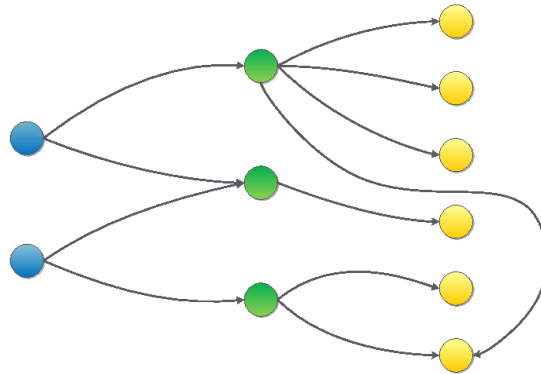


Figura 6.2: Sistema de potencia a estudiar representado como un grafo

La figura 6.2 muestra la representación del sistema eléctrico de potencia, en donde los nodos de color azul representan las dos plantas, los de color verde los puntos de transformación y los amarillos las cargas. Los arcos que conectan los nodos son correspondientes a las líneas de transmisión. Otra clasificación asociada a los nodos es la numeración: los de generación llevan los números uno y dos respectivamente, los de transformación 11, 12 y 13 y finalmente, los de consumo o demanda llevan los números 21, 22, 23, 24, 25 y 26. El orden al asignar los números fue ascendente, es decir, los nodos superiores reciben el número más pequeño y los de abajo el más grande.

Para especificar los tipos de usuario, los nodos 21, 22 y 23 representan clientes residenciales, los 24 y 25 comerciales y el 26 uno industrial.

Es importante destacar que para este modelo, la potencia viaja en un solo sentido: de los generadores a los transformadores y de éstos a las cargas, siguiendo

la ruta de los arcos cómo se puede ver en la figura 6.2.

Cada tipo de carga presenta patrones de crecimiento distinto, para este experimento se planteó un crecimiento en los clientes residenciales y tres escenarios para los clientes comerciales e industriales, en los cuales sufrían un descenso, un aumento y un consumo constante. Estos escenarios están planteados en el capítulo VII.

Es típica la ocurrencia de fallas en un sistema de potencia, ya sea por descargas atmosféricas en las líneas de transmisión, una mala operación, etc. Por esta razón, es conveniente tener presente el efecto que puedan tener las fallas sobre el sistema. Para este caso de estudio, se consideró que cada línea puede sufrir una desconexión a lo largo del tiempo. Las mismas, en caso de ocurrir, representan una merma en la capacidad de transmitir energía, lo que se traduce en una disminución de los ingresos así como la posibilidad de no poder satisfacer todo el consumo de energía de los clientes. La capacidad de generación no se considera afectada por las fallas.

En este modelo las líneas sufren una disminución en su capacidad de transmisión de energía para el período: ellas trabajan al 90 % de su capacidad nominal, con una disminución mínima de 80 % y una máxima igual a su capacidad nominal.

Dependiendo de la clasificación del cliente, se ofrecen tres tipos de facturación distinta, donde los ingresos al sistema son representados por el producto de dicha tarifa por el consumo de energía en el período de simulación. Estas tarifas se encuentran registradas en la tabla 7.1.

Así como se plantea la forma de ingreso, se toma en cuenta una serie de egresos o gastos que presenta la empresa encargada del sistema de potencia, específicamente por concepto del costo de generación de energía, pago del personal que labora en la empresa, mantenimiento y operación del sistema, y demás consideraciones.

Es importante recordar que los sistemas de potencia deben expandirse en el tiempo, ya que generalmente la demanda eléctrica crece de acuerdo a la población. Para esto, se deben aumentar las capacidades de transmisión y generación del sistema. No expandir un sistema de potencia se traducirá en la imposibilidad de satisfacer las necesidades energéticas de la población; pero hay que recordar que estas expansiones son costosas, por lo que si se elaboran proyectos de forma indiscriminada, puede que los gastos sean mayores que el retorno por el cobro de prestar el servicio, generando un balance negativo. Se concluye que estas expansiones no pueden ejecutarse sin un criterio determinado.

Para este sistema estudiado se plantea una expansión en las siguientes capacidades:

Tabla 6.1: Cambios de las capacidades de la expansión

Arco	Capacidad Original	Capacidad Alterada
C_{1-11}	200	300
C_{11-21}	20	90

Llevar a cabo la expansión requerirá una serie de inversiones a lo largo del tiempo, la cual contempla la fase de ingeniería conceptual, básica, de detalle, procura y construcción, durante las cuales la compañía no verá un retorno del capital debido a que este proceso toma tiempo; desde que se plantea el proyecto hasta que se realiza.

Para este caso, se plantea que el proyecto comience en el trimestre número tres y finalice en el cinco.

Este estudio se encuentra enfocado principalmente sobre la idea de la expansión, estimando cuantitativamente el riesgo asociado sobre la inversión, tomando en cuenta la tasa de inflación y el interés atractivo de la empresa.

El análisis estuvo centrado sobre dos variables, un indicador económico que será el valor presente del balance, entendido como la diferencia de los ingresos con los egresos llevados a un mismo momento del tiempo para poder compararlos de forma efectiva; y una variable de operación que será el consumo insatisfecho, en otras palabras, la diferencia de la energía demandada y la energía entregada realmente por el sistema.

6.2. PLANTEAMIENTO DE SUPUESTOS

Modelar de forma exacta un sistema de potencia es una tarea bastante compleja, por lo tanto, el modelo del sistema se encuentra fundamentado en una lista de supuestos. Estos supuestos se obtuvieron bajo los siguientes principios: delimitar la frontera del sistema sometido a estudio, delimitar el alcance del modelo y lograr concebir un modelo lo suficientemente aproximado al real como para ilustrar la metodología propuesta.

Supuestos. *Lista de supuestos que sustentan el modelo.*

1. Se considera que el elemento del sistema de potencia que más falla son las líneas de transmisión; representándose como una disminución en la capacidad de transmisión.
2. Las fallas de las líneas vienen dadas de forma aleatoria, regidas por una distribución probabilística triangular de la forma. $T(mín, mod, máx)$.¹
3. La generación se considera libre de fallas.
4. Los consumos de energía son aleatorios, regidos por una parte lineal especificada y una distribución probabilística triangular de la forma $T(mín, mod, máx)$.

¹*mín* es el menor valor que puede tomar la variable, *mod* es el valor para el cual la función densidad tiene un máximo y *máx* es el mayor valor que puede tomar la variable.

5. Se toma en cuenta tres tipos de consumidores: residenciales, comerciales e industriales.
6. El consumo de los clientes residenciales, comerciales e industriales presenta una tendencia lineal.
7. El consumo de los clientes residenciales siempre aumenta, el de los otros dos tipos de clientes depende de la experimentación.
8. No se interconectaron nudos en el mismo nivel, ya que se consideró que dicha interconexión cumple con propósitos operativos que ayudan a mantener la estabilidad del sistema, en otras palabras, ayudan a mejora la calidad del servicio, algo fuera del alcance de este trabajo.
9. La fuente de ingreso del sistema será la energía facturada.
10. Las tarifas se consideran constantes en el período de estudio.
11. Se tienen en cuenta tres tipos de tarifas, una para clientes residenciales, una para los clientes comerciales y finalmente una para los industriales, las cuales se cambian dependiendo el experimento.
12. Las fuentes de egreso están compuestas de dos partes, una variable y una fija.
13. Entre los costos variables se tiene el costo de la energía producida.
14. El costo por unidad de energía se considera que es único y que no varía durante el período de estudio.
15. Los cargos por depreciación se supondrán constantes y formarán parte del costo fijo ya que se requiere conocer la antigüedad de los equipos del sistema.
16. Adicionalmente, en los costos fijos se consideran los de operación y mantenimiento y los compromisos adquiridos.

17. Otra fuente de egresos es la puesta en marcha de proyectos de expansión, en la cual se consideran los costos de ingeniería básica, de detalle, procura y construcción.
18. No se consideraron los costos de transmisión.
19. Se estima una tasa de interés atractiva constante durante el período de simulación.
20. Se trabaja con una tasa de inflación constante durante el período de simulación.
21. Cada período de simulación tendrá una duración de un trimestre.
22. El tiempo total del estudio será de 10 trimestres.
23. Se plantea realizar un experimento con 100 corridas.
24. No se tomaron en cuenta las pérdidas de energía técnicas y no técnicas.
25. La potencia viaja solamente en un sentido: de los generadores a los transformadores y de éstos a las cargas.

6.3. FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

6.3.1. Identificación de variables y parámetros

Tras haber estudiado el sistema de potencia y establecido los supuestos necesarios, se procedió a determinar las variables y parámetros más relevantes, con los que se formuló el modelo matemático. Las variables, subdivididas en deterministas y aleatorias, así como los parámetros, se encuentran ordenados en la siguiente lista.

Variables deterministas

n : contador del número de muestras.

t : contador del número de trimestres.

i : contador del número de nudos de consumo.

j : contador del número de arcos del grafo.

k : contador del número de nudos de generación.

\hat{t} : trimestre en que el proyecto de expansión comienza a desarrollarse.

\check{t} : trimestre en que el proyecto de expansión termina de desarrollarse y entra en funcionamiento.

d : la cantidad de nodos que consumen energía en el grafo que representa el sistema de potencia.

\hat{a} : la cantidad de arcos presentes en el grafo.

\hat{C}_{ij} : capacidad de transmisión nominal instalada en el sistema.

a_j : capacidad de generación instalada en el sistema.

\check{t}_{tipo} : tarifa a la cual se factura la energía consumida según el tipo de cliente.

g : la cantidad de nodos que entregan energía en el grafo que representa el sistema de potencia.

\hat{c} : el costo por unidad de energía que tiene la compañía al generar energía eléctrica.

\check{c} : costo fijo, el cual representa los costos de operación y mantenimiento del sistema, así como los costos por depreciación.

\hat{i} : costo de la inversión al expandir el sistema de potencia.

\check{i} : el interés del capital en el período de estudio.

$\check{\check{i}}$: la inflación del dinero en el período de estudio.

VARIABLES ALEATORIAS

\hat{d}_{tipo} : la energía consumida en el trimestre por el tipo de usuario.

C_{ij} : capacidad de transmisión de un arco en un trimestre específico.

b_j : consumo de energía en los nudos de demanda del sistema.

x_{ij} : energía que pasa por un arco que une los nudos i con j en un trimestre específico.

\acute{i} : entrada de capital al sistema producto de la facturación de energía consumida en un trimestre.

\check{c} : costos que representa la generación de energía en un trimestre.

e : egresos del sistema producto de los costos de generar energía, de operación, mantenimiento, depreciación e inversiones.

\hat{b} : balance trimestral, sustracción de los ingresos con los egresos de un trimestre.

\breve{b} : balance de todos los trimestres llevados a valor presente.

\acute{c}_{tipo} : energía que no pudo ser servida a un tipo de cliente, expresada en unidad de dinero, durante un trimestre.

\grave{c}_{tipo} : energía que no pudo ser servida a un tipo de cliente, expresada en unidad de dinero, llevada a valor presente.

PARÁMETROS

m : total de corridas de la simulación o total de muestras.

\breve{t} : número de trimestres que conforma el período de evaluación.

α_{tipo} : pendiente de la recta que define la tendencia del consumo de un tipo de consumidor.

β_{tipo} : término independiente de la recta que define la tendencia del consumo de un tipo de consumidor.

γ_{tipo} : constante que determina la magnitud de las aleatoriedades en el consumo de un tipo de consumidor.

min_{tipo} : mínimo de una distribución triangular.

mod_{tipo} : moda de una distribución triangular.

max_{tipo} : máximo de una distribución triangular.

6.3.2. Relaciones entre los componentes del sistema

Para este estudio se observan dos grandes bloques de interacciones: las eléctricas y las económicas, las cuales también están relacionadas.

Las variables eléctricas comienzan con la carga, las cuales, como se ha mencionado en capítulos anteriores, toma un valor de forma aleatoria. Otra variable aleatoria que debe fijarse antes de realizar cualquier cálculo son las capacidades de transmisión.

Se deben respetar las reglas de la física, es decir, una vez fijadas dichas capacidades, las energías que circulan por los arcos no pueden superar las capacidades determinadas para el lapso. Otra condición importante es que la energía generada no puede superar a la capacidad de generación instalada en el sistema.

El flujo de energía emula un modelo de transporte, el cual trata de satisfacer todas las demandas de forma óptima. De no ser así, se transmitirá al máximo de la capacidad de transmisión, y esa imposibilidad quedará registrada como consumo insatisfecho.

La ecuación a optimizar es la siguiente:

$$\text{minimizar } \sum_i \sum_j x_{ij},$$

donde i y j toman los valores respecto a los arcos del sistema.

De forma específica, las ecuaciones que modelan el flujo de energía en el sistema de potencia de estudio son las siguientes:

$$\begin{aligned} -x_{1-11} - x_{1-12} &\geq -a_1 \\ -x_{2-12} - x_{2-13} &\geq -a_2 \\ x_{1-11} - x_{11-21} - x_{11-22} - x_{11-23} - x_{11-26} &= 0 \\ x_{1-12} + x_{2-12} - x_{12-24} &= 0 \\ x_{2-13} - x_{13-25} - x_{13-26} &= 0 \\ x_{11-21} &= b_{21} \\ x_{11-22} &= b_{22} \\ x_{11-23} &= b_{23} \\ x_{11-26} + x_{13-26} &= b_{26} \\ x_{12-24} &= b_{24} \\ x_{13-25} &= b_{25} \end{aligned}$$

Respetando que las energías no superen las capacidades:

$$0 \leq x_{ij} \leq C_{ij},$$

donde i y j toman los valores respecto a los arcos del sistema.

Ahora, una vez determinada la energía óptima despachada del sistema, comienzan las interacciones de tipo económico. Los ingresos al sistema son directamente proporcionales a las tarifas y a la energía servida a los usuarios; mientras que los egresos lo son a los costos de generación y a la energía entregada al sistema así como los gastos adicionales. El balance depende directamente de los ingresos y egresos.

6.3.3. Datos para el experimento de simulación

Para este modelo, dada su naturaleza hipotética, no se contaban con datos físicos, por lo que los parámetros se eligieron de forma que se pudiera observar el comportamiento de los distintos escenarios.

Las capacidades asociadas con cada arco son las siguientes:

Tabla 6.2: Capacidades de transmisión usadas en el modelo de simulación

Arco	Capacidad
C_{1-11}	200
C_{1-12}	100
C_{2-12}	100
C_{2-13}	100
C_{11-21}	20
C_{11-22}	100
C_{11-23}	100
C_{11-26}	100
C_{12-24}	50
C_{13-25}	50
C_{13-26}	100

Cabe destacar que los valores de la tabla 6.2 son unidades de energía, cuyo valor numérico fue determinado no tomando como ejemplo una línea real, sino

una cifra que permitiera observar el comportamiento del modelo.

La generación de energía tiene las siguientes capacidades:

Tabla 6.3: Capacidades de generación usadas en el modelo de simulación

Nudo	Capacidad
a_1	200
a_2	200

6.3.4. Verificación y validación del modelo

El modelo fue sometido a diversas pruebas repetidas veces con distintos escenarios para observar si se comportaba de forma lógica. Estas pruebas se realizaron en el programa Microsoft Office Excel 2007, utilizando la herramienta Solver y los generadores de números aleatorios que dispone el mismo.

En dichos ensayos, la demanda se llevó a cero, y el sistema respondió no enviando energía por los arcos. Luego, al establecer la capacidad de generación a cero, el sistema no pudo suplir la energía demandada por los nudos de carga. Finalmente, se fijaron las capacidades de algunos arcos en cero, los cuales actuaron como cuello de botella en el sistema, no dejando circular la energía a pesar de que los nudos conectados a ellos demandaban energía.

Al finalizar dichas pruebas, se llegó a la conclusión de que el sistema respondía de la forma esperada, cumpliendo con las leyes de la física y condiciones del modelo.

6.4. ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

6.4.1. Formulación del algoritmo

Una vez verificado el modelo, se procedió a elaborar el algoritmo:

Algoritmo 6.1 *Este es el algoritmo principal, en el cual se muestra el pseudo-código que explica de forma esquemática las instrucciones para aplicar la metodología:*

Algoritmo 6.1: Metodología para expandir un sistema de potencia

Entrada: $m, \hat{t}, \hat{t}, \hat{t}, \hat{C}_{ij}, a_j, \alpha_{tipo}, \beta_{tipo}, \gamma_{tipo}, \hat{t}_{tipo}, \hat{c}, \hat{c}, \hat{i}, \hat{i}, \hat{i}$

Salida: \hat{b}, \hat{c}

inicio

para $n=1$ a m **haga**

para $t=1$ a \hat{t} **haga**

Ejecute *Procedimiento 6.1. "Asignación de la carga"*

si \hat{t} **entonces**

 | $e = e + \hat{i}$

fin de si

si $t=\hat{t}$ *culminación proyecto* **entonces**

 | modificación del sistema de potencia

fin de si

Ejecute *Procedimiento 6.2. "Determinación de las capacidades de transmisión"*

Ejecute *Procedimiento 6.3. "Repartición de energía mediante programación lineal"*

Ejecute *Procedimiento 6.4. "Contabilización de los ingresos"*

Ejecute *Procedimiento 6.5. "Contabilización de los egresos"*

Ejecute *Procedimiento 6.6. "Cálculo del balance a valor presente"*

Ejecute *Procedimiento 6.7. "Determinación del consumo insatisfecho"*

fin para

fin para

fin

Como se puede apreciar, hay dos ciclos iterativos principales, el primero determina la cantidad de muestras que se desean y el segundo simula el pasar del tiempo durante el período de estudio. Los condicionales determinan el momento para iniciar el proyecto de expansión así como la puesta en servicio de las modificaciones hechas al sistema de potencia.

Está compuesto de procedimientos o subrutinas, las cuales son un grupo de instrucciones encargadas de realizar un proceso dentro del algoritmo. Cada procedimiento es explicado a continuación:

Procedimiento 6.1 (Asignación de la carga) *Se le asigna a cada nodo de demanda la carga para el período de estudio según el tipo de consumidor. La asignación se hace de forma aleatoria utilizando una distribución triangular, la cual se adiciona a una función lineal, determinando el crecimiento de los clientes.*

Procedimiento 6.1: Asignación de la carga

Entrada: $t, d, \alpha_{res}, \beta_{res}, \gamma_{res}, \alpha_{com}, \beta_{com}, \gamma_{com}, \alpha_{ind}, \beta_{ind}, \gamma_{ind}, min_{res}, mod_{res}, max_{res}, min_{com}, mod_{com}, max_{com}, min_{ind}, mod_{ind}, max_{ind}$

Salida: b_j

inicio

para $i=1$ a d número de nudos de demanda **haga**

caso 1: cliente residencial

Ejecute Función 6.1. “Generador de distribución triangular a partir de una uniforme”

$\hat{d}_{res} =$

$\alpha_{res}t + \beta_{res} + \gamma_{res}T(min_{res}, mod_{res}, max_{res})$

caso 2: cliente comercial

Ejecute Función 6.1. “Generador de distribución triangular a partir de una uniforme”

$\hat{d}_{com} = \alpha_{com}t + \beta_{com} +$

$\gamma_{com}T(min_{com}, mod_{com}, max_{com})$

caso 3: cliente industrial

Ejecute Función 6.1. “Generador de distribución triangular a partir de una uniforme”

$\hat{d}_{ind} =$

$\alpha_{ind}t + \beta_{ind} + \gamma_{ind}T(min_{ind}, mod_{ind}, max_{ind})$

fin seleccione

fin para

fin

Procedimiento 6.2 (Determinación de las capacidades de transmisión) *Tomando los valores nominales de las capacidades de transmisión, son disminuidos de forma aleatoria usando una distribución triangular.*

Procedimiento 6.2: Determinación de las capacidades de transmisión

Entrada: \hat{C}_{ij} , min_{falla} , mod_{falla} , max_{falla}

Salida: C_{ij}

inicio

para $j=1$ a \hat{n} **haga**

Ejecute Función 6.1. "Generador de distribución triangular a partir de una uniforme"

$C_{ij} = \hat{C}_{ij}T(min_{falla}, mod_{falla}, max_{falla})$

fin para

fin

Procedimiento 6.3 (Repartición de energía mediante programación lineal)

Utilizando un modelo de transporte, se reparte de forma óptima la energía requerida por el sistema, respetando las condiciones físicas del problema.

Procedimiento 6.3: Repartición de energía mediante programación lineal

Entrada: C_{ij} , b_j , a_j

Salida: x_{ij}

inicio

Calcule: $minimizar \{\sum \sum x_{ij}\}$

sujeto a

$$\sum x_{ij} - \sum x_{jk} \geq -a_j$$

$$\sum x_{ij} - \sum x_{jk} = 0$$

$$\sum x_{ij} - \sum x_{jk} = b_j$$

$$0 \leq x_{ij} \leq C_{ij}$$

fin

Procedimiento 6.4 (Contabilización de los ingresos) *Utilizando las tarifas ingresadas por el usuario y las energías que consumen los usuarios determinadas por el procedimiento anterior, se contabilizan los ingresos del período.*

Procedimiento 6.4: Contabilización de ingresos

Entrada: x_{ij} , \check{t}_{res} , \check{t}_{com} , \check{t}_{ind}

Salida: \acute{i}

inicio

para $i=1$ a d haga

caso 1: cliente residencial

| $\acute{i}_{res} = \check{t}_{res}x_{ij}$

caso 2: cliente comercial

| $\acute{i}_{com} = \check{t}_{com}x_{ij}$

caso 3: cliente industrial

| $\acute{i}_{ind} = \check{t}_{ind}x_{ij}$

fin seleccione

fin para

$\acute{i} = \acute{i}_{res} + \acute{i}_{com} + \acute{i}_{ind}$

fin

Procedimiento 6.5 (Contabilización de los egresos) *Utilizando los costos unitarios de energía, costos de operación mantenimiento y costo de las inversiones ingresadas por el usuario y las energías que consumen los usuarios determinadas por el procedimiento 6.3, se contabilizan los egresos del período.*

Procedimiento 6.5: Contabilización de los egresos

Entrada: x_{ij} , \hat{c} , \check{c} , \hat{i} , g

Salida: e

inicio

para $k=1$ a g haga

| $\check{c} = \check{c} + x_{ij}\hat{c}$

fin para

$e = \check{c} + \check{c} + \hat{i}$

fin

Procedimiento 6.6 (Cálculo del balance a valor presente) *Una vez contando con los ingresos y egresos, se procede a determinar el balance.*

Procedimiento 6.6: Cálculo del balance a valor presente

Entrada: \acute{i} , e

Salida: \acute{b}

inicio

| $\acute{b} = \acute{i} - e$

Ejecute Función 6.2. "Cálculo de valor presente de una cantidad"

fin

Procedimiento 6.7 (Determinación del consumo insatisfecho) *Finalmente, para obtener el último indicador, se procede a calcular los consumos insatisfechos de cada tipo de cliente utilizando las energías servidas y las demandadas, así como la tarifa.*

Procedimiento 6.7: Determinación del consumo insatisfecho

Entrada: x_{ij} , b_j , t_{res} , t_{com} , t_{ind}

Salida: \dot{c}_{tipo}

inicio

para $i=1$ a d **haga**

caso 1: cliente residencial

$\dot{c}_{res} = (x_{ij} - b_j)t_{res}$

Ejecute Función 6.2. “Cálculo de valor presente de una cantidad”

caso 2: cliente comercial

$\dot{c}_{com} = (x_{ij} - b_j)t_{com}$

Ejecute Función 6.2. “Cálculo de valor presente de una cantidad”

caso 3: cliente industrial

$\dot{c}_{ind} = (x_{ij} - b_j)t_{ind}$

Ejecute Función 6.2. “Cálculo de valor presente de una cantidad”

fin seleccione

fin para

fin

En las subrutinas se ejecutaron funciones, las cuales están definidas a continuación:

Función 6.1 (Generador de distribución triangular a partir de una uniforme)

Esta función se implementó en el caso de que el software de simulación solo fuera capaz de generar números aleatorios entre cero y uno.

Función 6.1: Generador de distribución triangular a partir de una uniforme

Entrada: min , mod , max

Salida: $T(min, mod, max)$

inicio

Asigne a: $u \leftarrow U(0, 1)$

$T(min, mod, max) =$

$max + [min + u(mod - min) - max]\sqrt{u}$

fin

Función 6.2 (Cálculo de valor presente de una cantidad) *La finalidad de esta función, como su nombre lo indica, es la de aplicar los conceptos de ingeniería económica definidos en el apartado 3.3 para llevar cantidades de dinero al mismo momento del tiempo y poder hacer una comparación válida.*

Función 6.2: Cálculo de valor presente de una cantidad	
Entrada:	$C_n, n, \check{i}, \check{i}$
Salida:	C_0
inicio	
	Calcule: $C_0 = C_n \left(\frac{1+\check{i}}{1+i} \right)^n$
fin	

6.4.2. Código del programa

Las instrucciones planteadas en el algoritmo 6.1, así como sus procedimientos y funciones, fueron escritas en el lenguaje de programación Visual Basic, con el cual se elaboró una herramienta para poder experimentar con el modelo. La elección del Visual Basic sobre otros lenguajes se debió a su fuerte enlace con el Excel, ya que a través del Visual Basic se podía automatizar la herramienta Solver e implementar los ciclos iterativos requeridos para la experimentación. Otra bondad es la capacidad de organizar los datos en las hojas de cálculo de Excel, así como la capacidad del mismo de realizar los histogramas necesarios para el análisis de resultados.

CAPÍTULO VII

PRUEBAS EXPERIMENTALES

7.1. ESQUEMA DE EXPERIMENTACIÓN

El sistema fue sometido a diversos escenarios para apreciar su comportamiento. Se aplicaron dos esquemas tarifarios, en los cuales se mantienen constantes el costo de la unidad de energía para los usuarios comerciales e industriales mientras que los residenciales muestran una tarifa más baja. Los valores numéricos se encuentran reflejados en la tabla 7.1.

Tabla 7.1: Tarifas usadas en el modelo de simulación

	Tarifa	
	Alta	Baja
Residencial	15	10
Comercial	20	20
Industrial	100	100

Ahora, para modelar los cambios en los consumos se hará uso de un modelo lineal, al cual se le sumará una función de densidad de probabilidades triangular.

$$\hat{d}_{tipo} = \alpha_{tipo}t + \beta_{tipo} + \gamma_{tipo}T(\min_{tipo}, mod_{tipo}, max_{tipo}) \quad (7.1)$$

Como se dijo en el capítulo VI, los consumos fueron separados en tres situaciones distintas. Para modelar estos comportamientos se utilizaron diferentes valores de α y β , los cuales están registrados en la tabla 7.2:

Como se puede observar, las cargas residenciales crecen para todos los es-

Tabla 7.2: Valores de las constantes α_{tipo} y β_{tipo} para los diferentes escenarios

Escenario	α_{res}	β_{res}	α_{com}	β_{com}	α_{ind}	β_{ind}
Alza	1	50	5	25	7	10
Constante	1	50	0	25	0	10
Baja	1	50	-2	30	-0.5	15

cenarios, mientras que las comerciales e industriales presentan cambios en su comportamiento. Las aleatoriedades están acotadas entre -10 y $+10$.

Tomando en cuenta todas las permutaciones de las tarifas con el comportamiento de la demanda, se obtienen seis escenarios a experimentar.

Finalmente, se toma un escenario referencial en el cual no se realiza la expansión del sistema para compararlo con los seis anteriores. Para esta referencia, se consideró la tarifa baja y la tendencia constante de consumo.

Una vez definidos todos los casos, se inició un proceso de simulación estática compuesto por 100 réplicas, tras el cual se buscaba determinar el valor de la probabilidad de obtener un balance en valor presente menor o igual a cero, siendo este valor la probabilidad de ruina del proceso de inversión, es decir:

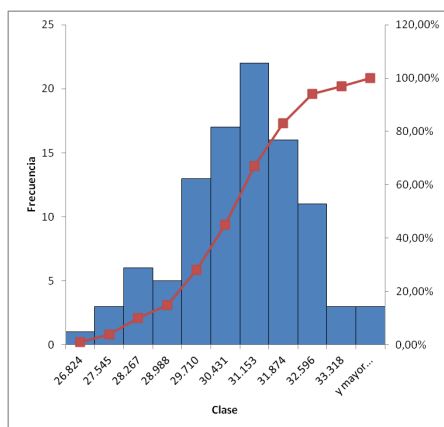
$$P(\text{ruina}) = P(\check{b} \leq 0) \tag{7.2}$$

Adicionalmente, el otro indicador a medir es el del consumo insatisfecho, con el cual se plantea ver cuanta energía no se pudo vender a un determinado tipo de cliente, todo esto con el fin de ver si la expansión es suficiente para resolver este problema, o si se puede tomar el riesgo de quiebra si ayuda a disminuirlo significativamente.

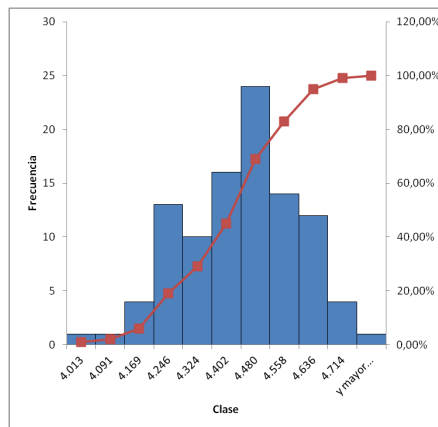
El número de muestras se eligió así por ser uno suficientemente grande para mitigar el efecto de los rangos de clases de los histogramas y obtener una medición significativa de la población, pero lo suficientemente pequeño para que cada simulación se realizara en un tiempo razonable.

7.1.1. Resultados de la experimentación

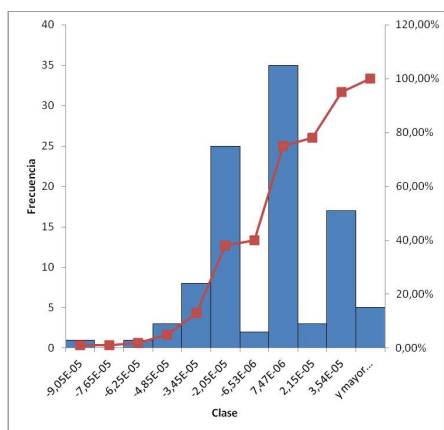
A continuación se presentan los histogramas y funciones acumulativas de los distintos escenarios planteados para el balance y el consumo insatisfecho. Las barras azules son proporcionales a la cantidad de veces que aparece una muestra, en el eje vertical izquierdo se representan las frecuencias, y en el eje horizontal las magnitudes de las variables, señalando las marcas de clase, es decir, la mitad del intervalo en el que están agrupados los datos. La línea roja representa la función acumulativa de probabilidades, estando representado en el eje vertical derecho la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor menor o igual a la magnitud expresada en el eje horizontal.



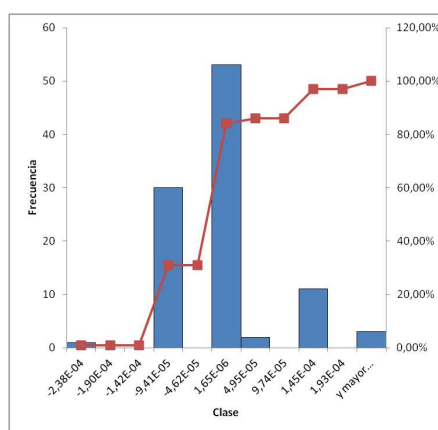
(a) Balance



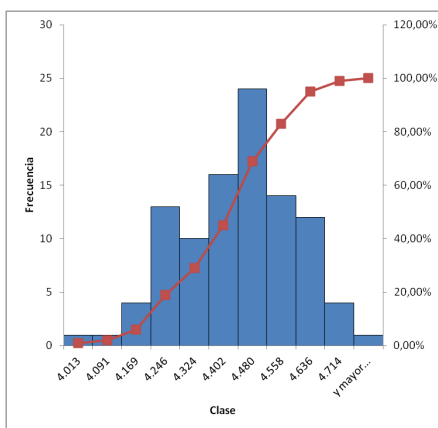
(b) Consumo insatisfecho residencial



(c) Consumo insatisfecho comercial

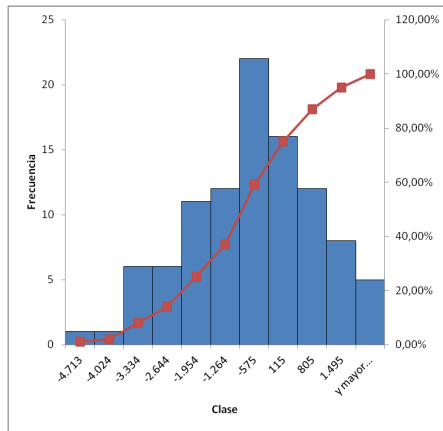


(d) Consumo insatisfecho industrial

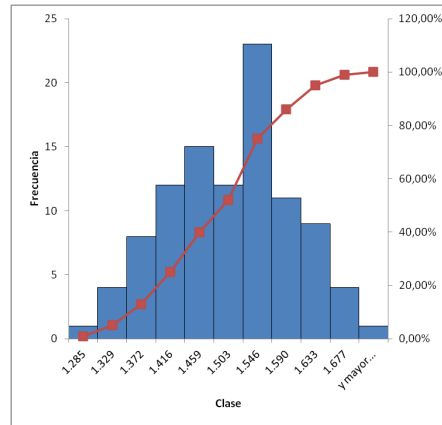


(e) Energía total no vendida

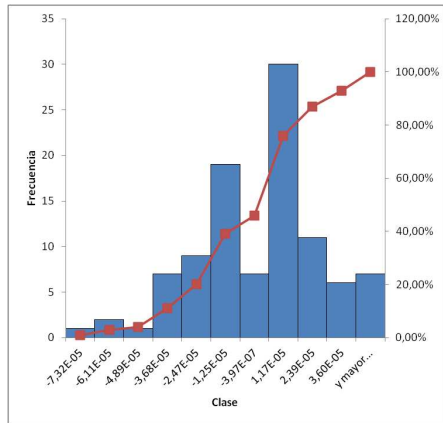
Figura 7.1: Tarifa baja crecimiento constante sin expandir el sistema



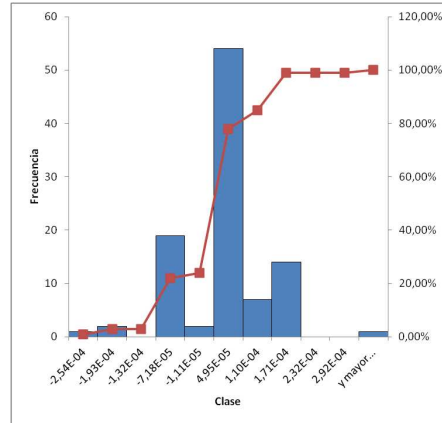
(a) Balance



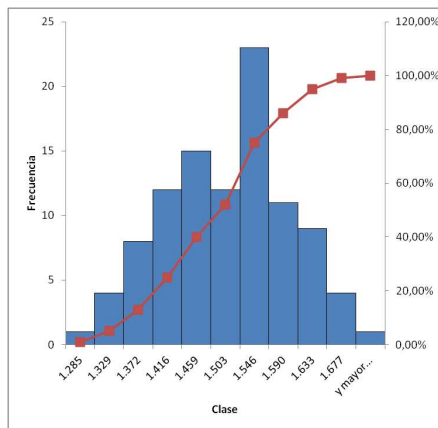
(b) Consumo insatisfecho residencial



(c) Consumo insatisfecho comercial

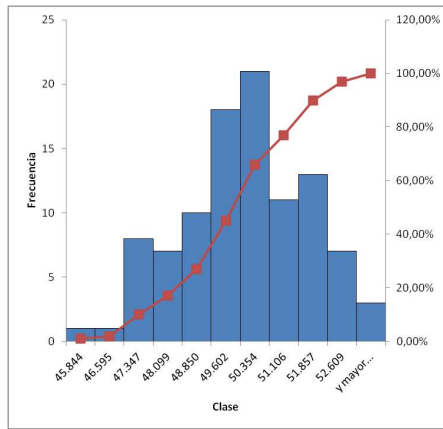


(d) Consumo insatisfecho industrial

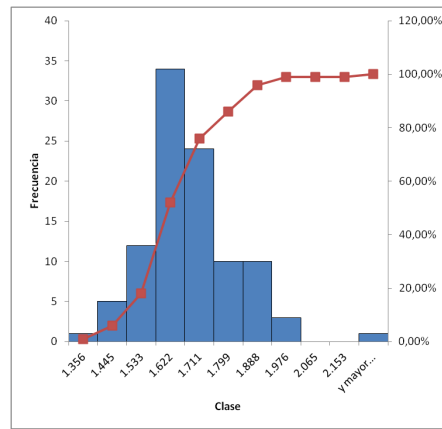


(e) Energía total no vendida

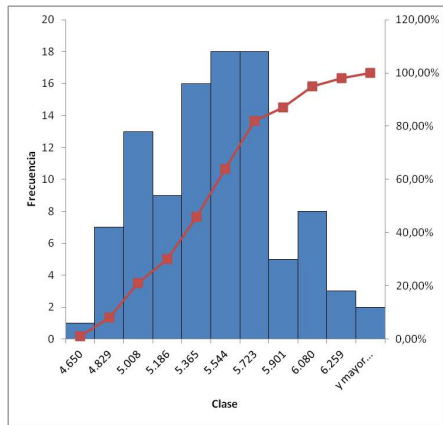
Figura 7.2: Tarifa baja crecimiento constante



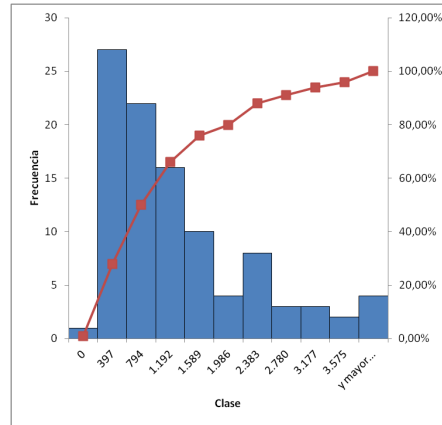
(a) Balance



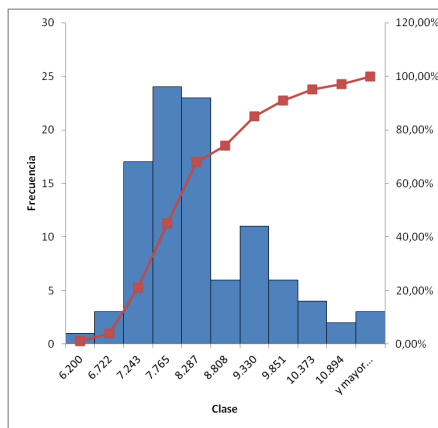
(b) Consumo insatisfecho residencial



(c) Consumo insatisfecho comercial

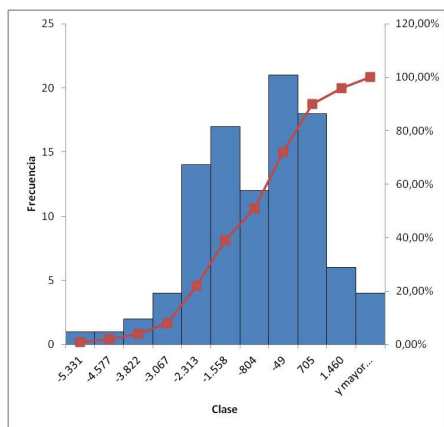


(d) Consumo insatisfecho industrial

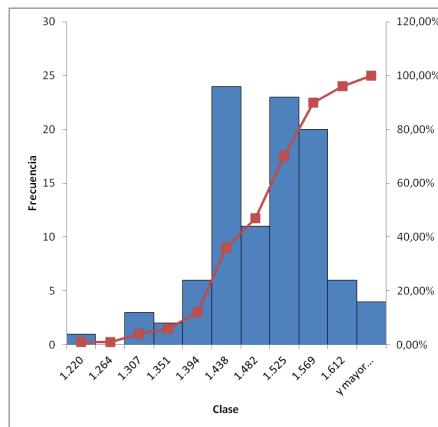


(e) Energía total no vendida

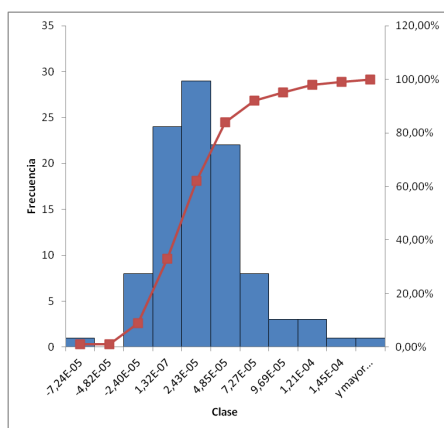
Figura 7.3: Tarifa baja crecimiento en alza



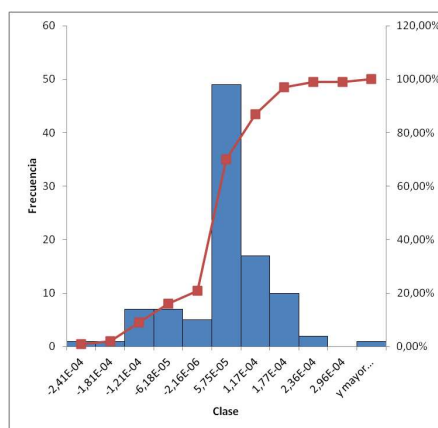
(a) Balance



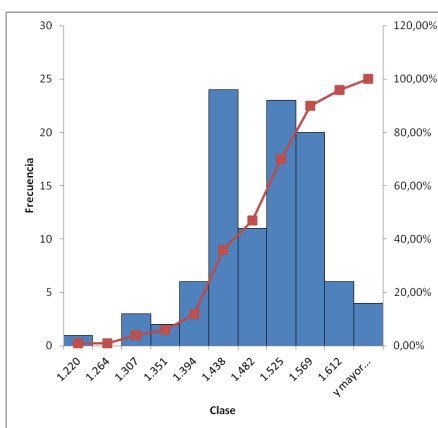
(b) Consumo insatisfecho residencial



(c) Consumo insatisfecho comercial

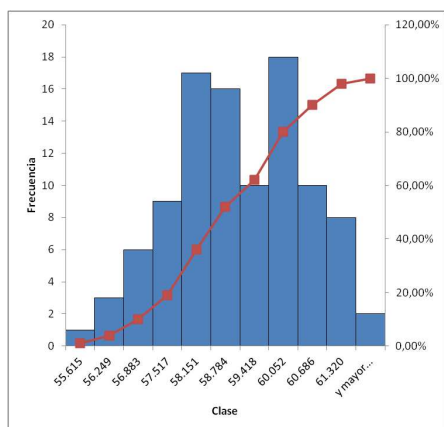


(d) Consumo insatisfecho industrial

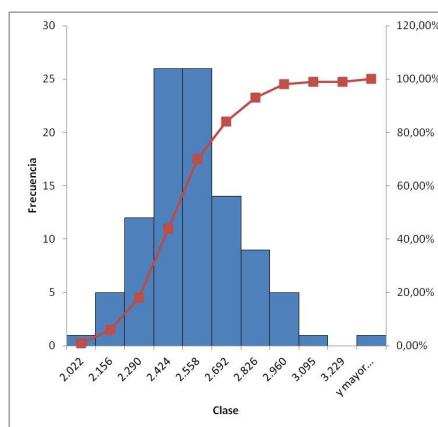


(e) Energía total no vendida

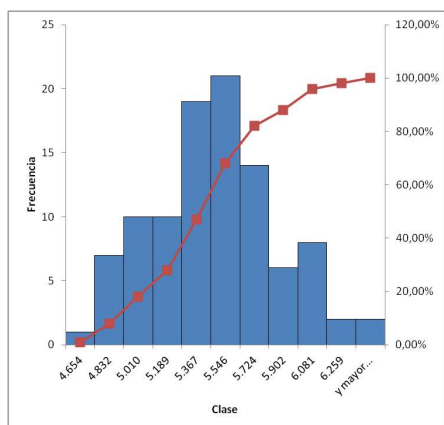
Figura 7.4: Tarifa baja crecimiento en baja



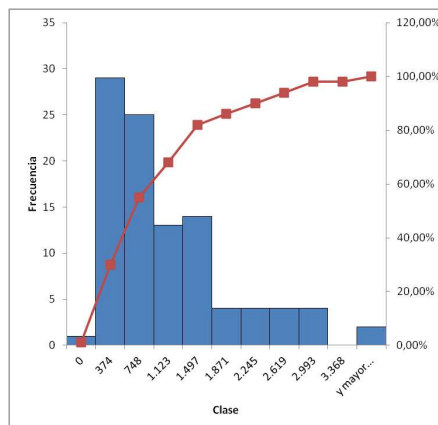
(a) Balance



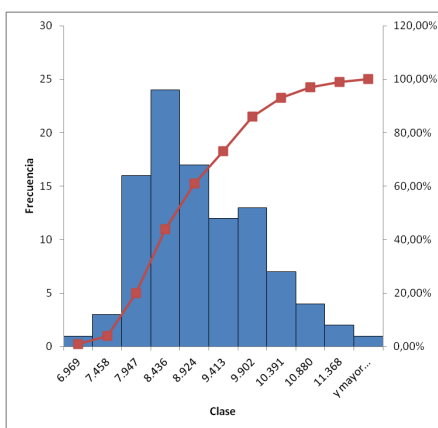
(b) Consumo insatisfecho residencial



(c) Consumo insatisfecho comercial

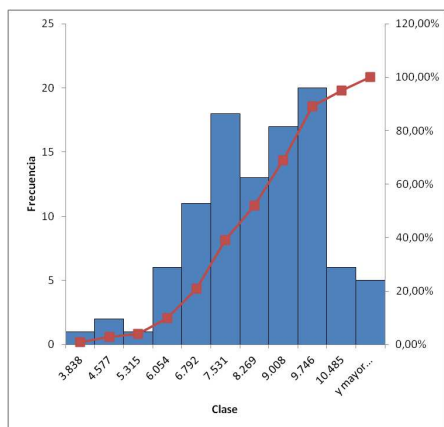


(d) Consumo insatisfecho industrial

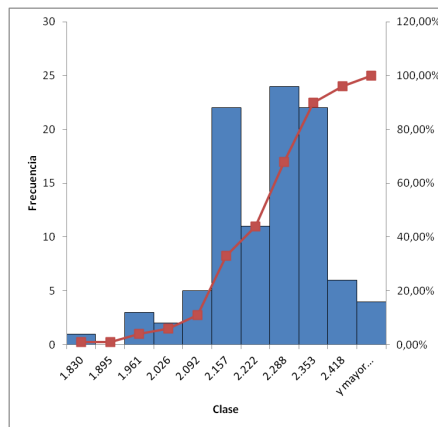


(e) Energía total no vendida

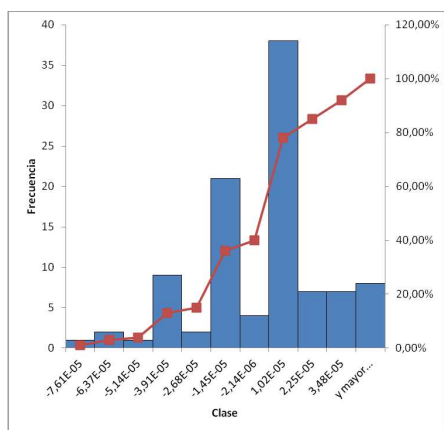
Figura 7.5: Tarifa alta crecimiento en alza



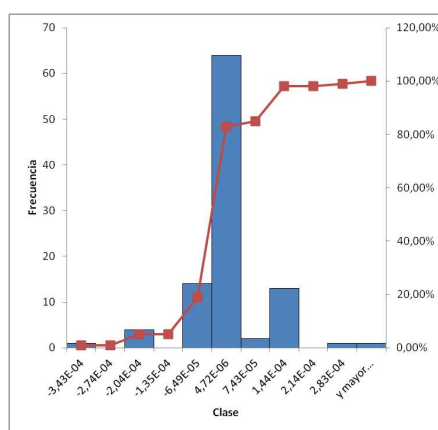
(a) Balance



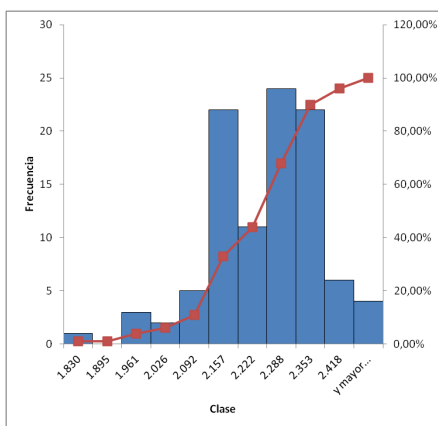
(b) Consumo insatisfecho residencial



(c) Consumo insatisfecho comercial

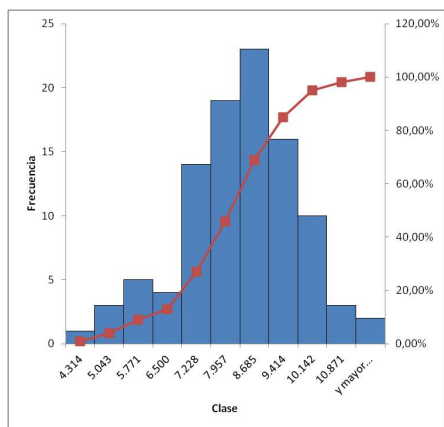


(d) Consumo insatisfecho industrial

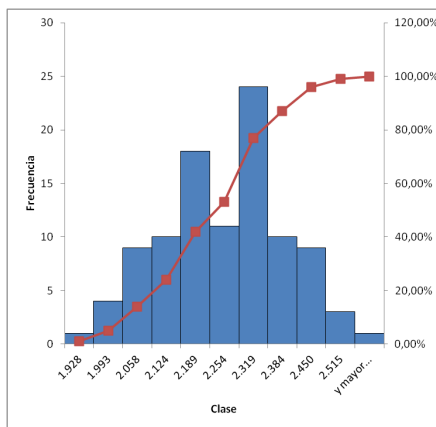


(e) Energía total no vendida

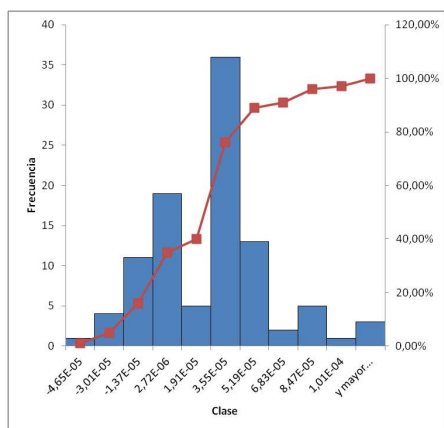
Figura 7.6: Tarifa alta crecimiento constante



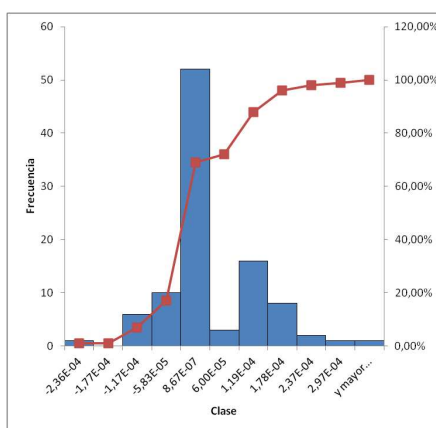
(a) Balance



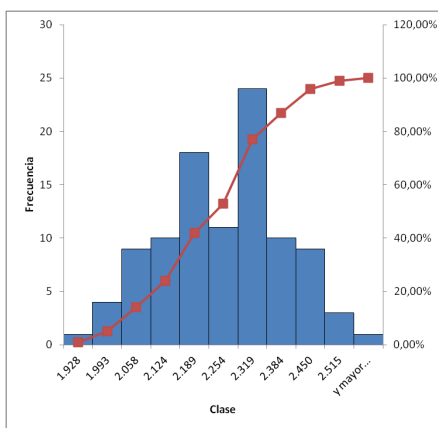
(b) Consumo insatisfecho residencial



(c) Consumo insatisfecho comercial



(d) Consumo insatisfecho industrial



(e) Energía total no vendida

Figura 7.7: Tarifa alta crecimiento en baja

Como se puede apreciar en la los casos 7.2 y 7.4 existe una posibilidad de ruina del sistema. Aplicando los conceptos de estadística definidos en la sección 3.5 referentes a la estimación de una proporción, se calcula el intervalo de confianza de la cantidad de veces que el balance dio negativo para estimar así la probabilidad de ruina.

Aplicando la ecuación (3.12) con un intervalo de confianza del 95 %, se contaron la cantidad de veces que el balance dio negativo para cada caso y se estimó que para el caso 7.2 se obtuvo un intervalo que iba entre un 62,10 % y un 79,89 % mientras que para el caso 7.4 el intervalo iba de 64,30 % hasta 81,70 %.

CAPÍTULO VIII

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tomando como caso base el escenario 7.1, se observa como la probabilidad de ruina es nula, debido a que el balance da siempre positivo (ver el gráfico 7.1a) a diferencia del escenario 7.2 donde la probabilidad de ruina es distinta de cero, algo de fácil comprobación viendo el gráfico 7.2a, el cual presenta valores de balance negativos. Para ser más exacto, la probabilidad de quiebra está en un intervalo que va entre un 62,10 % y un 79,89 %.

En este momento, el analista puede caer en la conclusión errónea de que la expansión es innecesaria y que no debe hacerse, pero antes de llegar a esa afirmación, es necesario revisar los indicadores de consumo insatisfecho, en los cuales se puede apreciar que de no realizarse la expansión el consumo insatisfecho a la población residencial es mayor (ver gráfico 7.1b) que en el caso de realizarse (ver gráfico 7.2b).

Esto es un resultado lógico, por el motivo de que al aumentar los egresos producto de los costos de expansión, el sistema presenta más pérdidas de capital y hace que el riesgo aumente, pero al no realizarse la expansión, el sistema se ve limitado a servir la energía requerida por los consumidores a causa de que las capacidades actúan como cuello de botella. De esta forma, se puede ver como la metodología da al analista las herramientas para tomar una decisión, informándole de las posibles consecuencias de la misma.

Ahora, observando las posibles variaciones en la demanda, se ve como un aumento en la misma reduce dramáticamente el riesgo de inversión a cero (ver gráfico 7.3a) pero se evidencia como el consumo insatisfecho crece en otras cate-

gorías distintas a la residencial (ver gráficos 7.3c y 7.3d) por lo que se afirma que en caso de una tendencia de alza en el consumo, las expansiones son insuficientes y deben plantearse otras nuevas.

En caso de una tendencia en baja; específicamente el caso 7.4, el riesgo de quiebra aumenta.

Para los escenarios con una tarifa alta, se observa que el riesgo de quiebra es nulo para los tres casos, por lo que puede hablarse que un ajuste a la tarifa varía el riesgo de la expansión.

CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES

La metodología formulada en el presente trabajo resultó ser útil para analizar el riesgo de una expansión en un sistema eléctrico de potencia, así como su capacidad de prestarle un servicio a los clientes.

Con esta metodología, se puede determinar si una expansión propuesta puede ser rentable, así como necesaria o suficiente, todo esto estudiando los indicadores de balance y de consumo insatisfecho. La propuesta permite medir el comportamiento a diferentes tipos de tendencias, así como a distintos esquemas tarifarios, por lo que un uso adicional de este método puede ser el de ajustar las tarifas de una compañía.

Otra virtud de esta metodología es que permite determinar si el tiempo en el que se realiza la inversión es suficiente para poder prestar el servicio antes de que el crecimiento de la demanda haga inadecuado el sistema actual.

Como la estructura metodológica encuentra su base en las técnicas de simulación por Monte Carlo, es preciso contar con un modelo matemático y computacional, verificados y válidos, del sistema a expandir. Esto demuestra la importancia del algoritmo desarrollado en el trabajo, debido a que el mismo pretende ser una guía para orientar en la formulación de un modelo matemático de un sistema sobre el cual se le desee aplicar un determinado plan de expansión, así como ayudar con la formulación de un programa computacional para realizar simulaciones.

CAPÍTULO X

RECOMENDACIONES

Con miras a mejorar la calidad de la metodología desarrollada en el trabajo, se presentan a continuación una serie de recomendaciones para reforzar y ampliar las ideas generadas, así como proponer nuevos proyectos en el área:

- implementar la metodología sobre un sistema de potencia real, donde existan registros históricos de los aspectos técnicos y económicos para poder validar de forma completa el modelo desarrollado;
- tomar en cuenta las antigüedades de los equipos del sistema para evaluar mejor los costos por depreciación;
- modelar los costos de transmisión, a objeto de tomar en cuenta la distancia entre las fuentes de energía y los consumidores finales;
- jerarquizar la suspensión de energía en el modelo de transporte, para no dejar sin servicio a determinado nodo que represente una carga que no debe ser desconectada;
- tomar en cuenta las pérdidas (tanto técnicas como no técnicas) del sistema de potencia;
- proponer sistemas mallados.

Apéndice I

CÓDIGO IMPLEMENTADO EN VISUAL BASIC

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		Generación		Demanda				ecuaciones	
3		e1	201	e21	50,385			:e1,11-e1,12>-e1	26,7167732
4		e2	202	e22	56,437			:e2,12-e2,13>-e2	154,689511
5				e23	60,347			:e1,11-e11,21-e11,22-e11,23-e11,26=0	0
6				e24	16,368			:e1,12+e2,12-e12,24=0	0
7				e25	32,022			:e2,13-e13,25-e13,26=0	-3,109E-15
8				e26	6,0353			:e11,21=e21	0
9								:e11,22=e22	0
10								:e11,23=e23	0
11		lim min	< eij	<	Cij	capacidad nominal	capacidad del período	:e11,26+e13,26=e26	0
12		0	e1,11	172,095347	C1,11	300	262,2890692	:e12,24=e24	0
13		0	e1,12	2,18787942	C1,12	100	87,71693076	:e13,25=e25	0
14		0	e2,12	14,1803223	C2,12	100	90,37814369		
15		0	e2,13	33,130167	C2,13	100	90,82508506	Suma de todas eij (target solver)	443,187432
16		0	e11,21	50,3848878	C11,21	90	80,35128851		
17		0	e11,22	56,436785	C11,22	100	86,52449002		
18		0	e11,23	60,3468778	C11,23	100	83,96325228		
19		0	e11,26	4,92679674	C11,26	100	92,42482176		
20		0	e12,24	16,3682017	C12,24	50	48,61976545		
21		0	e13,25	32,0216468	C13,25	50	40,52607865		
22		0	e13,26	1,10852023	C13,26	100	90,74958427		

Figura I.1: Hoja de Excel con los datos de la simulación

```
Option Explicit
Sub metodologiatesis()
' Todo lo que esté detrás del símbolo " ' " será un comentario
'***** DECLARACIÓN DE VARIABLES
```

```
Dim n As Integer
Dim t As Double
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim k As Integer
Dim muestra As Integer
Dim testudio As Double
Dim nodosdemanda As Integer
Dim alfaresidencial As Double
Dim alfacomercial As Double
Dim alfaindustrial As Double
Dim betaresidencial As Double
Dim betacomercial As Double
Dim betaindustrial As Double
Dim tinicioproyecto As Double
```

```
Dim tfinproyecto As Double
Dim capacidadnomimnal As Double
Dim arcos As Integer
Dim tarifaresidencial As Double
Dim tarifacomercial As Double
Dim tarifaindustrial As Double
Dim ingreso As Double
Dim arcosedemanda As Integer
Dim egreso As Double
Dim costoenergia As Double
Dim preciounitarioenergia As Double
Dim nodosgeneracion As Integer
Dim costofijo As Double
Dim interes As Double
Dim inflacion As Double
Dim balance As Double
Dim balancevp As Double
Dim consinres As Double
Dim consincom As Double
Dim consinind As Double
Dim consumoindustrial As Double
Dim auxiliar As Double
Dim auxiliarpvp As Double
Dim costoproyecto As Double
```

```
'*****INICIALIZACIÓN DE VARIABLES
```

```
muestra = 100 ' el número de muestras
```

```
testudio = 10 ' la duración del estudio
```

```
nodosedemanda = 6 ' cantidad de nodos de consumo de energía
```

```
'*****crecimiento del consumo
```

```
'Residencial
```

```
alfaresidencial = 1
```

```
betaresidencial = 50
```

```
'Comercial
```

```
alfacomercial = 0
```

```
betacomercial = 25
```

```
'Industrial
```

```
alfaindustrial = 0
```

```

betaindustrial = 10
'****

'tiempos de inicio y final del proyecto

tinicioproyecto = 3
tfinproyecto = 5

' cantidad de lineas de transmisión
arcos = 11

'tarifas
tarifaresidencial = 10
tarifacomercial = 20
tarifaindustrial = 100

'cantidad de lineas que alimentan la carga,
'se usa para cobrar la energia entregada
arcosdemanda = 7

preciounitarioenergia = 3
nodosgeneracion = 4 ' arcos de generacion
costofijo = 100

interes = 0.12
inflacion = 0.15

'***** COMIENZO DEL ALGORITMO

For n = 1 To muestra 'ciclo exterior que marca el número de muestras

'***** INICIAR VARIABLES DEL PERÍODO DE ESTUDIO

ingreso = 0
costoenergia = 0
egreso = 0
balancevp = 0
consinres = 0
consincom = 0
consinind = 0

'*****

```

```

For t = 1 To testudio 'ciclo interno que determina el progreso
del proyecto

'***** Rutina que genera las demandas

For i = 1 To nodosdemanda

If i <= 3 Then 'residencial

Cells(i + 2, 5).Value = demanda(t, alfaresidencial, betaresidencial,
-10, 0, 10)

ElseIf i <= 5 Then 'comercial

Cells(i + 2, 5).Value = demanda(t, alfacomercial, betacomercial,
-10, 0, 10)

Else 'industrial

Cells(i + 2, 5).Value = demanda(t, alfaindustrial, betaindustrial,
-10, 0, 10)

End If

Next i

'***** Rutina que chequea que estoy en el período que
entran los proyectos

If t >= tinicioproyecto And t <= tfinproyecto Then ' va a cobrar
hasta el tiempo final

'cobrar los costos del proyecto

costoproyecto = 10000

Else

costoproyecto = 0

End If

```



```

If t >= tfinproyecto Then

'modifica la capacidad: las celdas que van desde las filas 12 a 22
y en la columna 6

Cells(12, 6) = 300
Cells(16, 6) = 90 'modifica la linea que alimenta a carga 21

Else 'regresa al valor original las celdas

Cells(12, 6) = 200
Cells(16, 6) = 20 'la linea original que alimenta a carga 21

End If

'*****Rutina que determina las capacidades

For j = 1 To arcos

capacidadnomimnal = Cells(j + 11, 6)

Cells(j + 11, 7).Value = triangular(0.8 * capacidadnomimnal,
0.9 * capacidadnomimnal, capacidadnomimnal)

Next j

'*****Rutina que resuelve el programa de programación lineal

SolverReset
SolverAgregar referenciaCelda:="$D$12:$D$23", relación:=3, Formula:= _
"$B$12:$B$23"
SolverAgregar referenciaCelda:="$D$12:$D$23", relación:=1, Formula:= _
"$G$12:$G$23"
SolverAgregar referenciaCelda:="$I$3:$I$4", relación:=3,
Formula:="$J$3:$J$4"
SolverAgregar referenciaCelda:="$I$5:$I$13", relación:=2,
Formula:="$J$5:$J$13"
SolverAceptar definirCelda:="$I$15", valorMáxMín:=2, valorDe:="0", _
celdasCambiantes:="$D$12:$D$23"
SolverResolver (True)

'*****Rutina que calcula los ingresos

```

```

ingreso = 0

For i = 1 To arcosdemanda

If i <= 3 Then 'residencial

ingreso = ingreso + Cells(i + 15, 4) * tarifaresidencial

ElseIf i = 4 Then 'la flecha 11 a 26 industrial

ingreso = ingreso + Cells(i + 15, 4) * tarifaindustrial

ElseIf (i <= 6 And i > 4) Then 'comercial

ingreso = ingreso + Cells(i + 15, 4) * tarifacomercial

Else 'industrial

ingreso = ingreso + Cells(i + 15, 4) * tarifaindustrial

End If

Next i

'*****Rutina que calcula los egresos

egreso = 0
costoenergia = 0

For k = 1 To nodosgeneracion

'contar lo que costó la energía

costoenergia = costoenergia + preciounitarioenergia * Cells(k + 11, 4)

Next k

egreso = costofijo + costoenergia + costoproyecto

'*****Rutina que calcular el balance

balance = ingreso - egreso

```

```

balancevp = valorpresente(balance, t, interes, inflacion) + balancevp

'*****Rutina para calcular el consumo insatisfecho

consumoindustrial = Cells(19, 4) + Cells(22, 4)

For i = 1 To nodosdemanda

If i <= 3 Then 'residencial

auxiliar = (Cells(i + 2, 5) - Cells(i + 15, 4)) * tarifaresidencial
auxiliarvp = valorpresente(auxiliar, t, interes, inflacion)
consinres = consinres + auxiliarvp

ElseIf i <= 5 Then 'comercial

auxiliar = (Cells(i + 2, 5) - Cells(i + 15 + 1, 4)) * tarifacomercial
' el +1 es para que salte e11,26
auxiliarvp = valorpresente(auxiliar, t, interes, inflacion)
consincom = consincom + auxiliarvp

Else 'industrial

auxiliar = (Cells(i + 2, 5) - consumoindustrial) * tarifaindustrial
auxiliarvp = valorpresente(auxiliar, t, interes, inflacion)
consinind = consinind + auxiliarvp

End If

Next i

'*****Rutina para escribir los resultados en la hoja de excel

Cells(n + 3, 12) = n
Cells(n + 3, 13) = balancevp
Cells(n + 3, 14) = consinres
Cells(n + 3, 15) = consincom
Cells(n + 3, 16) = consinind

Next t

```

```
Next n
```

```
End Sub
```

```
Public Function triangular(min As Double, med As Double,  
max As Double) As Double
```

```
triangular = max + (min + Rnd() * (med - min) - max) * Sqr(Rnd())  
genera los numeros aleatorios triangulares
```

```
End Function
```

```
Public Function demanda(t As Double, alfa As Double,  
beta As Double, min As Double, med As Double,  
max As Double) As Double
```

```
demanda = alfa * t + beta + triangular(min, med, max)
```

```
End Function
```

```
Public Function valorpresente(valor As Double, n As Double,  
interes As Double, inflacion As Double) As Double
```

```
valorpresente = valor * ((1 + inflacion) / (1 + interes)) ^ n
```

```
End Function
```

REFERENCIAS

- Díaz, R., Brea, E., Marín, S., y Uzcátegui, R. (1996). Análisis y modelaje de series de tiempo en modelos de simulación. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 11(1), 19324.
- Fortoul, C. (2011, noviembre). *Entrevista personal*.
- Giudici, R., y Bris, Á. (1997). *Introducción a la teoría de grafos*. Caracas, Venezuela: Equinoccio.
- Goberna, M., Jornet, V., y Puente, R. (2004). *Optimización lineal. teoría, métodos y modelos* (1.^a ed.). Madrid: Mc Graw Hill.
- Gómez, A. (1995). *Elaboración de una metodología para el análisis de riesgo de megaproyectos industriales*. Caracas, Venezuela.
- Hammersley, J. M., y Handscomb, D. C. (1975). *Monte carlo methods* (M. S. Bartlett, Ed.). Halsted Press.
- Hartley, R. (1987). *Theory of recursive functions and effective computability*. The MIT Press.
- Kasim, S., Othman, M., Ghani, N., y Musirin, I. (2010, june). Application of bootstrap technique in power system risk assessment. En *Power engineering and optimization conference (peoco), 2010 4th international* (p. 82 -88). doi: 10.1109/PEOCO.2010.5559246
- Knuth, D. (1968). *The art of computer programming* (3.^a ed., Vol. 1). Addison-Wesley Publishing Company.
- Li, W., Zhou, J., Xie, K., y Xiong, X. (2008, may). Power system risk assessment using a hybrid method of fuzzy set and monte carlo simulation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 23(2), 336 -343. doi: 10.1109/TPWRS.2008.919201
- Martínez, R. (2009, abril). *Diseño de una metodología para el análisis de riesgo en la expansión de los servicios de llamada y mensajería de texto en un sistema móvil celular*. Caracas, Venezuela.
- Metropolis, N. (1987). The beginning of the monte carlo method. *Los Alamos Science Special Issue*, 125-130.
- Mize, J., y Grady, J. (1968). *Essential of simulation*. Prentice-Hall International.

- Montgomery, D. C. (1991). *Diseño y análisis de experimentos*. Iberoamérica.
- Oliveira, E. D. (2005). *Diseño de un modelo de análisis de riesgo crediticio para una empresa de seguros de crédito en venezuela* (Inf. Téc.). Caracas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar, Facultad de Ingeniería.
- Pantos, M., Gubina, A., y Gubina, F. (2004). Provision of operating states for power system simulation via monte carlo approach. En *Probabilistic methods applied to power systems, 2004 international conference on* (p. 883 - 887). doi: 10.1109/PMAFS.2004.241863
- Pisani, L. (2003). *Aplicación de técnicas de análisis de riesgo para el estudio de la rentabilidad de un proyecto de inversión en el área de telecomunicaciones*.
- Prawda, J. (1982). *Métodos y modelos de investigación de operaciones* (1.^a ed., Vol. 1). Limusa.
- Schreiner, A., y Balzer, G. (2007, july). Value at risk method for asset management of power transmission systems. En *Power tech, 2007 ieee lausanne* (p. 1 -5). doi: 10.1109/PCT.2007.4538282
- Sullivan, W. G., Wicks, E. M., y Luxhoj, J. T. (2004). *Ingeniería económica de degarmo* (12.^a ed.; E. Q. Duarte, Ed.). Pearson Educación.
- Toro, J. (1993). *Fundamentos de teoría económica* (2.^a ed.). Panapo.
- Walpole, R., y Myers, R. (1984). *Probabilidad y estadística para ingenieros* (2.^a ed.). Interamericana.
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (6.^a ed.). Pearson Education.
- Wittwer, J. (2004, Junio). *Monte carlo simulation basics*. Descargado de <http://vertex42.com/ExcelArticles/mc/MonteCarloSimulation.ftml> ([Consulta: Febrero, 2012])