

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA PARA UNA PLANTA COMPRESORA DE GAS NATURAL DE LA INDUSTRIA PETROLERA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por el Br. Guzmán Yanes, Yván Alejandro
para optar por al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA PARA UNA PLANTA COMPRESORA DE GAS NATURAL DE LA INDUSTRIA PETROLERA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Alfonso Quiroga.
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Christopher Pérez.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por el Br. Guzmán Yanes, Yván Alejandro
para optar por al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

Guzmán Y. Yván A.

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA PARA UNA PLANTA COMPRESORA DE GAS NATURAL DE LA INDUSTRIA PETROLERA

**Tutor Académico: Prof. Alfonso Quiroga. Tutor Industrial: Ing. Christopher Pérez.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica. 2002, n^o 95.**

Palabras Claves: Ciclo de Vida, Confiabilidad, Incertidumbre.

RESUMEN

En el trabajo especial de grado presentado a continuación se creó un programa en Excel con aplicaciones de Visual Basic que calcula de una forma detallada el Costo de Ciclo de Vida de activos de la empresa petrolera, dándole vital interés a los costos por concepto de mantenimiento tanto preventivo como correctivo.

En el mismo se muestran todos los fundamentos teóricos y modelos matemáticos utilizados para su creación; así como un manual de uso de dicho programa con la finalidad de ambientar al usuario, y capacitarlo en su utilización de una manera rápida y eficiente por el mismo; de manera que pueda introducir todas las variables de entrada sin ningún tipo de inconveniente y así optimizar el tiempo de uso de la herramienta. De igual forma y con la finalidad de validar el programa realizado en este trabajo especial de grado, se destinó un capítulo para mostrar una comparación entre los resultados obtenidos de la aplicación del programa a una planta piloto de la Industria Petrolera, con los resultados obtenidos de un programa ya existente, que forma parte de un grupo de herramientas con las que cuenta INTEVEP, aplicado a la misma planta piloto. Otro motivo importante que se tiene para establecer la comparación entre los programas mencionados anteriormente es visualizar el grado de incertidumbre que presenta la evaluación de un activo en donde todos los datos de confiabilidad que involucra el área de mantenimiento son ingresados de forma muy genérica, tal es el caso del Software que posee actualmente la Empresa Petrolera.

DEDICATORIA

Este trabajo que representa la culminación de todos los esfuerzos durante mi carrera de pregrado y por el cual he luchado los últimos años de mi vida lo dedico con muchos sentimientos:

A mis padres Iván y Solange que simplemente son el motor de mi vida y que me dieron hasta lo que no tenían para hacerme feliz en todo momento, que lucharon día a día en mi formación como persona y que lograron sembrar en mí esos sentimientos tan lindos que los caracteriza.

A mi hermano Iván Gerardo que siempre me ha servido de ejemplo para saber cual debe ser mi camino y como deben hacerse las cosas.

A mi lindo ahijado Daniel que a pesar de la distancia siempre lo tengo en mi corazón y que con su pequeña presencia llena de alegría a una gran familia.

A mis lindos abuelos Gerardo y Emilia que darían la vida por mí y me hicieron sentir tan especial en todo momento, que jugaron un papel tan importante en mi formación como persona y que son el mejor ejemplo de unas personas lindas, honestas, sencillas y con grandes valores.

A mi adorada abuela Elena que aun muchos años después de su partida la siento a mi lado cada día, a mi abuelo José que a pesar de su forma de ser siempre demuestra de una forma u otra el cariño que siente por su familia.

A mis tíos que me ayudaron en todo momento durante mi carrera y en toda mi vida, que siempre estuvieron presente incondicionalmente para ayudarme y hacerme la vida mas fácil, que siempre me hicieron sentir la presencia de una familia unida a la cual yo pertenezco y que significan mucho para mí.

A mi madrina Neyza que a pesar de la distancia siempre se ha preocupado por mí y que en todo momento me ha abierto sus puertas para recibirme con gran cariño.

A mi padrino Henry que siempre me ha brindado su ayuda incondicionalmente y regalo muchos momentos lindos durante mi infancia.

A mis primos con los que siempre he contado, con los que tengo los recuerdos mas lindos de mi infancia y los que valoro con todo mi corazón porque si dios quiere siempre estaremos unidos, a Heilym a quien quiero como una hermana y quien me ha brindado todo su cariño.

A todos mis amigos, en especial a Ander, Alexis, Humberto, Luis y Eloisa; que a pesar del distinto rumbo que tomaron nuestras vidas valoramos la amistad que en este momento nos une y que en un futuro si dios quiere nos mantendrá unidos.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todos aquellos que de una u otra forma intervinieron para hacer posible la realización de este trabajo, y así contribuir en la culminación de una de mis grandes metas, en especial a:

Dios, por estar siempre presente y ayudándome en los momentos más difíciles.

La Universidad Central de Venezuela que aportó todos los conocimientos necesarios para la realización de este trabajo.

INTEVEP por permitirme realizar este trabajo que representa la culminación de mis estudios de pregrado, en una empresa tan prestigiosa.

Mis tutores industriales Christopher Pérez, Carlos Parra y mi tutor académico Alfonso Quiroga, por guiarme en todo momento durante la realización de este trabajo para obtener los mejores resultados.

Un buen asesor que en todo momento brindó su ayuda y permitió en gran parte la culminación de este trabajo como lo es Francisco Pinto.

Todos mis compañeros de trabajo que de alguna forma me ayudaron, en especial a Nathalie Díaz que brindó su apoyo incondicional en todo momento.

A todos con los más sinceros deseos, mil gracias.

Yván Guzmán.

INDICE

RESUMEN	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	IV
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	4
I.1.- ANTECEDENTES DE LA EMPRESA	4
I.2.- MISIÓN.....	4
I.3.- VISIÓN	5
I.4.- OBJETIVOS	5
I.5.- INFRAESTRUCTURA	5
I.6.- ORGANIGRAMA.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
II.1.- ANÁLISIS DE COSTO RIESGO BENEFICIO (ACRB)	7
II.1.2.- Riesgo, un Indicador para el Diagnóstico Integrado	11
II.1.3.- Análisis de Costos de Ciclos de Vida	13
II.1.3.1.- CARACTERÍSTICAS DE LOS COSTOS EN LAS DISTINTAS FASES DEL CICLO DE VIDA.....	15
II.1.3.1.1.- DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA	15
II.1.3.1.2.- DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA	16
II.1.3.1.3.- DISEÑO DETALLADO Y DESARROLLO	17
II.1.3.1.4.- PRODUCCIÓN, USO Y APOYO	17

II.1.3.1.5.- RETIRADA Y ELIMINACIÓN	17
II.1.3.1.6.- COSTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO (CAPEX).....	19
II.1.3.1.7.- COSTO DE ADQUISICIÓN Y CONSTRUCCIÓN(CAPEX).....	19
II.1.3.1.8.- COSTO DE OPERACIÓN Y APOYO (OPEX)	19
II.1.3.1.9.- COSTO DE RETIRADA Y ELIMINACIÓN (CAPEX)	19
II.1.3.2.- TRATAMIENTOS DE LOS COSTOS A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA.....	20
II.1.3.3.- TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DEL CICLO DE VIDA	22
II.1.3.4.- MÉTODO DE EVALUACIÓN DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA DENOMINADO COSTO ANUAL EQUIVALENTE (AELCC)	24
II.1.3.4.1.- COSTO ANUAL EQUIVALENTE DE LA POBLACIÓN (PC).....	26
II.1.3.4.2.- COSTO OPERATIVO ANUAL (OC).....	28
II.1.3.4.3.- COSTO ANUAL DE MANTENIMIENTO MAYOR - REPARACIONES ESPECIALES (RC)	28
II.1.3.4.4.- COSTO ANUAL DE PENALIZACIÓN / MODOS DE FALLA (\$/AÑO) (SC-MF)	29
II.1.3.4.5.- COSTO ANUAL DE PENALIZACIÓN/PÉRDIDA DE EFICIENCIA (\$/AÑO) (SC-E).....	31
II.2.- ANÁLISIS DETALLADO DEL COMPORTAMIENTO ALEATORIO DE LOS DIVERSOS MODOS DE FALLA PRESENTES EN UN ACTIVO	31
II.2.1.- SISTEMAS NO REPARABLES:	32
II.2.1.1.- DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL	35
II.2.1.2.- DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.....	37
II.2.1.3.- DISTRIBUCIÓN GAMMA	40

II.2.2.- Teoría Básica de lo Procesos Puntuales	42
II.2.3.- Apreciación Global de Modelos	47
II.2.4.- Modelos Probabilísticos (Procesos de Poisson)	47
II.2.4.1.- PROCESOS DE POISSON:	48
II.2.4.2.- PROCESOS HOMOGÉNEOS DE POISSON	50
II.2.4.3.- PROCESOS NO HOMOGÉNEOS DE POISSON:.....	51
II.2.5.- Modelos Probabilísticos (Procesos de Renovación)	53
II.3.- ESQUEMA GENERALIZADO INTERNO DEL “VICON”	59
CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DE PLANTA COMPRESORA PUNTA DE MATA	61
III.2.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS T1, T2 Y T3 DE MUSCAR	62
III.3.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS T4 Y T5 DE MUSCAR .	63
III.4.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS T1, T2 Y T3 DE COA....	64
III.5.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS T4 Y T5 Y T6 DE COA .	65
III.6.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS DE PIGAP	66
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES	68
CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXO.....	71

TABLA DE FIGURAS

FIGURA II.1.- Limitación por Datos Históricos	8
FIGURA II.2.- Intervalo óptimo para la realización de la actividad de mantenimiento.....	10
FIGURA II.3.- Gráfico de Probabilidad de Falla vs. Consecuencias.	11
FIGURA II.4.- Proceso de Diagnóstico Integrado	12
FIGURA II.6.- Limitación por Datos Históricos	18
FIGURA II.7.- Desglose o Descomposición del Costo	20
FIGURA II.8.- Perfil de Costos.....	22
FIGURA II.9.- Tendencia del Comportamiento en las Diversas Zonas de la Curva de la Bañera.....	30
FIGURA II.10.- Gráfico de Función Densidad de Probabilidad para la distribución exponencial con media $\theta = 100$	36
FIGURA II.11.- Gráfico de Función Distribución Acumulada para la distribución exponencial con media $\theta = 100$	36
FIGURA II.12.- Función Densidad de Probabilidad, Función Distribución Acumulada y Función Riesgo de Weibull para $\beta = 1.8$ (gráficas superiores), $\beta = 1$ (gráficas medias) y $\beta = 0.6$ (gráficas inferiores)	38
FIGURA II.13.- Función Densidad de Probabilidad, Función Distribución Acumulada y Función Riesgo de Gamma para $k = 0.6$ (gráficas superiores), $k = 1$ (gráficas medias) y $k = 2$ (gráficas inferiores)	41
FIGURA II.14.- Curva de la Bañera (Función Riesgo).	46
FIGURA II.15.- Función Intensidad en Forma de Bañera.....	46

FIGURA II.16.- Función Intensidad y Función Media para un Proceso no Homogéneo de Poisson, con $\lambda(t) = 0,02t^{0,8}$	52
FIGURA II.17.- Función Intensidad completa condicionada a fallar en $t = 2, 4.5, 8.5, 10.5, 13$ y 15	54
FIGURA II.18.- Función Densidad de Probabilidad para las primeras cinco fallas de una GAM(3,1) de un Proceso de Renovación.	56
FIGURA II.19.- Función ROCOF para una función GAM(3,1) de un Proceso de Renovación.	56
FIGURA II.20.- Función Densidad de Probabilidad para las primeras cinco fallas de una GAM(30,0.1) de un Proceso de Renovación.....	56
FIGURA II.21.- Función ROCOF para una función GAM(30,0.1) de un Proceso de Renovación.	57
FIGURA II.22.- Esquema generalizado interno del programa “ VICON”	59
FIGURA II.23.- Esquema generalizado interno para tratar los modos aleatorios de falla .	60
FIGURA III.1 Clasificación para la Evaluación.....	61
FIGURA III.2 VICON (T1,T2 y T3 de MUSCAR)	62
FIGURA III.3 LIFESPAN (T1,T2 y T3 de MUSCAR)	62
FIGURA III.4 VICON (T4 y T5 de MUSCAR).....	63
FIGURA III.5 LIFESPAN (T4 y T5 de MUSCAR).....	63
FIGURA III.6 VICON (T1,T2 y T3 de COA).....	64
FIGURA III.7 LIFESPAN (T1,T2 y T3 de COA).....	64
FIGURA III.8 VICON (T4,T5 y T6 de COA).....	65

FIGURA III.10 VICON (Turbinas de PIGAP).....	66
FIGURA III.11 LIFESPAN (Turbinas de PIGAP).....	66
FIGURA ANEXO 1 - Ventana Principal del Programa “ <i>VICON</i> ”.....	73
FIGURA ANEXO 2 - Ventana de Costos de Instalación y Desincorporación.....	76
FIGURA ANEXO 3 - Ventana de Costos de Operación y Mantenimiento.....	78
FIGURA ANEXO 4 - Ventana de Costos de Mantenimiento Mayor.....	79
FIGURA ANEXO 5 - Ventana de Penalización por Pérdida de Eficiencia.....	81
FIGURA ANEXO 6 - Ventana de Penalización por Modos de Falla.....	83
FIGURA ANEXO 7 - Cuadro de Frecuencia Fija.....	85
FIGURA ANEXO 8 - Ventana de los Modos de Falla con Modelo de Renovación con Histórico.....	86
FIGURA ANEXO 9 - Ventana de los Modos de Falla con Modelos de Renovación con Parámetros.....	88
FIGURA ANEXO 10 - Ventana de los Modos de Falla con Modelo de Deterioro con Histórico.....	89
FIGURA ANEXO 11 - Ventana de Modelo de Deterioro con Parámetros.....	91
FIGURA ANEXO 12 - Ventana de Resultados de la Simulación del Ciclo de Vida.....	93
FIGURA ANEXO 13 – Primer Escenario.....	95
FIGURA ANEXO 14 – Segundo Escenario.....	95
FIGURA ANEXO 15 – Tercer Escenario.....	95

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria petrolera Venezolana, ha venido desarrollando una serie de iniciativas tendientes a optimizar de forma integral el proceso de gestión de los activos involucrados en las diversas actividades de exploración, producción, refinación, mercadeo y distribución del petróleo y sus derivados.

Dentro de este escenario, existe un área de optimización de especial atención, la cual se relaciona con el proceso de toma de decisiones para sustituir activos actuales por activos nuevos, o simplemente para justificar la adquisición de los activos nuevos. En este proceso, ocurren muchas decisiones y acciones, tanto técnicas como no técnicas, que se deben adoptar a lo largo del ciclo de vida del activo. La mayoría de las acciones, particularmente las que corresponden a las primeras fases, tienen implicaciones en el ciclo de vida del activo e influyen en gran medida sobre sus costos. Por tanto, se debe emplear el cálculo del costo del ciclo de vida en la evaluación de: configuraciones alternativas de diseño del sistema, esquemas alternativos de producción, políticas alternativas de apoyo logístico y en la definición del momento óptimo de reemplazo del activo.

Motivado a todo lo anterior se creó en INTEVEP (Instituto de Tecnología Venezolano de Petróleo), el cual es el ente encargado de canalizar los aportes necesarios para el desarrollo de la empresa. El Departamento de Confiabilidad de INTEVEP, está particularmente destinado a brindar apoyo a las diversas áreas de PDVSA para optimizar los procesos de operación y mantenimiento, enfocándose en la confiabilidad de los diversos equipos que constituyen una planta, con el fin de obtener el máximo provecho al costo más conveniente.

Con la finalidad de continuar con los procesos de optimización en el área operacional y de mantenimiento surge la iniciativa de la creación de un programa que analice el costo de ciclo de vida de una planta; el cual no solo tome en cuenta el diseño, los costos de adquisición, costos de operación y mantenimiento e incluso costos de desincorporación al final de su vida útil; sino que dentro del ámbito del mantenimiento se enfatice en la confiabilidad del equipo con la aplicación de diversos procesos estadísticos que serán mostrados en la parte teórica.

La estructura del trabajo comienza con una descripción de la empresa denominada capítulo I.

Luego es dedicado un capítulo II a toda la parte conceptual necesaria para la elaboración del programa *VICON*, donde se plantean todas las variables para un Análisis de Costo de Ciclo de Vida (LCC) y específicamente todas aquellas utilizadas para el tratamiento de los modos aleatorios de falla correspondientes a los mantenimientos correctivos.

A continuación se establece una comparación entre los resultados del programa realizado con uno ya existente perteneciente a la empresa petrolera, a través de una aplicación de los mismos a una planta piloto (capítulo III).

En el capítulo IV y en el capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones, respectivamente, del trabajo.

Finalmente el anexo muestra un manual del programa realizado (*VICON*) con la finalidad de ambientar al usuario en las diversas ventanas que este presenta.

OBJETIVOS

Objetivo General

Crear una herramienta que analice el costo de ciclo de vida de un activo incluyendo todo el análisis de confiabilidad que la misma amerite.

Objetivos Específicos

- Definir y desarrollar todas las variables requeridas en el desarrollo del modelo.
- Identificar todas las posibles barreras y obstáculos.
- Proponer acciones que minimicen el impacto de las mismas.
- Elaborar un programa en ambiente Excel con la finalidad de obtener una herramienta mas completa y funcional.
- Crear una guía de fácil uso para dicho programa, con la finalidad de implantarlo fácilmente en la industria petrolera.
- Aplicar el programa a una planta piloto y comparar los resultados con la herramienta APT LIFESPAN.

CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

I.1.- ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

En la Asociación Pro-Venezuela, durante una mesa redonda en 1970, se le solicitó al CONICIT designar una comisión de trabajo para crear un centro de investigación petroquímica, lo cual más adelante resultó en la elaboración de un proyecto para investigación sobre petróleo y petroquímica. El grupo de trabajo lo presidió Marcel Roche y fue coordinado por Aníbal R. Martínez. De estos esfuerzos nació el proyecto para crear el Instituto de Investigaciones Petroleras y Petroquímicas (INVEPET) en 1972 y en 1973 el gobierno decretó que el Ministerio de Minas e Hidrocarburos, el CONICIT, la CVP y el IVP establecieran la Fundación INVEPET y se procedió a registrar sus estatutos.

El 22 de abril de 1975, el INVEPET entregó al Ministerio de Minas e Hidrocarburos su diagnóstico sobre transferencia de tecnología en la industria petrolera. El día de la nacionalización, 1º de enero de 1976, el INVEPET cambió de nombre a Intevep y Petróleos de Venezuela S.A. asumió responsabilidad plena de las funciones de esta nueva filial. Toda la experiencia acumulada por venezolanos en investigación científica y tecnológica, básica y/o aplicada, se volcaron a la tarea de impulsar a Intevep para prestar directamente al país y a su industria petrolera estatal aquellos servicios que manejaron las concesionarias. No sólo los servicios existentes en Venezuela, también los que no se tenían pero que tuvieron disponibles en el exterior, en las respectivas casa matriz y/o filiales. Hoy en día se conoce como PDVSA INTEVEP y constituye el brazo tecnológico de PDVSA.

I.2.- MISIÓN

La misión de PDVSA INTEVEP es:

- Apoyar los negocios de la corporación, respondiendo a sus requerimientos tecnológicos.
- Desarrollar tecnologías en áreas estratégicas y en función de recursos propios.
- Mantener la competitividad técnica de PDVSA y sus filiales.

- Desarrollar nuevas oportunidades de comercialización para los crudos pesados y extrapesados.
- Maximizar la creación de valor agregado para la Nación.

I.3.- VISIÓN

La visión de PDVSA INTEVEP es:

“Ser la primera opción de apoyo tecnológico de la industria venezolana de los hidrocarburos, con orientación de negocio a nivel nacional e internacional.”

I.4.- OBJETIVOS

El objetivo principal de PDVSA INTEVEP es:

“Servir de soporte tecnológico a la industria petrolera y petroquímica nacional, disminuyendo en un grado razonable la dependencia tecnológica de dichas industrias de fuentes foráneas.”

I.5.- INFRAESTRUCTURA

Para cumplir sus actividades, PDVSA INTEVEP cuenta con la siguiente infraestructura; en su sede ubicada en Los Teques, Estado Miranda::

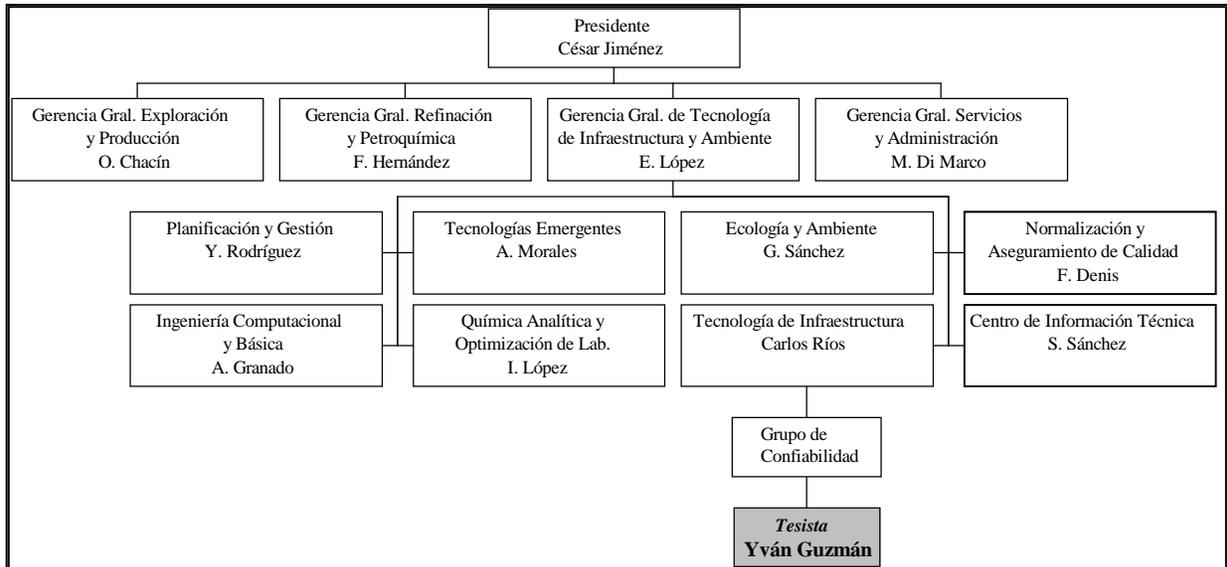
- Conjunto de laboratorios (con un área de 16.000 m²) dotados de equipos de avanzada que aseguran resultados oportunos y de alta calidad.
- Complejo de 27 plantas piloto y 11 unidades de servicio para simulación de procesos que permiten resolver problemas operacionales de variada complejidad, así como bancos de motores para pruebas de lubricantes y combustibles y un pozo experimental que permite una amplia gama de pruebas relacionadas con producción.

- Centro de Información Técnica (CIT) con acceso a más de 500 bases de datos internacionales, 30.000 monografías, 1.600 títulos de publicaciones periódicas, 25.000 normas técnicas, 1.050 discos compactos.
- Equipos de cómputo intensivo, organizados en: Centro de Simulación de Yacimientos, Centro de Procesamiento de Datos Geofísicos, Centro de Visualización Científica y Laboratorio de Química Computacional, todos interconectados por redes de alta velocidad.

Para complementar las actividades desarrolladas en su Sede, PDVSA INTEVEP ha establecido convenios técnicos que tiene con 14 universidades venezolanas y extranjeras. Además, tiene convenios con 22 centros de investigación, en Venezuela y en otros países como Alemania, Canadá, Estados Unidos, Francia, Gran Bretaña, Noruega.

I.6.- ORGANIGRAMA

En la figura 1.1 se muestra el organigrama de PDVSA INTEVEP, la cual cuenta con cuatro grandes gerencias generales. Este trabajo fue desarrollado en la Gerencia General de Tecnología de Infraestructura y Ambiente, Grupo de Energía.



CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Con el fin de lograr una fácil comprensión del lector sobre la información suministrada en este capítulo, la cual presenta definiciones muy complejas sobre todo en cuanto a selección de modos de falla, costos específicos de ciclos de vida, modelaje de confiabilidad, influencia de la inflación en el análisis, etc., previo a profundizar sobre todos estos temas de una manera detallada y minuciosa, se hablará y definirá de manera general del proceso de una gestión de activos.

El proceso de una gestión de activos no es más que un procedimiento detallado y cuidadosamente analizado con el fin de obtener la información necesaria para toma de decisiones sobre el mismo. Existen varios análisis de activos comunes utilizados en la industria petrolera, uno de ellos es el **Análisis de Costo Riesgo Beneficio (ACBR)** el cual es una metodología que permite identificar la frecuencia óptima de las actividades de mantenimiento preventivo, con base en el costo total óptimo que genera. Esto se logra a través del balance de los costos – riesgos asociados a tales actividades y los beneficios que generan. Un procedimiento muy útil para dicho análisis es el **Costo de Ciclo de Vida** de un activo, el cual puede ser definido como el costo total de un equipo sobre sus operaciones de vida incluyendo el costo inicial de adquisición y los subsecuentes costos de funcionamiento, estos últimos costos incluyen una gran cantidad de variables que deben ser tomados en cuenta para obtener buenos resultados en la evaluación, entre los cuales los más resaltantes pueden ser: la buena clasificación de los modos de falla y buena modelación de confiabilidad.

II.1.- ANÁLISIS DE COSTO RIESGO BENEFICIO (ACRB)

En años recientes, grandes corporaciones especialmente del sector de hidrocarburos y de la industria de procesos, han volcado su atención hacia el modelo de decisión “Costo Riesgo”, debido a que el mismo permite comparar el costo asociado a una acción de mantenimiento contra el nivel de reducción de riesgo o mejora en el desempeño debido a dicha acción; en otras palabras, el modelo permite saber “cuanto obtengo por lo que gasto”.

El análisis “Costo-Riesgo” resulta particularmente útil para decidir en escenarios con intereses en conflicto, como el escenario “Operación – Mantenimiento”, en el cual el operador requiere que el equipo o proceso opere en forma continua para garantizar máxima producción, y simultáneamente, el mantenedor requiere que el proceso se detenga con cierta frecuencia para poder mantener y ganar confiabilidad en el mismo. El modelo Costo-Riesgo es el indicado para resolver el conflicto previamente mencionado, dado que permite determinar el nivel óptimo de riesgo y la cantidad adecuada de mantenimiento, para obtener el máximo beneficio o mínimo impacto en el negocio.

Es una metodología que permite identificar la frecuencia óptima de las actividades de mantenimiento preventivo, con base en el costo total óptimo que genera. Esto se logra a través del balance de los costos – riesgos asociados a tales actividades y los beneficios que se generan.

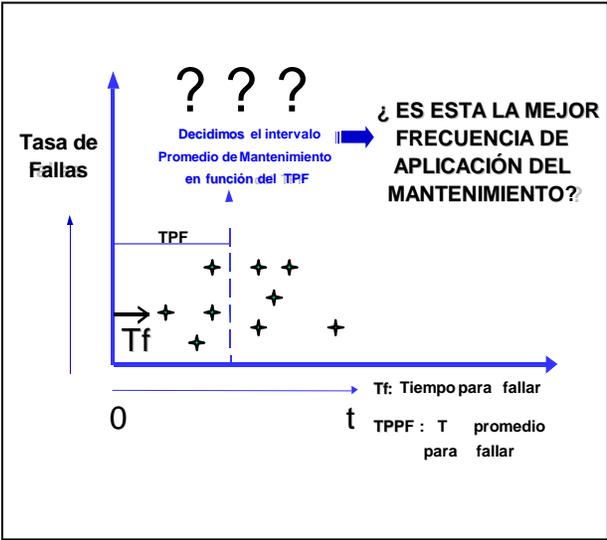


FIGURA II.1.- Limitación por Datos Históricos

Con ACRB se pueden determinar intervalos óptimos de mantenimiento, intervalos óptimos de inspección, análisis de factibilidad de reemplazo, análisis de factibilidad de inventario y análisis de ciclo de vida de las unidades.

Generalmente las gestiones de mantenimiento son aplicadas sólo para disminuir las frecuencias de fallas, sin analizar las consecuencias que generan éstas en el contexto operacional. En la selección de frecuencia de aplicación de las actividades de

mantenimiento, el criterio usado ha sido la data histórica de fallas: tiempo promedio para fallar (TPPF). (véase Figura II.1).

Actualmente la función del mantenimiento no puede limitarse únicamente a la reducción de fallas con acciones de mantenimiento basadas en registros históricos de fallas. De esta manera el mantenimiento se puede describir como: “Preservar la función de los equipos aplicando estrategias efectivas de mantenimiento “costo/riesgo/beneficio”, que ayuden a minimizar los riesgos asociados a las consecuencias que generan los distintos modos de fallas dentro del contexto operacional”.

Para determinar los beneficios que aporta el mantenimiento, es necesario tomar en cuenta las razones que justifican las actividades de mantenimiento, esto es: ¿Cuál es el motivo para invertir dinero en mantenimiento?

Las razones principales que sustentan a este cuestionamiento son:

- Evita fallas o permite recuperarse de ellas.
- Mejora la eficiencia del equipo.
- Prolonga la vida útil.
- Permite el cumplimiento de las regulaciones.
- Mejora la imagen.

Un inconveniente, es relacionar las ganancias que se obtienen a partir de lo que se invierte en un departamento y los beneficios que se reflejan en otro sector. Esto conduce a la cuantificación de las variables involucradas y además relacionarlas con la cantidad obtenida con un gasto adicional o reducido, hecho que es complejo.

Una definición sólida debe involucrar las relaciones de precio-valor. Se debe adoptar algún tipo de unidades que permitan cuantificar cosas disímiles. El impacto total en la hoja de balance debe ser factor que determine la mejor oferta. Esto significa, minimizar el costo total de producción o maximizar las ganancias. Sólo a este nivel podemos

determinar la combinación óptima entre los costos y los logros. La forma más común de expresar todo esto es a través de una gráfica como la que se muestra en la figura II.2., en donde se pueden observar tres curvas que varían en el tiempo:

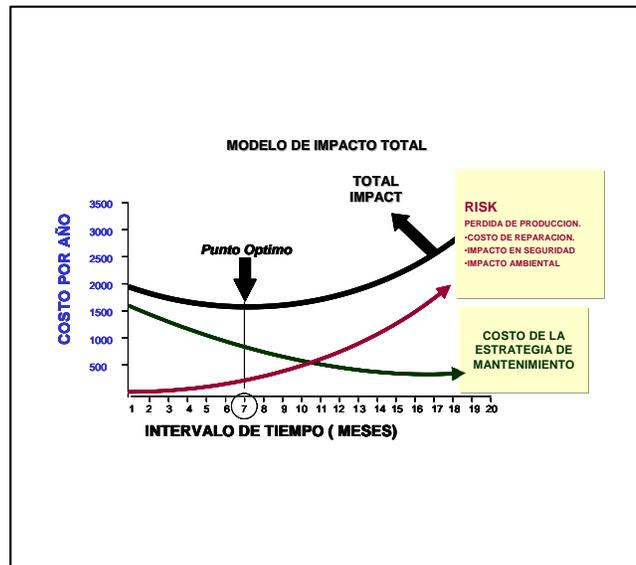


FIGURA II.2.- Intervalo óptimo para la realización de la actividad de mantenimiento

- La curva del nivel de riesgo (riesgo = probabilidad de falla x consecuencia)
- La curva de los costos de mantenimiento, en la cual se simulan los costos de diferentes frecuencias para la acción de mantenimiento propuesta
- La curva de impacto total, que resulta de la suma punto a punto de la curva de riesgos y la curva de los costos de mantenimiento. El mínimo de esta curva, representa el “mínimo impacto posible en el negocio” y esta ubicado sobre el valor que puede traducirse como el periodo o frecuencia óptima para la realización de la actividad de mantenimiento. Un desplazamiento hacia la derecha de este punto implicaría “asumir mucho riesgo” y un desplazamiento hacia la izquierda del mismo implicaría “gastar demasiado dinero”.

La dificultad para el uso del modelo, se centra en la estimación o modelaje de la curva del riesgo, ya que la misma requiere la estimación de la probabilidad de falla (y su variación con el tiempo), y las consecuencias. En la próxima sección, se detallan las herramientas para lograr el correcto modelaje y estimación del riesgo.

II.1.2.- RIESGO, UN INDICADOR PARA EL DIAGNÓSTICO INTEGRADO

El riesgo, base fundamental del modelo de decisión descrito en la sección anterior, es un término de naturaleza probabilística, que se define como la “probabilidad de tener una pérdida”, y comúnmente se expresa en unidades monetarias, (Bs. ó \$). Matemáticamente, el riesgo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo}(t) = \text{Probabilidad de Falla}(t) \times \text{Consecuencias}$$

El análisis de la ecuación del riesgo, permite entender el poder de este indicador para el diagnóstico y la toma de decisiones, debido a que el mismo combina probabilidades o frecuencias de fallas con consecuencias, permitiendo la comparación de unidades como los equipos rotativos, que normalmente presentan alta frecuencia de fallas con bajas consecuencias, con equipos estáticos, que normalmente presentan patrones de baja frecuencia de fallas y alta consecuencia (véase Figura II.3).

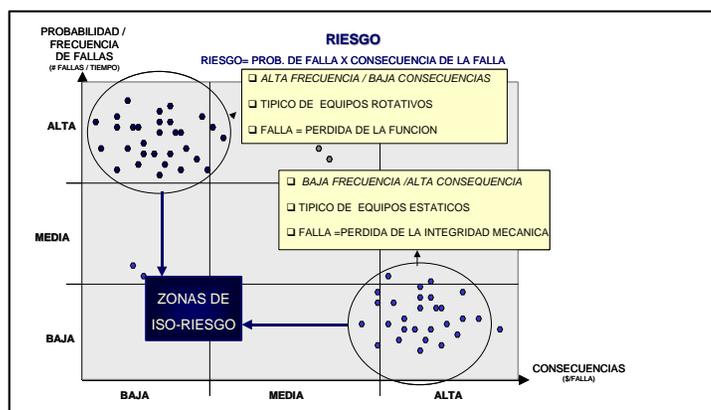


FIGURA II:3.- Gráfico de Probabilidad de Falla vs. Consecuencias.

El riesgo, se comporta como una balanza, que permite pesar la influencia de ambas magnitudes (Probabilidad de Falla y Consecuencia de la Falla) en una decisión particular.

El mantenimiento moderno, sustentado en la Ingeniería de Confiabilidad, requiere de un cuidadoso proceso de diagnóstico de equipos y sistemas. El diagnóstico, basado en el “riesgo”, puede entenderse entonces como un proceso que busca caracterizar el estado actual y predecir el comportamiento futuro de equipos y sistemas.

Para el logro de un diagnóstico integrado, el riesgo debe calcularse usando toda la información disponible; es decir, debe incluir el análisis del historial de fallas, los datos de condición y datos técnicos. De esta forma, se podrán identificar las acciones correctivas y proactivas que puedan efectivamente optimizar costos y minimizar su impacto en el negocio medular. La figura II.4 muestra el proceso de “Diagnóstico Integrado”

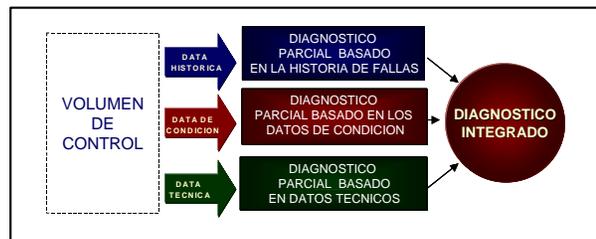


FIGURA II.4.- Proceso de Diagnóstico Integrado

Entendiendo entonces que el “riesgo” es el indicador para un diagnóstico integrado, se analizará a continuación, con el máximo detalle posible el proceso para estimarlo.

El cálculo del riesgo, involucra la estimación de la Probabilidad de Fallas y/o la Confiabilidad, ($\text{Confiabilidad} = 1 - \text{Probabilidad de Fallas}$), y de las Consecuencias. La figura II.5 muestra la descomposición del indicador “riesgo” en sus componentes fundamentales.

La figura II.5, muestra claramente que para calcular riesgo, deben establecerse dos (2) vías, una para el cálculo de la confiabilidad y/o la probabilidad de fallas, en base a la historia de fallas o en base a la condición; y otra para el cálculo de las consecuencias.

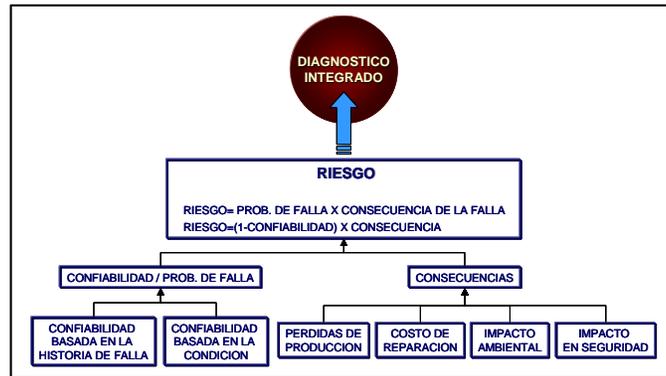


FIGURA II.5.- Descomposición del Indicador “Riesgo”.

II.1.3.- ANÁLISIS DE COSTOS DE CICLOS DE VIDA

El diseño en la ingeniería tradicional se ha centrado principalmente en la fase de adquisición del ciclo de vida. Sin embargo, la experiencia reciente indica que no puede seleccionarse un activo adecuadamente, y que sea competitivo en el mercado, mediante acciones aplicadas mucho después de haber sido concebido. Por tanto, es esencial que los ingenieros contemplen la viabilidad operativa durante las primeras etapas del desarrollo del producto y que asuman la responsabilidad del cálculo del costo del ciclo de vida, tan ignorado en el pasado. Este análisis implica un método secuencial que emplea los valores relevantes del costo del ciclo de vida como criterios para alcanzar un diseño apto desde el punto de vista de costo-efectividad.

La gran cantidad de variables que se deben manejar a la hora de estimar los costos reales de un activo a lo largo de su vida útil, generan un escenario de alta incertidumbre. La combinación entre inflación creciente, aumentos de los costos, reducción del poder adquisitivo, limitaciones de presupuesto, aumento de la competencia y otras características similares, ha generado una inquietud e interés acerca del costo total de los activos. La situación económica actual se complica aún más con algunos problemas adicionales relacionados con la determinación real del costo del activo. Algunos de ellos son:

- A menudo el costo total del sistema no es visible, en particular aquellos costos asociados con la operación y apoyo del sistema.
- A menudo los factores de costos se aplican incorrectamente. Los costos individuales se identifican mal y, muchas veces, se incluyen en la categoría equivocada: los costos variables se tratan como fijos (y viceversa), los costos indirectos se tratan como directos, etc.
- Los procedimientos contables no siempre permiten una evaluación realista y oportuna del costo total. Además, a menudo es difícil (si no imposible) determinar los costos, de acuerdo con una base funcional.
- Muchas veces las prácticas presupuestarias son inflexibles con respecto al cambio de fondos de una categoría a otra, o, de un año a otro, para facilitar las mejoras del costo de adquisición. Para evitar la incertidumbre en el análisis de costos, los estudios de viabilidad económica deben abordar todos los aspectos del costo del ciclo de vida. La tendencia actual del aumento de la inflación y del costo, junto con los problemas adicionales ya enunciados, ha conducido a una falta de efectividad en el uso de recursos valiosos. Se han desarrollado sistemas que no son aptos desde el punto de vista de costo-efectividad. Se puede anticipar que estas condiciones empeorarán, a menos que los ingenieros de diseño asuman un mayor grado de consideración de los costos.

Dentro del proceso dinámico de cambio de los costos, no sólo aumentan los costos de adquisición asociados a los nuevos sistemas, sino que también lo hacen de forma rápida los costos de operación y mantenimiento de los sistemas ya en uso. Esto es debido principalmente a una combinación entre los factores de aumento de la inflación y el costo debido a:

- Inexactitudes en las estimaciones, predicciones y previsiones.
- Cambios de ingeniería durante el diseño y desarrollo.
- Cambios en la producción y/o construcción del sistema.

- Cambios durante la adquisición de componentes del sistema.
- Calidad deficiente de los productos y sistemas durante su uso.
- Cambios en la capacidad de apoyo logístico.
- Contratiempos y problemas imprevistos.

La experiencia indica que el aumento en el costo por causas diversas ha sido muchas veces por el incremento de la tasa de inflación durante las últimas décadas. Al mismo tiempo, las asignaciones presupuestarias de muchos proyectos y programas están disminuyendo de año en año. El resultado es que cada vez se dispone de menos recursos para adquirir y operar nuevos sistemas, así como para mantener y apoyar los sistemas existentes.

II.1.3.1.- Características de los Costos en las Distintas Fases del Ciclo de Vida

El costo del ciclo de vida se determina identificando las funciones aplicables en cada una de sus fases, calculando el costo de estas funciones y aplicando los costos apropiados durante toda la extensión del ciclo de vida. Para que esté completo, el costo del ciclo de vida debe incluir todos los costos del fabricante y del consumidor. En los párrafos siguientes se resumen las características de los costos en las distintas fases del ciclo de vida del activo.

II.1.3.1.1.- Diseño Conceptual del Sistema

Las magnitudes de las características determinantes del costo, de acuerdo con las que se va a diseñar, probar, producir (o construir) y apoyar el sistema, deben establecerse en las etapas iniciales de planificación y diseño conceptual del sistema, cuando se están definiendo los requisitos. Se puede adoptar un objetivo de «diseño según el costo» (Design-To-Cost, DTC) a fin de establecer el costo como restricción del diseño del sistema o producto, al igual que las prestaciones, efectividad, capacidad, precisión, tamaño, peso, confiabilidad, mantenibilidad, soportabilidad, etc.

El costo debe ser un factor activo más que una consecuencia durante el proceso de diseño conceptual del sistema. Debido a la macronaturaleza de la estimación del costo durante la formulación del concepto, normalmente se usan métodos paramétricos al mismo tiempo que el buen juicio de los expertos.

II.1.3.1.2.- Diseño Preliminar del Sistema

Una vez establecidos los requisitos cuantitativos del costo, el siguiente paso incluye un proceso iterativo de síntesis, compromiso entre diversas opciones y optimización, y definición del sistema o producto. Los criterios definidos en el diseño conceptual del sistema se asignan o reparten inicialmente entre los diversos segmentos del sistema, a fin de establecer las pautas para el diseño y/o adquisición de los elementos necesarios. La asignación se realiza a nivel del sistema y se desciende posteriormente hasta el nivel necesario para suministrar los datos de entrada al diseño, así como para asegurar un control adecuado. Los factores asignados reflejan el objetivo de costo por unidad individual (esto es, un solo equipo o producto de la población desplegada) y están basados en los requisitos operativos del sistema, el concepto de mantenimiento y el concepto de retirada y eliminación.

A medida que evoluciona el desarrollo del sistema, se consideran diversos métodos que puedan conducir a seleccionar una configuración de preferencia. Se realizan análisis del costo del ciclo de vida evaluando cada posible candidato, con el fin de asegurar que el candidato seleccionado es compatible con los objetivos establecidos de costo, y de determinar cuál de los distintos candidatos considerados es el preferible desde un punto de vista global de costo-efectividad.

A continuación se realizan estudios de compromiso, utilizando el análisis del costo del ciclo de vida como una herramienta de evaluación, hasta que se elige una configuración de diseño de preferencia.

II.1.3.1.3.- Diseño Detallado y Desarrollo

A medida que el diseño del sistema o producto se refina con más profundidad y se dispone de datos del diseño, el proceso de análisis del costo del ciclo de vida va implicando la evaluación de características específicas del diseño (como reflejan la documentación del diseño y los modelos de ingeniería o prototipos), la predicción de fuentes generadoras de costo, la estimación de costos y la proyección del costo del ciclo de vida a fin de establecer el perfil del costo del ciclo de vida (Life-Cycle Cost Profile, LCCP). Los resultados se comparan con el requisito inicial y se toma una acción correctiva según sea necesario. De nuevo, esto es un proceso iterativo, pero a nivel inferior que el que se alcanzaba durante el diseño preliminar del sistema.

II.1.3.1.4.- Producción, Uso y Apoyo

Los aspectos de costo en las etapas de producción, uso, apoyo y, retirada y eliminación en el ciclo de vida del activo, se abordan mediante la recogida y el análisis de datos, y una función de evaluación de los mismos. Se identifican los determinantes de costos elevados, se definen las relaciones causa-efecto, y se obtiene y utiliza una información valiosa a efectos de la mejora del producto, mediante un nuevo diseño o un nuevo estudio de ingeniería. El objetivo es hacer estimaciones realistas de estos costos «aguas abajo» como ayuda en la evaluación del diseño.

II.1.3.1.5.- Retirada y Eliminación

Los costos que surgen de las actividades de baja en servicio, retirada y eliminación del sistema y de sus componentes se producen en un futuro lejano. Son particularmente difíciles de estimar en el momento del diseño. Sin embargo, la experiencia puede servir como guía, incluso aplicada únicamente en términos de porcentajes del costo inicial. Los costos reales que se producirán, se compensarán en alguna forma con el valor en ese momento de los componentes recuperados y de los materiales reciclados. La diferencia es lo que debe estimarse durante el diseño del sistema. Desde el punto de vista financiero, los costos generados a lo largo del ciclo de vida del activo son clasificados en dos tipos de costos (véase Figura II.6):

- **CAPEX:** Costos de capital (diseño, desarrollo, adquisición, instalación, entrenamiento staff, manuales, documentación, herramientas y facilidades para mantenimiento, repuestos de aseguramiento, desincorporación)
- **OPEX:** Costos operacionales (labor, operaciones, mantenimiento, almacenamiento, contrataciones, penalizaciones)

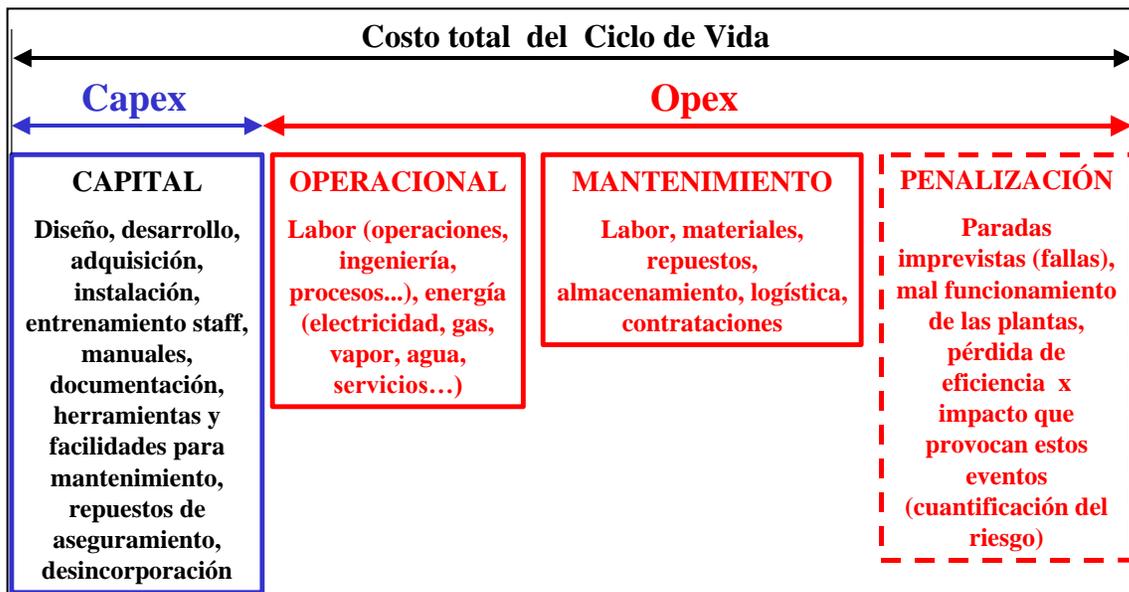


FIGURA II.6.- Limitación por Datos Históricos

En general, los costos a lo largo del ciclo de vida se dividen en categorías, de acuerdo con la actividad organizativa necesaria para concebir el sistema. Estas categorías y sus elementos constituyentes componen una estructura de desglose o descomposición del costo (Cost Breakdown Structure, CBS- ver Figura II.7). Las categorías principales de costos son:

II.1.3.1.6.- Costo de Investigación y Desarrollo (Capex)

Planificación inicial, análisis de mercado, investigación del producto, análisis de requisitos, diseño de ingeniería, datos y documentación de diseño, «software», pruebas y evaluación de los modelos de ingeniería, y funciones de gestión asociadas.

II.1.3.1.7.- Costo de Adquisición y Construcción(Capex)

Ingeniería industrial y análisis de operaciones, producción (fabricación, montaje y pruebas), construcción de instalaciones, desarrollo del proceso, operaciones de producción, control de calidad y requisitos iniciales de apoyo a la logística (por ejemplo, apoyo inicial al cliente, producción de repuestos, producción de equipo de pruebas y apoyo, etc.).

II.1.3.1.8.- Costo de Operación y Apoyo (Opex)

Operaciones del sistema o producto por parte del usuario, distribución del producto («marketing» y ventas, transporte y gestión de tránsito), y mantenimiento y apoyo logístico durante el ciclo de vida del sistema o producto (por ejemplo, servicio al cliente, actividades de mantenimiento, apoyo de abastecimiento, equipos de prueba y apoyo, transporte y manejo, datos técnicos, instalaciones, modificaciones del sistema, etc.).

II.1.3.1.9.- Costo de Retirada y Eliminación (Capex)

Eliminación de elementos no reparables a lo largo del ciclo de vida, retirada del sistema o producto, reciclaje de material y requisitos aplicables del apoyo logístico. La estructura de desglose del costo relaciona los objetivos y actividades con los requisitos de recursos de organización. Constituye una subdivisión lógica del costo por área de actividad funcional, elementos importantes del sistema, y/o una o más de las clases discretas de elementos comunes o semejantes. La CBS proporciona un medio para la asignación inicial de recursos, la vigilancia del costo y el control del costo.

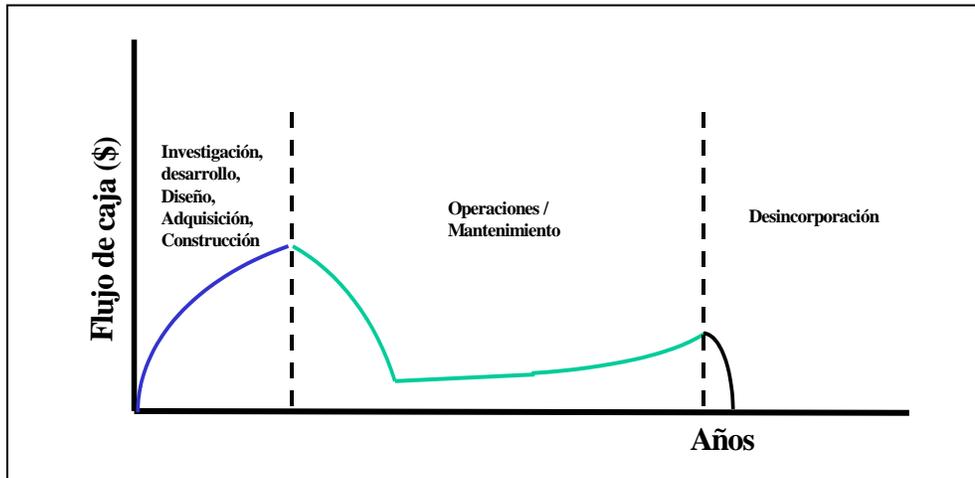


FIGURA II.7.- Desglose o Descomposición del Costo

II.1.3.2.- TRATAMIENTOS DE LOS COSTOS A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA

Una vez definida la estructura de desglose del costo del sistema, y establecidos los métodos de estimación del costo, corresponde aplicar los datos resultantes al ciclo de vida del sistema. Para realizarlo, el analista debe comprender los pasos necesarios para desarrollar perfiles de costos que incluyan los aspectos de inflación, los efectos de las curvas de aprendizaje, el valor futuro del dinero y otros aspectos.

Existe una variedad de procedimientos que pueden usarse para desarrollar un perfil de costos. Sin embargo, los siguientes pasos son esenciales:

- Identificar todas las actividades que a lo largo del ciclo de vida generarán costos de un tipo u otro. Esto incluye funciones asociadas con la planificación, investigación y desarrollo, prueba y evaluación, producción o construcción, distribución del producto, uso operativo del sistema o producto, mantenimiento y apoyo logístico, etc.
- Relacionar cada actividad identificada anteriormente con una categoría específica de costo dentro de la estructura de desglose del costo. Todas las actividades del programa deben estar en una o más categorías de la CBS.

- Establecer para cada actividad de la CBS los factores apropiados del costo en valores constantes de la moneda (por ejemplo \$ - 1999) donde el valor constante refleja el poder adquisitivo general de la moneda en el momento de la decisión (esto es, hoy). Los costos relacionados, expresados en términos de monedas constantes, permitirán una comparación directa de los niveles de actividad de año en año, antes de la introducción de factores inflacionarios del costo, cambios en los niveles de precios, efectos económicos de acuerdos contractuales con los proveedores, etc., que a menudo pueden causar alguna confusión durante la evaluación de alternativas.
- Proyectar al futuro los elementos individuales del costo dentro de cada categoría del costo de la CBS, año a año a lo largo del ciclo de vida, según corresponda. El resultado debe ser un flujo de costos en monedas constantes para las actividades que se incluyan.
- Introducir los factores inflacionarios apropiados, los efectos económicos de las curvas de aprendizaje, los cambios en los niveles de precios, etc. para cada categoría de costos de la CBS y para cada año aplicable del ciclo de vida. Los valores modificados constituyen un nuevo flujo de costos y reflejan los costos realistas tal como se anticipan para cada año del ciclo de vida (esto es, los costos esperados de 1998 en 1998, los costos de 1999 en 1999, etc.). Estos costos pueden utilizarse directamente para la preparación de las necesidades presupuestarias futuras, ya que reflejan las necesidades monetarias reales, anticipadas para cada año durante el ciclo de vida.
- Resumir los flujos individuales de costos por categorías principales de la CBS y desarrollar un perfil de costos a nivel superior.

Los resultados de la secuencia de pasos anteriormente mencionada se presentan en la figura II.8. El perfil representa una estimación presupuestaria de las necesidades futuras de recursos para cada fase del ciclo de vida. Es posible, y a menudo beneficioso, evaluar el flujo a lo largo del ciclo de vida del costo de actividades individuales tales como investigación y desarrollo, producción, operación y apoyo, etc. En segundo lugar, estos flujos de costos individuales pueden acumularse para desarrollarse el perfil de costo total. Finalmente, el perfil de costo total puede ser observado desde el punto de vista del flujo lógico de actividades y del nivel adecuado y oportuno del gasto de dinero.

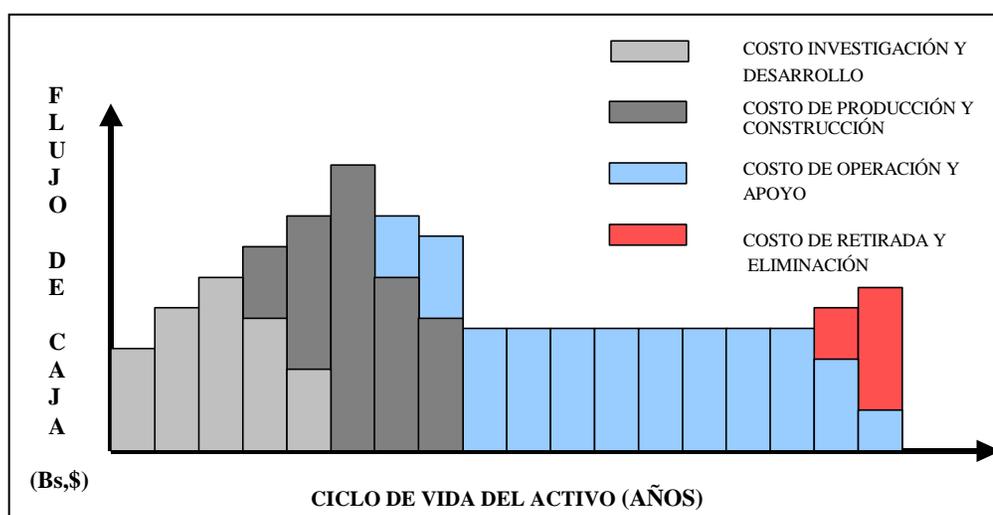


FIGURA II.8.- Perfil de Costos

II.1.3.3.- TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DEL CICLO DE VIDA

La aplicación de los conceptos y métodos del cálculo del costo del ciclo de vida durante el diseño y desarrollo del activo, se hace mediante la realización del análisis del costo del ciclo de vida (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA). El análisis del costo del ciclo de vida puede definirse como un proceso analítico sistemático de evaluación de distintos diseños (o vías alternativas de acción) con el objetivo de escoger la mejor forma de emplear recursos escasos. Para lograrlo se exige la aplicación de varios conceptos básicos y metodologías de evaluación.

El gestor puede tener que considerar muchas cuestiones. Puede haber un único objetivo global del análisis (por ejemplo, diseño con el mínimo costo del ciclo de vida) y

cualquier número de sub-objetivos. Pero la pregunta principal debe ser siempre: ¿cuál es la finalidad del análisis del costo, y qué debe averiguarse mediante el trabajo de análisis y de evaluación?

En muchos casos, la naturaleza del problema parece ser obvia, mientras que su precisa definición puede ser la parte más difícil de todo el proceso. El problema del diseño debe definirse clara y precisamente, y presentarse de tal manera que lo puedan comprender fácilmente todos los implicados. De otra manera, es dudoso que tenga sentido cualquier tipo de análisis. El analista debe tener cuidado para asegurar que se establecen objetivos realistas al principio del proceso, y de que estos objetivos permanecen a la vista según se desarrolla el proceso. Cuando existe una solución alternativa factible para un problema específico y se necesita una decisión para la selección de la solución preferible, debe seguirse un proceso de análisis formal. El analista debe definir específicamente la necesidad del análisis, establecer el método a seguir, generar la información apropiada de cada alternativa considerada, evaluar cada alternativa y recomendar una solución propuesta que responda al problema.

Después de la definición del problema y de sus objetivos, el análisis del costo debe definir las líneas maestras y las restricciones (o limitaciones) dentro de las que debe completarse. Las primeras se establecen a partir de la información relativa a factores tales como los recursos disponibles para llevar a cabo el análisis (por ejemplo, la experiencia laboral necesaria, la disponibilidad del «software» adecuado, etc.), el programa de calendario para la realización del análisis y/o la política o dirección de gestión correspondientes, en lo que puedan afectar al análisis.

En algunas ocasiones, el gestor puede que no comprenda completamente el problema o el proceso del análisis, y ordene que se realicen ciertas tareas de una forma, o en un intervalo de tiempo que no sea compatible con los objetivos del análisis. En otras ocasiones, un gestor puede tener una idea preconcebida sobre la consecuencia de una determinada decisión e imponer que el análisis apoye esa decisión. Además, pueden existir factores externos restrictivos que condicionen la validez del análisis. En tales casos, el analista de costos debe esforzarse en aliviar el problema enseñando al gestor. Si queda

algún problema sin resolver, el analista de costos debe documentarlo y relacionar sus efectos con los resultados del análisis.

Con referencia a las características técnicas de un sistema o producto, el resultado del análisis puede verse restringido por condiciones de contorno (o límites) establecidas por la definición de los factores de prestaciones del sistema, de los requisitos operativos o del concepto de mantenimiento así como de la planificación del programa. Por ejemplo, puede existir un requisito de peso máximo para un producto dado, un requisito de mínima fiabilidad, admitirse un valor máximo para el costo unitario de producción, un valor mínimo para la capacidad nominal, etc. Estas condiciones de contorno o limitaciones, deben determinar soluciones de compromiso al evaluar alternativas. Los candidatos que caigan fuera de esas limitaciones no son admisibles.

Dentro de las limitaciones establecidas puede haber una gran cantidad de métodos que conduzcan a una posible solución de diseño. Deben considerarse todas las alternativas factibles, seleccionando los candidatos más probables para una posterior evaluación. Deben proponerse alternativas para su análisis, incluso aunque parezca que exista poca probabilidad de que lleguen a ser factibles. Esto hay que realizarlo con la idea de que es mejor considerar demasiadas alternativas que pasar por alto una que pueda ser muy buena. Las alternativas no consideradas no podrán llegar a adoptarse, por muy deseables que demuestren después parecer.

II.1.3.4.- MÉTODO DE EVALUACIÓN DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA DENOMINADO COSTO ANUAL EQUIVALENTE (AELCC)

Para la construcción del programa LCC se utilizó el método del costo anual equivalente, el cual, representa una forma matemática de relacionar las acciones de diseño con los resultados operativos. Este método utiliza la función de evaluación de diseño, las cuales fueron extraídas del texto: **“Life Cycle Costing and Economic Analysis”, Fabrycky. W.J & B.S. Blanchard, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliff, New Jersey. 1991).**

$$E = f (X; Y_d, Y_i) \quad (\text{Ec. 1})$$

E: Una medida de evaluación completa del ciclo de vida (normalmente el costo equivalente del ciclo de vida)

X: Variables de diseño (por ejemplo, número de unidades desplegadas, edad de retirada, canales de reparación, empuje nominal, grosor del blindaje, etc.)

Y_d: Parámetros dependientes del diseño (por ejemplo, peso, capacidad, fiabilidad, vida de diseño, productividad, mantenibilidad, etc.)

Y_i: Parámetros independientes del diseño (por ejemplo, costo de la energía, precio del dinero, tasas de producción, costo unitario del material, penalización por eventos inesperados, etc.)

Esta función de evaluación del diseño, junto con sus parámetros dependientes e independientes, facilita la optimización del diseño. Esta metodología, suministra la base para definir de forma cuantitativa la diferencia entre diversas alternativas de optimización. Mediante el uso de la ecuación (1) puede deducirse una función de evaluación del diseño de un sistema. Esta función consolida el costo anual equivalente del ciclo de vida como la medida de evaluación expresada por:

$$\mathbf{AELCC(n) = PC(n) + OC(n) + RC(n) + SC-mf(n) + Sc-e(n)} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

n: año de evaluación $n > 0$

AELCC: Costo anual equivalente del ciclo de vida para el año n.

PC: Costo anual equivalente de la población de equipos.

OC: Costo operativo anual.

RC: Costo anual de mantenimiento mayor de las instalaciones (reparaciones especiales).

SC-mf: Costo anual de penalización/modos de fallas.

SC-e: Costo anual de penalización/pérdida de eficiencia.

A continuación se presenta un análisis detallado de las diversas categorías mencionadas anteriormente:

II.1.3.4.1.- Costo Anual Equivalente de la Población (PC)

El costo anual equivalente del despliegue de una población de N unidades de equipo es:

$$\mathbf{PC = Ci N} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

$$\mathbf{Ci = P(A/P, i, n) - B(A/F, i, n)} \quad (\text{Ec. 4})$$

Ci : Costo unitario anual equivalente.

N : Número de unidades de la población.

P : Capital inicial.

A : Una sola anualidad en una serie de anualidades iguales.

F : Un capital futuro.

N : Año de evaluación, $n > 0$

i : Tipo de interés anual.

Dado un capital actual calcular, una anualidad (A):

$$\mathbf{A = (A/P, i, n) ;}$$

$$A = P \left[\frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right] \quad (\text{Ec. 5})$$

Dado un capital futuro calcular una anualidad (A)

$A = (A/F, i, n)$;

$$A = F \left[\frac{i}{(1 + i)^n - 1} \right] \quad (\text{Ec. 6})$$

El valor contable B en la ecuación (7) se usa para representar el valor original de una unidad, menos la depreciación acumulada en cualquier momento del tiempo. La depreciación de una unidad a lo largo de su vida, establecida mediante el método de la línea recta, se expresa de la siguiente forma:

$$B = P - n \left[\frac{P - F}{L} \right] \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

P : costo unitario inicial o de obtención.

F : valor residual unitario estimado – en algunos casos se estima como “0”.

B : valor unitario contable al final del año n.

L : vida estimada de cada unidad - diseño.

n : año de evaluación, $n > 0$.

i : tipo de interés anual.

II.1.3.4.2.- Costo Operativo Anual (OC)

El costo anual de operación de una población de N unidades desplegadas es:

$$\mathbf{OC = (EC + LC + PMC + otros) N} \quad (\text{Ec. 8})$$

donde:

EC: costo anual de la energía consumida.

LC: costo anual de la mano de obra en la operación.

PMC: costo anual del mantenimiento preventivo.

Pueden surgir otros costos operativos anuales, que incluyen todos los costos anuales recurrentes para mantener en servicio los equipos, como el costo de almacenamiento, las primas de seguros y los impuestos.

II.1.3.4.3.- Costo Anual de Mantenimiento Mayor - Reparaciones Especiales (RC)

El costo anual de disposición de una instalación de reparación mayor para los equipos es:

$$\mathbf{RC = Cr} \quad (\text{Ec. 9})$$

donde:

Cr: costo anualizado por actividad de reparación mayor.

Si hay varias actividades de reparación para componentes con diferentes vidas estimadas, Cr es la suma de sus costos anuales. Algunos de los elementos de costo de las instalaciones de reparación que pueden incluirse son: el costo del edificio, mantenimientos especiales, los suministros para el mantenimiento, los equipos de pruebas, etc., expresados

para cada actividad. Los costos administrativos, de mano de obra de mantenimiento y otros costos indirectos se calculan por año y por actividad – en algunas oportunidades estos costos pueden ser incluidos dentro de los costos de mantenimiento preventivo.

II.1.3.4.4.- Costo Anual de Penalización / Modos de Falla (\$/año) (SC-mf)

Se refiere a los costos provocados por los eventos inesperados que causan impactos operacionales (económicos) en los sistemas de producción. Cuando el número de equipos en estado defectuoso causa una caída de la fracción de la producción por debajo de la demanda, se incurre en un costo de insatisfacción (penalización). El costo total anualizado de penalización es la sumatoria del producto entre el costo de penalización por año (paros de plantas, diferimiento de producción, productos deteriorados, baja calidad, retrabajo) por el número de eventos de fallas inesperadas, y viene expresado como:

$$Sc = \sum_{i=1}^m (F(n) \times Pe) \quad (\text{Ec. 10})$$

donde:

F: frecuencia de ocurrencia de cada modo de falla para el año n.

Pe: Costos de penalización por evento (\$/evento)

m: número de modos de fallas que ocurren al año.

Una manera sencilla de obtener la frecuencia de ocurrencia de un modo de falla es a través de la conocida curva de la bañera, pero la misma trae consigo un alto grado de incertidumbre ya que este es un comportamiento ideal de un modo de falla que en muchas ocasiones no se asemeja a la realidad. Por esto mas adelante en el mismo contenido teórico se explicarán otros métodos estadísticos por medio del cual se pueden obtener las

frecuencias de falla, ya sea basándonos en una data histórica del mismo o asignándole distribuciones de confiabilidad y mantenibilidad al activo siendo esto último posible si se conoce la tendencia del comportamiento del mismo; así mismo se explicarán otros métodos convenientes a situaciones en específico, dependiendo de la información que se disponga del activo.

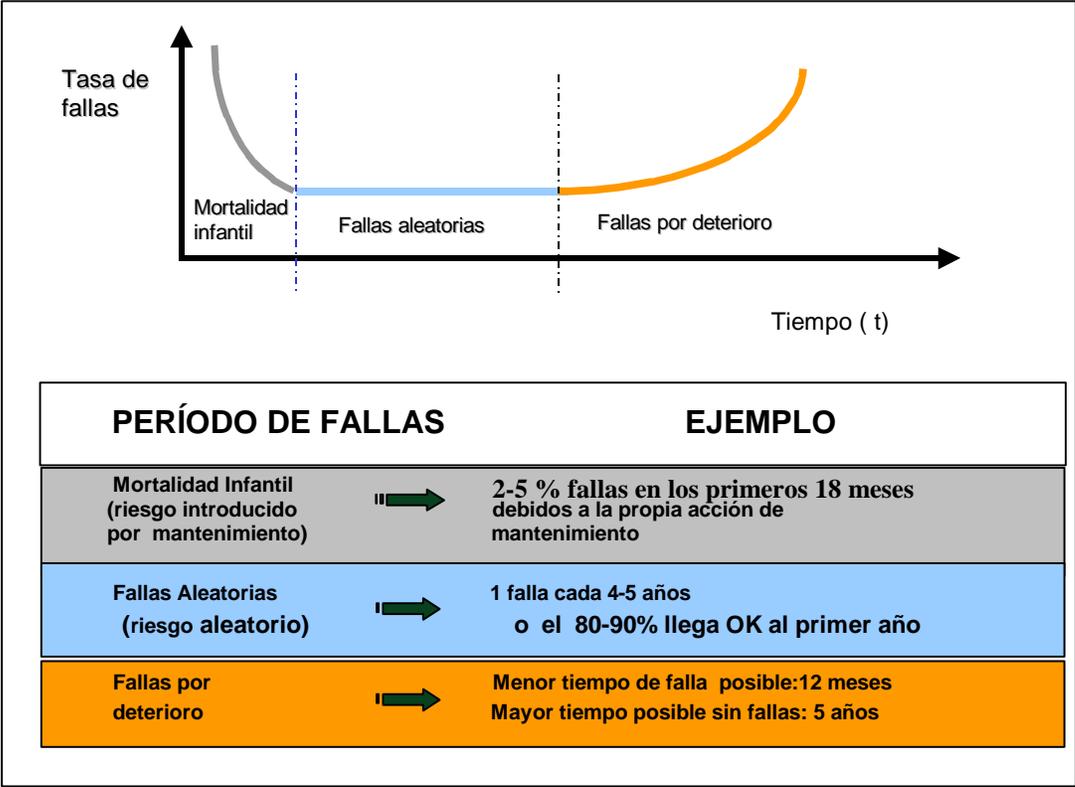


FIGURA II.9.- Tendencia del Comportamiento en las Diversas Zonas de la Curva de la Bañera.

El proceso de cuantificación de las penalizaciones debe abarcar todos los potenciales eventos de falla que puedan ocurrir dentro del contexto operacional. A continuación se presentan los posibles costos de penalización causados por la aparición de eventos imprevistos (modos de fallas):

- **Labor:** Costos directos relacionados con la mano de obra (propia o contratada) en caso de una acción no planificada.

- **Materiales y repuestos:** Costos directos relacionados con los consumibles y los repuestos utilizados en caso de una acción no planificada.
- **Downtime:** Indisponibilidad, pérdidas de oportunidad, costos de penalización (operacionales, seguridad y ambiente), y/o costos por indisponibilidad generados por la aparición de un modo de falla imprevisto (evento no programado).

II.1.3.4.5.- Costo Anual de Penalización/Pérdida de Eficiencia (\$/año) (SC-e)

Se refiere a los costos de penalización causados por la pérdida de eficiencia del activo. Este costo se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\mathbf{SC-e = Ip \times TPE} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

Ip: Impacto en producción (escenario de perder en un 100% la eficiencia, \$/año).

TPE: Tasa promedio de pérdida de eficiencia en el período de evaluación, definido en nuestro caso por un año.

II.2.- ANÁLISIS DETALLADO DEL COMPORTAMIENTO ALEATORIO DE LOS DIVERSOS MODOS DE FALLA PRESENTES EN UN ACTIVO

El criterio utilizado para la elaboración del programa de costos de ciclo de vida “VICON” en cuanto a los modos aleatorios de falla se basa de manera general en la existencia de dos tipos de sistemas, los cuales son llamados sistemas reparables y no reparables.

A continuación, el siguiente material presenta todo un análisis detallado de las diversas formas y criterios que existen para modelar con el menor grado de incertidumbre posible el comportamiento de los mismos a lo largo de su ciclo de vida.

Un sistema reparabile es un sistema que, cuando ocurre la falla, puede restaurarse y llegar a una condición de operar pero por algún proceso de la reparación de otra manera que si se efectuara un reemplazo del sistema entero. Por ejemplo, un automóvil es un sistema reparabile porque la mayoría de las fallas pueden arreglarse sin reemplazar el automóvil entero. La falla se presenta de manera aislada y no involucra reemplazo de cualquier otra parte. Por ejemplo, el automóvil puede fallar al arrancar debido a una mala conexión con la batería, en este caso limpiar y revisar las conexiones puede solucionar el problema. Un bombillo, por otro lado, es considerado un sistema no reparabile. La única manera de reparar un bombillo quemado es reemplazando el mismo; es decir, reemplazar el sistema entero.

Un sistema no reparabile es aquel que queda descartado después de producirse la falla. Por ejemplo, un bombillo es un sistema no reparabile. El elemento calorífico en un secador de ropa también es un sistema no reparabile. Hoy en día, con los procesos de producción automatizados que producen productos económicos, muchos que previamente se reparaban después de su falla, están ahora descartados una vez que se producen. Considere un pequeño ventilador de mesa que puede comprarse por menos de \$10 en alguna tienda donde venden este tipo de artículos por ejemplo. Cuando un equipo como este falla, lo desecharíamos probablemente y compraríamos otro, porque el costo para arreglarlo es mayor que el costo para comprar uno nuevo. Muchos sistemas eléctricos son ahora considerados productos no reparables, debido a que son más costosas sus reparaciones que su reemplazo. ¿Usted ha tenido una calculadora de bolsillo alguna vez reparada?

II.2.1.- SISTEMAS NO REPARABLES:

En esta sección discutiremos las semejanzas y diferencias entre sistemas reparables y no reparables. Hay muchas condiciones y conceptos que son similares, y las distinciones son difíciles de percibir.

Para un sistema no reparabile, el tiempo de vida es una variable aleatoria, no se efectúan reparaciones y el sistema es rechazado y reemplazado luego de su única falla. Cuando la falla de un sistema no afecta el comportamiento de otro sistema similar

localizado a su alrededor, podemos decir que estos sistemas tienen tiempos de vida independientes. También, si muchas copias de los sistemas fueran producidas por el mismo sistema industrial, entonces es razonable asumir que la vida de los sistemas tienen la misma distribución. Estas dos suposiciones pueden combinarse en una declaración que dice que los tiempos de vidas son independientes e idénticamente distribuidos (iid) con una función (cdf) $F(X)$.

Definición 1.- Función Distribución Acumulada

La función distribución acumulada (cdf) de una variable aleatoria X esta definida por la función:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (\text{Ec. 12})$$

Ya que el tiempo de vida no puede ser negativo la distribución de probabilidad sólo debe tener valores positivos, en otras palabras, $F(x) = 0$ para $x < 0$.

Definición 2.- Función de Supervivencia

La función de supervivencia $S(x)$, también llamada función de confiabilidad, es la probabilidad de que un sistema llevará a cabo su misión a través de un tiempo (x).

La función de supervivencia evaluada en un tiempo (x) es justamente la probabilidad de que la falla se presente mas allá del tiempo (x). Así la función de confiabilidad esta relacionada con la función distribución acumulada de la siguiente manera:

$$S(x) = P(X > x) = 1 - P(X \leq x) = 1 - F(x) \quad (\text{Ec. 13})$$

Definición 3.- Función Densidad de Probabilidad

La función densidad de probabilidad (pdf) está definida como la derivada de la función distribución acumulada:

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x) \quad (\text{Ec. 14})$$

De la ecuación (3) podemos ver que:

$$f(x) = -\frac{d}{dx}S(x) \quad (\text{Ec. 15})$$

Otra manera de expresar el pdf es por medio del límite

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < X \leq x + \Delta x)}{\Delta x} \quad (\text{Ec. 16})$$

Esta por supuesto viene de la definición de la derivada de F(x)

Otra función importante relacionada pero diferente de la (pdf) es la función riesgo de la cual hablaremos a continuación.

Definición 4. Función Riesgo

La función riesgo es:

$$h(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < X \leq x + \Delta x \mid X > x)}{\Delta x} \quad (\text{Ec. 17})$$

Esta es el límite de la probabilidad para que una unidad falle (para el primero y único instante de tiempo) en un intervalo pequeño dado que halla sobrevivido al principio del intervalo. Comparando la definición de la función riesgo h(x) en la ecuación (17) con el resultado de la función densidad de probabilidad dada en la ecuación (16) podemos ver que son casi iguales, a diferencia que una es una probabilidad condicional y la otra no lo es.

Una propiedad de las funciones densidad de probabilidad, es que la integral de la misma evaluada desde cero hasta el infinito debe ser igual a uno.

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (\text{Ec. 18})$$

El riesgo es definido como el límite de una probabilidad condicional, pero no es una función probabilidad de densidad condicional. La función de riesgo no necesariamente integra a uno, y de hecho, para la mayoría de las distribuciones que estudiaremos el riesgo

no integra a uno. Para un sistema cuya función de riesgo se está incrementando, esto significa que la probabilidad de falla en un intervalo pequeño dividido por la longitud del mismo está aumentando con el tiempo. Así si nosotros tomamos una longitud fija pequeña de tiempo, como una hora por ejemplo, un riesgo creciente significaría que la probabilidad de fallar en esta hora, dado que el sistema ha sobrevivido anteriormente, aumentara con la edad del sistema. En este caso se dice que el sistema se encuentra en un periodo de envejecimiento. Compare esta definición con la de deterioro para sistemas reparables. Un sistema reparable de deterioro se da cuando sus tiempos entre fallas es cada vez mas pequeño, y un sistema no reparable esta envejeciendo si la función de riesgo está aumentando. Un sistema no reparable con función de riesgo decreciente se dice que experimenta un mejoramiento de su condición de trabajo.

Definición 5. *Función Riesgo Acumulada*

La función:

$$H(t) = \int_0^t h(x)dx \quad (\text{Ec. 19})$$

es llamada la función riesgo acumulada.

Las próximas secciones muestran algunas de las distribuciones normalmente usadas para tiempos de vida como la exponencial, Weibull y Gamma.

II.2.1.1.- DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL

El modelo más simple para modelar tiempos de vida es la distribución exponencial.

Definición 6.- *Distribución Exponencial*

La distribución exponencial es una distribución continua y se tiene que su pdf es:

$$f(x) = \frac{1}{\theta} \exp\left(-x/\theta\right), x > 0 \quad (\text{Ec. 20})$$

y su función de densidad acumulada (cdf) es:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right) dx = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right), x > 0 \quad (\text{Ec. 21})$$

Se escribe $X \sim \exp(\theta)$ para indicar que la variable aleatoria X tiene una distribución exponencial con una función de densidad acumulada dada por la ecuación (21).

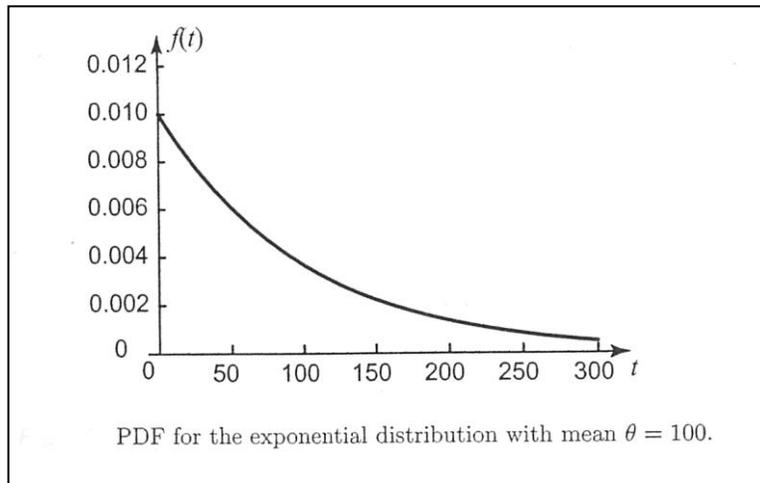


FIGURA II.10.- Gráfico de Función Densidad de Probabilidad para la distribución exponencial con media $\theta = 100$.

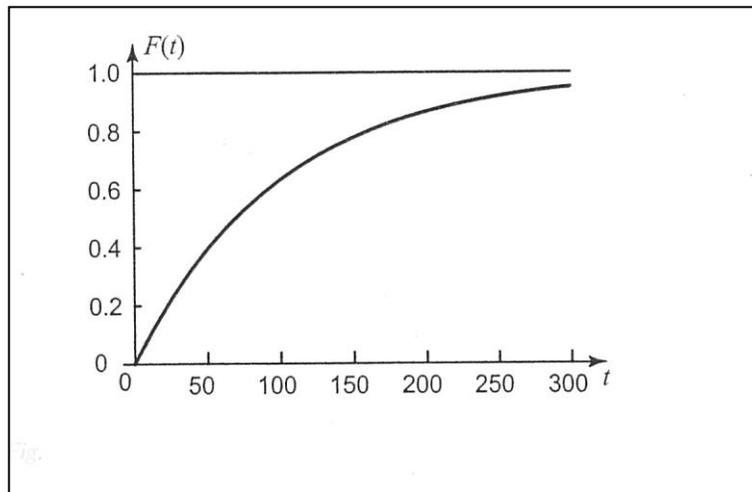


FIGURA II.11.- Gráfico de Función Distribución Acumulada para la distribución exponencial con media $\theta = 100$.

La figura II.10 y figura II.11 muestran los gráficos de las funciones pdf y cdf para el caso donde $\theta = 100$.

II.2.1.2.- DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

Esta distribución se analizará para varios casos. En primer lugar, probablemente es la distribución mas ampliamente usada para analizar los tiempos de vidas. Luego cuando se estudien los sistemas reparables, será instructivo para comparar modelos de sistemas reparables y sistemas no reparables. Segundo, la distribución de Weibull está relacionada a procesos que obedecen la ley de potencia, el cual es un modelo usualmente usado para sistemas reparables. Tercero, si la reparación deja al sistema tan bueno como nuevo, entonces es valido decir que los tiempos entre falla X_1, X_2, \dots son variables aleatorias IID bajo una distribución de Weibull.

Definición 7.- Distribución Weibull

La función de supervivencia de Weibull es:

$$S(x) = \text{EXP} \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\eta \right], x > 0 \quad (\text{Ec. 22})$$

Si X es una variable aleatoria con esta cdf, entonces escribiremos $X \sim \text{WEI}(\eta, \alpha)$.

La cdf, pdf y función riesgo por consiguiente son dadas por las siguientes funciones:

$$F(x) = 1 - S(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\eta \right], x > 0 \quad (\text{Ec. 23})$$

$$f(x) = F'(x) = \frac{\eta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\eta-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\eta \right], x > 0 \quad (\text{Ec. 24})$$

$$h(x) = \frac{f(x)}{S(x)} = \frac{\frac{\eta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\eta\right]}{\exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\eta\right]} = \frac{\eta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\eta-1}, x > 0 \quad (\text{Ec. 25})$$

La función riesgo h es creciente cuando $\eta > 1$ y decreciente cuando $\eta < 1$. Cuando $\eta = 1$, la función riesgo es una función constante $h(x) = 1/\alpha$. Así, la distribución exponencial es un caso especial de la distribución de Weibull que se da cuando $\eta = 1$.

La figura II.12 muestra la función riesgo y sus correspondientes pdf y cdf.

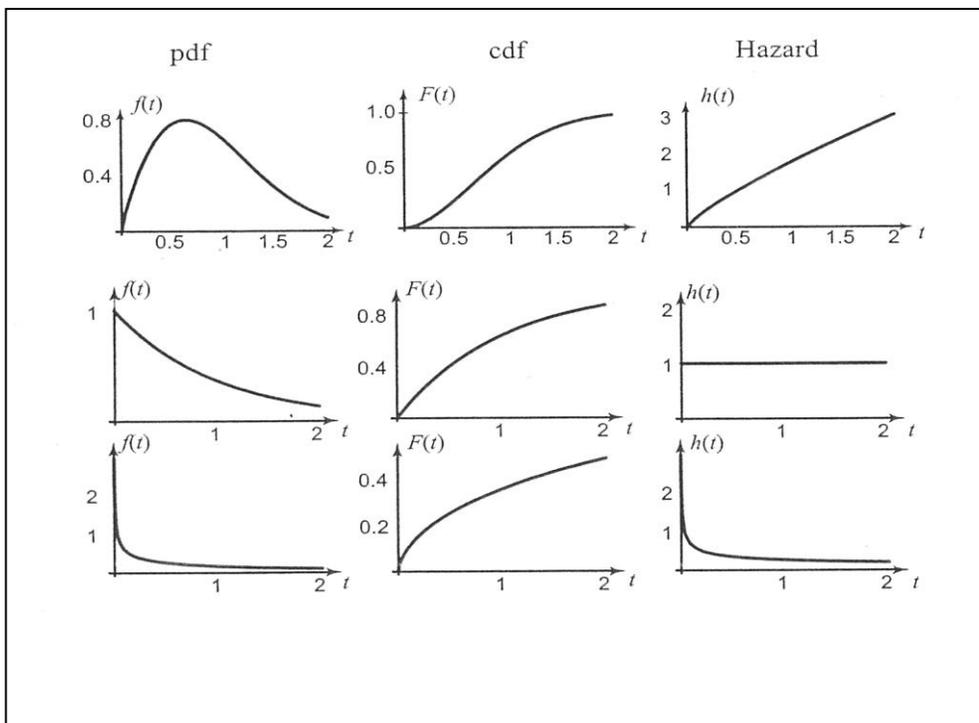


FIGURA II.12.- Función Densidad de Probabilidad, Función Distribución Acumulada y Función Riesgo de Weibull para $\beta = 1.8$ (gráficas superiores), $\beta = 1$ (gráficas medias) y $\beta = 0.6$ (gráficas inferiores)

Definición 8.- Función Gamma

Para $a > 0$ la función Gamma esta definida por:

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx \quad (\text{Ec. 26})$$

Si $a > 0$, entonces podemos aplicar la integración por partes. Diciendo que $u = x^{a-1}$ y $dv = e^{-x} dx$, entonces $du = (a-1)x^{a-2} dx$ y $v = -e^{-x}$ y el limite de la integral permanece igual.

Entonces:

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx$$

$$\Gamma(a) = \left[-x^{a-1} e^{-x} \right]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} (-e^{-x})(a-1)x^{a-2} dx$$

$$\Gamma(a) = 0 + (a-1) \int_0^{\infty} x^{a-2} e^{-x} dx \quad \Gamma(a) = (a-1)\Gamma(a-1)$$

por consiguiente $\Gamma(1) = 1$, y tenemos:

$$\Gamma(2) = (2-1)\Gamma(2-1) = 1$$

$$\Gamma(3) = (3-1)\Gamma(3-1) = 2\Gamma(2) = 2$$

$$\Gamma(4) = (4-1)\Gamma(4-1) = 3\Gamma(3) = 3 \times 2 = 6$$

$$\Gamma(5) = (5-1)\Gamma(5-1) = 4\Gamma(4) = 4 \times 3 \times 2 = 24$$

Y en general $\Gamma(a) = (a-1)!$

II.2.1.3.- DISTRIBUCIÓN GAMMA

La distribución Gamma es usada como un modelo para los tiempos de vida de sistemas no reparables y tiene una conexión directa con los procesos de Poisson.

Definición 9.-

La pdf para la distribución gamma puede ser escrita de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{x^{k-1}}{\theta^k \Gamma(k)} \exp\left(-x/\theta\right), x > 0 \quad (\text{Ec. 27})$$

Escribiremos $X \sim \text{GAM}(K, \theta)$ si la variable aleatoria X tiene esta pdf. Otra forma útil para la pdf gamma se obtiene sustituyendo $1/\lambda$ por θ ; y se obtiene:

$$f(x) = \frac{\lambda^k x^{k-1}}{\Gamma(k)} \exp(-\lambda x), x > 0 \quad (\text{Ec. 28})$$

La cdf, la función de sobrevivencia y la función riesgo no pueden ser escritas en forma cerrada. La cdf se puede escribir de la siguiente manera:

$$F(x) = \int_0^x \frac{\lambda^k \omega^{k-1}}{\Gamma(k)} \exp(-\lambda \omega) d\omega \quad (\text{Ec. 29})$$

Si tomamos la transformación $y = \lambda \omega$ entonces se puede escribir de la siguiente manera:

$$F(x) = \int_0^{\lambda x} \frac{\lambda^k \left(\frac{y}{\lambda}\right)^{k-1}}{\Gamma(k)} e^{-y} \frac{1}{\lambda} dy$$

$$F(x) = \frac{\lambda^k}{\lambda^{k-1} \Gamma(k)} \frac{1}{y} \int_0^{\lambda x} y^{k-1} e^{-y} dy$$

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(k)} \int_0^{\lambda x} y^{k-1} e^{-y} dy \quad (\text{Ec. 30})$$

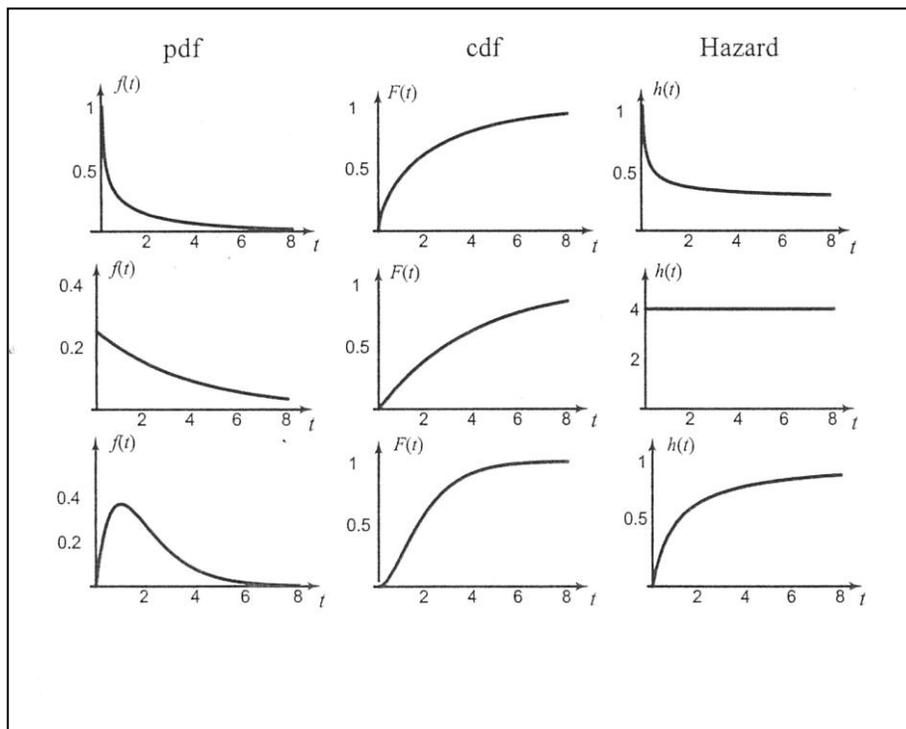


FIGURA II.13.- Función Densidad de Probabilidad, Función Distribución Acumulada y Función Riesgo de Gamma para $k = 0.6$ (gráficas superiores), $k = 1$ (gráficas medias) y $k = 2$ (gráficas inferiores)

II.2.2.- TEORÍA BÁSICA DE LO PROCESOS PUNTUALES

Un proceso puntual es un modelo estocástico que describe la ocurrencia de eventos en el tiempo. Este evento tiene una ocurrencia en un punto en el eje del tiempo. En general, los tiempos entre ocurrencia no son ni independientes ni idénticamente distribuidos. Para nuestro propósito, esta ocurrencia en el tiempo serán los tiempos de falla de un sistema reparable.

Definición 10.- Variable Aleatoria de numero de fallas

$N(t)$ es una variable aleatoria que denota el número de fallas en el intervalo $[0,t]$. Cuando N tiene como argumento un intervalo, como $N(a,b]$, el resultado es el número de fallas en ese intervalo y N es llamada variable aleatoria de numero de fallas.

Podemos escribir el numero de fallas en el intervalo $(a,b]$ como:

$$N(a,b] = N(b) - N(a) \quad (\text{Ec. 31})$$

Para especificar el modelo estocástico para un proceso puntual, debemos dar la distribución de las variables aleatorias $N(t_1)$, $N(t_2)$, ..., $N(t_n)$ para cualquier n y para cualquier t_1, t_2, \dots, t_n .

Definición 11. Función Media de un Proceso Puntual

La función media de un proceso puntual está definida por la siguiente expresión:

$$\Lambda(t) = E(N(t)) \quad (\text{Ec. 32})$$

Así, $\Lambda(t)$ es el numero esperado de fallas a través del tiempo t , y debe ser una función no decreciente. Ya que $N(t)$ no es una función decreciente (con probabilidad 1), esta claro que la función media no debe ser decreciente. Si se dan fallas simultaneas, entonces Λ no será continua sino será continua a la derecha.

Definición 12.- Rata de Ocurrencia de Fallas (ROCOF)

Cuando Λ es diferenciable definimos la rata de ocurrencia de fallas como:

$$\mu(t) = \frac{d}{dt} \Lambda(t) \quad (\text{Ec. 33})$$

El ROCOF puede ser interpretado como la rata instantánea de cambio en el número de fallas esperado.

Para ver que ocurre cuando la función media Λ es discontinua, supongamos que un proceso puntual tiene función media:

$$\Lambda(t) = et, \quad 0 \leq t \leq 3 \quad ; \Lambda(t) = 8 + (t-3)^2, \quad t \geq 3$$

entonces:

$$E(N(3-\varepsilon, 3]) = E(N(3) - N(3-\varepsilon))$$

$$E(N(3-\varepsilon, 3]) = E(N(3)) - E(N(3-\varepsilon))$$

$$E(N(3-\varepsilon, 3]) = \Lambda(3) - \Lambda(3-\varepsilon)$$

$$E(N(3-\varepsilon, 3]) = 8 - 2(3-\varepsilon) = 2 + 2\varepsilon$$

De esta manera, sin importar que tan pequeño sea ε , el número esperado de fallas en el intervalo $(3-\varepsilon, 3]$ siempre será mayor que 2, por lo tanto, la probabilidad de tener 2 ó más fallas para $t=3$ es estrictamente positiva.

Definición 13.- Función Intensidad de un Proceso Puntual

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t] \geq 1)}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 34})$$

De manera aproximada podemos decir que la función intensidad de un proceso puntual es la probabilidad de fallar en un pequeño intervalo dividido por la longitud del

mismo. Por lo tanto se presentarán muchas fallas sobre intervalos en los que $\lambda(t)$ sea grande, y menos fallas sobre intervalos en los que $\lambda(t)$ sea pequeño. Esto sirve para comparar la función riesgo (Definición 4) y la función intensidad (Definición 13). La función riesgo es el límite de una probabilidad condicional, mientras que la función intensidad no lo es. La función riesgo es la probabilidad condicional para que una y solamente una falla ocurra en un pequeño intervalo dividido por la distancia del mismo, esta probabilidad es condicionada a la supervivencia al principio del intervalo. La función intensidad es la probabilidad incondicional de una falla (no necesariamente la primera) en un pequeño intervalo dividido por la longitud del mismo.

Claramente, la función intensidad y el ROCOF son herramientas para medir la confiabilidad de sistemas reparables. Estas dos funciones son iguales siempre y cuando no ocurran fallas simultáneas. (Recuerde que fallas simultaneas solo pueden ocurrir para puntos en donde la función media $\Lambda(t)$ sea discontinua).

TEOREMA 1

Si $g_k(t)$ denota la densidad de T_k , el cual es el tiempo de la k-ésima falla, entonces la función ROCOF está definida como:

$$\mu(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k(t) \quad (\text{Ec. 35})$$

Demostración: Decimos que G_k denota la cdf de T_k , entonces:

$$P(N(t) \geq k) = P(T_k \leq t) = G_k(t) \quad \text{y}$$

$$P(N(t) \geq k+1) = P(T_{k+1} \leq t) = G_{k+1}(t)$$

por lo tanto:

$$P(N(t) = k) = P(N(t) \geq k) - P(N(t) \geq k+1) = G_k(t) - G_{k+1}(t)$$

y la función media Λ es:

$$\Lambda(t) = E(N(t))$$

$$\Lambda(t) = \sum_{k=0}^{\infty} kP(N(t)=k) = \sum_{k=0}^{\infty} k[G_k(t) - G_{k+1}(t)] = 1[G_1(t) - G_2(t)] + 2[G_2(t) - G_3(t)] + 3[G_3(t) - G_4(t)] + \dots$$

$$\Lambda(t) = \sum_{k=1}^{\infty} G_k(t)$$

Derivando a ambos lados con respecto a “t” tenemos:

$$\mu(t) = \Lambda'(t) = \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^{\infty} G_k(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d}{dt} G_k(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k(t)$$

Estos resultados sirven para demostrar que cuando no pueden ocurrir fallas simultaneas, la función intensidad y el ROCOF son iguales.

Definición 14.- Función Intensidad Completa

La función intensidad completa es:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t) \geq 1 \mid H_t)}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 36})$$

Algunos sistemas reparables tienen un ROCOF o función intensidad con una forma de bañera como se muestra en la figura II.15. Para pequeños valores de t que es cuando el sistema se encuentra joven, el ROCOF es alto y las fallas son frecuentes, luego los problemas son eliminados con el reemplazo de piezas defectuosas de fabrica y el ROCOF se hace más pequeño y permanecerá en este nivel a lo largo de su vida útil. Cuando el sistema comience su etapa de envejecimiento, el ROCOF comienza a incrementarse y se dice que el sistema se está deteriorando.

La figura II.14 y la figura II.15 pueden lucir idénticas, pero tienen diferentes interpretaciones. La función riesgo bañera indica que hay una alta probabilidad para que el sistema falle (para el primer y único tiempo). Esto puede ser debido a serios defectos que presentan algunos sistemas ocasionando esta llamada mortalidad infantil. Recuerde que la función riesgo es el límite de la probabilidad condicional. Para un sistema que está

desgastándose, la probabilidad de fallar en $(x_0, x_0 + \Delta x_0)$ condicionado a sobrevivir más allá del tiempo x_0 será mas pequeña que la probabilidad de fallar en $(x_1, x_1 + \Delta x_1)$ condicionada a sobrevivir mas allá del tiempo x_1 .

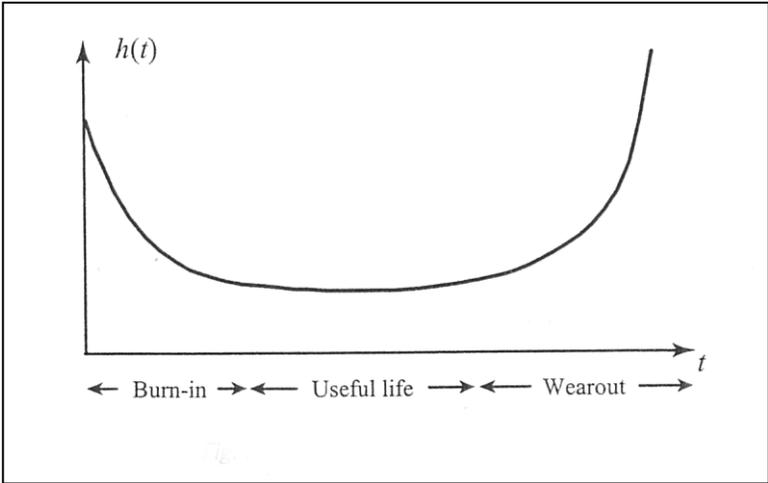


FIGURA II.14.- Curva de la Bañera (Función Riesgo).

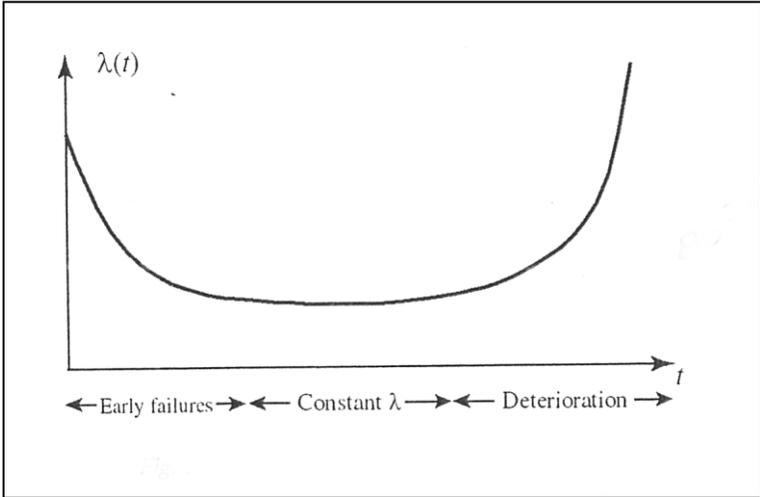


FIGURA II.15.- Función Intensidad en Forma de Bañera.

La función riesgo bañera expresa la probabilidad condicional de una única falla del sistema. La bañera ROCOF ó intensidad indica que el sistema experimentará muchas fallas tempranas en su ciclo de vida, para luego seguir por un tiempo donde el ROCOF es constante y finalmente cuando el sistema envejece las fallas se harán más frecuentes.

II.2.3.- APRECIACIÓN GLOBAL DE MODELOS

Un modelo probabilística o estadístico para un sistema reparable describe la ocurrencia de eventos en el tiempo. La suposición de tiempos independientes e idénticamente distribuidos entre fallas es usualmente invalido para sistemas reparables. La función intensidad o más específicamente la función intensidad completa juega un papel muy importante en la selección de modelos para sistemas reparables porque contiene información de la probabilidad de una falla alrededor de un tiempo t . La función intensidad completa también contiene información de cuando un sistema esta en su etapa de deterioro.

Definición 21.- *Proceso de deterioro*

Modelo matemático estadístico que asume que una ves reparada la maquina esta queda en la misma condición que cuando se reparó. La suposición de un sistema en deterioro conduce a un proceso no homogéneo de Poisson (NHPP). Este proceso será analizado próximamente y es un buen modelo para sistemas reparables porque se adapta muy bien a aquellos que se están deteriorando o todo lo contrario mejorando su condición.

Definición 15.- *Proceso de Renovación*

Modelo matemático estadístico que asume que una vez reparada la maquina esta queda en la misma condición que cuando estaba Nueva, y los tiempos entre el evento de falla son definidos por un tiempo de operación y un tiempo de mantenimiento. Este proceso igualmente será analizado próximamente.

II.2.4.- MODELOS PROBABILÍSTICOS (PROCESOS DE POISSON)

A continuación se presentarán algunas de las propiedades elementales de los procesos de Poisson. Se considerarán tanto los procesos no homogéneos de Poisson (NHPP) como los procesos homogéneos de Poisson (HPP).

II.2.4.1.- PROCESOS DE POISSON:

La distribución de Poisson es un modelo usado comúnmente para múltiples aplicaciones, es una distribución discreta en el rango de los enteros no negativos y juega un papel muy importante en el estudio de los procesos de Poisson, formando un grupo de modelos para sistemas reparables.

Definición 16.-

Una variable aleatoria X tiene una distribución de Poisson si esta es una variable aleatoria discreta que tiene una función densidad de probabilidad.

$$p(x) = P(X = x) = \frac{\Phi^x \exp(-\Phi)}{x!}, \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{Ec. 37})$$

Si X es una variable aleatoria discreta con su (pmf), podemos escribir $X \sim \text{POI}(\phi)$

Definición 17.- Proceso de Poisson

Un proceso continuo $N(t)$ es llamado un proceso de Poisson si:

1. $N(0) = 0$
2. Para cualquier $a < b \leq c < d$ las variables aleatorias $N(a, b]$ y $N(c, d]$ son independientes. Esto es llamado propiedad de incremento independiente.
3. Tenemos una función λ tal que:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t] = 1)}{\Delta t} \quad (\text{Ec. 38})$$

La función λ es llamada función intensidad de un proceso Poisson.

$$4. \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t] = 1)}{\Delta t} = 0 \quad (\text{Ec. 39})$$

La última propiedad evita la posibilidad de fallas simultáneas. Si al menos se cumple con estas suposiciones, es posible deducir que el número de fallas en un intervalo es una variable aleatoria que tiene una distribución de Poisson.

TEOREMA 2

Un proceso continuo $N(t)$ es considerado un proceso de Poisson si y solo si :

1. $N(t) = 0$
2. El proceso tiene propiedad de incrementarse en forma independiente
3. Para cualquier $a < b$, $N(a,b) \sim \text{POI}(\int_a^b \lambda(x) dx)$

Demostración:

Este teorema declara que bajo las cuatro condiciones de la definición 17, la variable aleatoria $N(a,b)$ tiene una distribución de Poisson con media igual a $\int_a^b \lambda(x) dx$, a continuación se procederá a demostrarlo. Las dos primeras propiedades de Poisson son idénticas a las dos primeras condiciones de este teorema, por lo tanto solo debemos demostrar que si $a < b$, la variable aleatoria $N(a,b)$ tiene una distribución de Poisson, entonces:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t) = 1)}{\Delta t} = \lambda(t) \quad y$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t) \geq 2)}{\Delta t} = 0$$

Consideremos el límite de $P(N(t, t + \Delta t) \geq 1) / \Delta t$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t) \geq 1)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} [1 - P(N(t, t + \Delta t) = 0)] = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda(x) dx\right)}{\Delta t}$$

Sustituyendo $\Delta t = 0$ se obtiene una indeterminación. Aplicando L'Hopital's se obtiene:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t] \geq 1)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{0 + \lambda(t + \Delta t) \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda(x) dx\right)}{1}$$

Usando este resultado decimos que el segundo límite es:

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t] \geq 2)}{\Delta t} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - P(N(t, t + \Delta t] = 0) - P(N(t, t + \Delta t] = 1)}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda(x) dx\right) - \left(\int_t^{t+\Delta t} \lambda(x) dx\right) \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda(x) dx\right)}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda(x) dx\right)}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left(\int_t^{t+\Delta t} \lambda(x) dx\right)}{\Delta t} \times \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda(x) dx\right) \\ &= \lambda(t) - \lambda(t) \exp(0) = 0 \end{aligned}$$

De esta manera:

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t] = 1)}{\Delta t} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{P(N(t, t + \Delta t] \geq 1)}{\Delta t} - \frac{P(N(t, t + \Delta t] \geq 2)}{\Delta t} \right] \\ &= \lambda(t) - 0 = \lambda(t) \end{aligned}$$

II.2.4.2.- PROCESOS HOMOGÉNEOS DE POISSON

Definición 18.- Procesos Homogéneos de Poisson

El proceso homogéneo de Poisson (HPP) es un proceso de Poisson con función intensidad constante. Este modelo es uno de los mas simples para sistemas reparables pero

debe ser aplicado con mucha precaución. Debido a que la función intensidad es constante, el HPP no puede ser utilizado para modelar sistemas que se encuentran en procesos de deterioro o mejorándose. Para este tipo de situaciones es recomendable utilizar otro modelo como procesos de Poisson con funciones de intensidad no constante. Por tal motivo los HPP se encuentran estrechamente vinculados con las distribuciones exponenciales.

II.2.4.3.- PROCESOS No Homogéneos de Poisson:

Definición 19.- *Procesos No Homogéneos de Poisson*

El proceso no homogéneo de Poisson (NHPP) es un proceso de Poisson cuya función intensidad no es constante.

Ejemplo: Suponga que un sistema reparable es modelado con un NHPP, cuya función intensidad es:

$$\lambda(t) = 0.02t^{0.8}$$

La función media es:

$$\Lambda(t) = \int_0^t 0.02x^{0.8} dx = \frac{1}{90}t^{1.8}$$

En la figura II.16 se pueden observar las funciones intensidad y media de este modelo NHPP

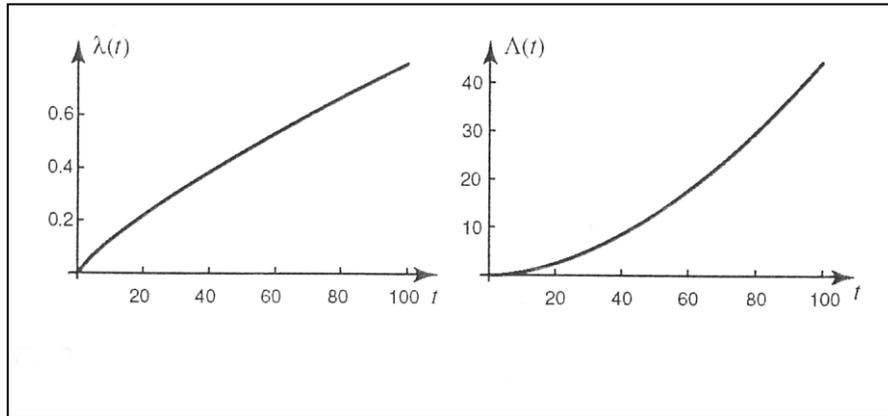


FIGURA II.16.- Función Intensidad y Función Media para un Proceso no Homogéneo de Poisson, con $\lambda(t) = 0,02t^{0,8}$

La distribución del numero de fallas en el intervalo $[a,b]$ tiene una distribución de Poisson con media:

$$\int_a^b 0.02t^{0.8} dx = \frac{b^{1.8} - a^{1.8}}{90}$$

El número esperado de fallas en el intervalo $[0,20]$, $[20,40]$, $[40,60]$ y $[60,80]$ es:

$$E(N[0,20]) = \frac{20^{1.8} - 0^{1.8}}{90} \approx 2.44$$

$$E(N[20,40]) = \frac{40^{1.8} - 20^{1.8}}{90} \approx 6.06$$

$$E(N[40,60]) = \frac{60^{1.8} - 40^{1.8}}{90} \approx 9.14$$

$$E(N[60,80]) = \frac{80^{1.8} - 60^{1.8}}{90} = 11.96$$

Ya que el numero de fallas en los intervalos de 20 horas se están incrementando, podemos decir que el sistema se está deteriorando.

Cuando la función intensidad tiene la forma $\lambda(t) = (\beta/\theta)(t/\theta)^{\beta-1}$, donde $\beta > 0$ y $\theta > 0$, es llamado Proceso con Ley de Potencia, modelo que no se analizará pero puede ser estudiado en [1].

II.2.5.- MODELOS PROBABILÍSTICOS (PROCESOS DE RENOVACIÓN)

Cuando se efectúa una reparación perfecta después de cada falla, el tiempo entre ellas debe ser idénticamente distribuido. Si agregamos el criterio de independencia tenemos un proceso renovable.

Definición 20.- Proceso Renovable: Si el tiempo entre fallas X_1, X_2, \dots es independiente e idénticamente distribuido.

Los tiempos entre falla se denotan por:

$$T_1 = X_1$$

$$T_2 = X_1 + X_2$$

$$T_3 = X_1 + X_2 + X_3$$

La función intensidad completa, $\lambda(t) = \lim P(N(t, t+\Delta t) \geq 1 \mid H_t) / \Delta t$, sólo depende de la historia H_t del proceso a través de x , el cual es el tiempo desde la más reciente falla. La figura II.17 ilustra la función intensidad completa, aunque debe tenerse cuidado para interpretarla correctamente. La función intensidad completa mostrada en la figura II.17 está condicionada a la ocurrencia de fallas en los tiempos $t = 2, 4.5, 8.5, 10.5, 13$ y 15 . Nótese que después de cada falla, la intensidad retorna como estaba durante un tiempo 0, es más, esta conducta se mantiene incluso para tiempos cercanos a 0; esto es cierto para la primera falla como para cualquier otra. De esta manera un proceso de renovación no puede ser usado para modelar sistemas en deterioro, ya que cada falla retorna al sistema a una condición de vida nueva.

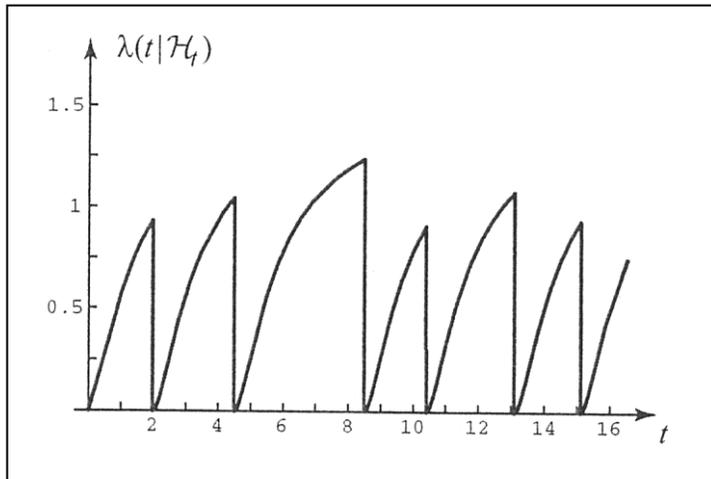


FIGURA II.17.- Función Intensidad completa condicionada a fallar en $t = 2, 4.5, 8.5, 10.5, 13$ y 15 .

La variable aleatoria discreta $N(t)$ es definida como el número de fallas en el intervalo $[0,t]$ y satisface la ecuación:

$$P(N(t) \geq k) = P(T_k \leq t) = P\left(\sum_{i=1}^k X_i \leq t\right) \quad (\text{Ec. 40})$$

De esta manera para encontrar la distribución de $N(t)$, necesitamos encontrar la distribución de una cantidad de variables independientes aleatorias. El concepto de convolución es muy usado en la determinación de tales cantidades.

A continuación se mostrará una manera muy usada para encontrar la distribución de T_n , tiempo de la n -ésima falla. Por ejemplo, si los tiempos entre falla son independientes e idénticamente distribuidos con una función $GAM(2,\theta)$, entonces la distribución de T_n es $GAM(2n,\theta)$. De la ecuación 40 podemos ver que la variable aleatoria $N(t)$ satisface:

$$P(N(t) \geq k) = P\left(\sum_{i=1}^k X_i \leq t\right) = F^{(k)}(t)$$

Donde $F^{(k)}(t)$ es la cdf de la “ k ” convolución de la densidad f . La función media para un proceso de renovación es:

$$\Lambda(t) = E(N(t)) = \sum_{k=0}^{\infty} k P(N(t) = k)$$

$$\Lambda(t) = \sum_{k=1}^{\infty} k [P(N(t) \geq k) - P(N(t) \geq k+1)]$$

$$\Lambda(t) = \sum_{k=1}^{\infty} P(N(t) \geq k) = \sum_{k=1}^{\infty} F^{(k)}(t)$$

El ROCOF para un proceso de renovación esta definido como:

$$\mu(t) = \frac{d}{dt} \Lambda(t) = \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^{\infty} F^{(k)}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f^{(k)}(t)$$

Solo en algunos casos especiales la densidad de la cantidad puede escribirse como una expresión simple. El próximo ejemplo muestra uno de estos casos.

Ejemplo:

Suponga tiempos entre fallas de una función GAM(3,θ) la cual es independiente e idénticamente distribuida. Por consiguiente el ROCOF es:

$$\mu(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f^{(k)}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{t^{3k-1}}{\theta^{3k} \Gamma(3k)} e^{-t/\theta}$$

La figura II.18 muestra la pdf para los primeros cinco tiempos de falla asumiendo $\theta = 1$. Para el caso de la distribución GAM(3,1), la media y desviación estandar del tiempo de la i-ésima falla es $3\theta i = 3i$ y $\sqrt{3i\theta} = \sqrt{3i}$. El ROCOF $\mu(t)$ es mostrado en la figura II.19. Note que el ROCOF converge muy rápidamente para la constante $1/\mu = 1/3$.

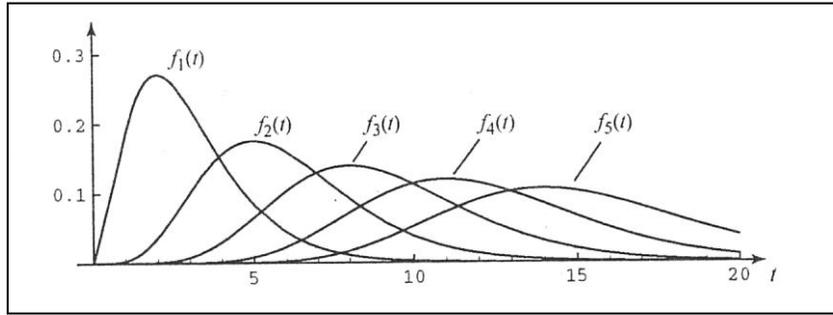


FIGURA II.18.- Función Densidad de Probabilidad para las primeras cinco fallas de una GAM(3,1) de un Proceso de Renovación.

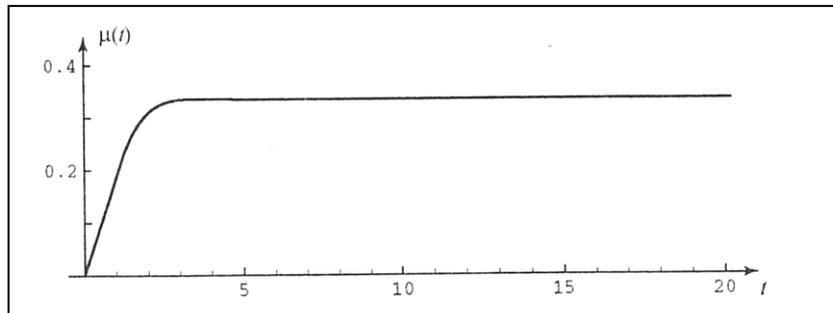


FIGURA II.19.- Función ROCOF para una función GAM(3,1) de un Proceso de Renovación.

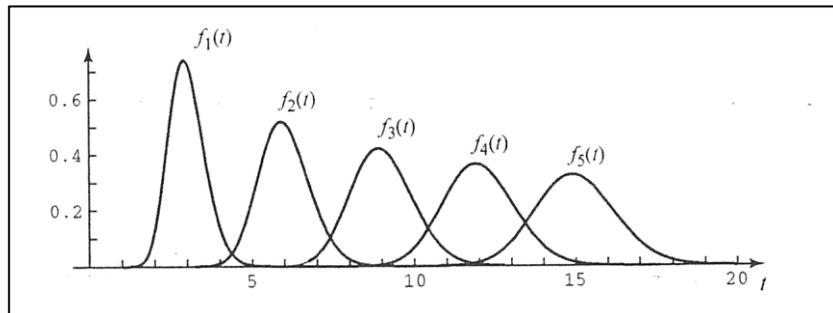


FIGURA II.20.- Función Densidad de Probabilidad para las primeras cinco fallas de una GAM(30,0.1) de un Proceso de Renovación..

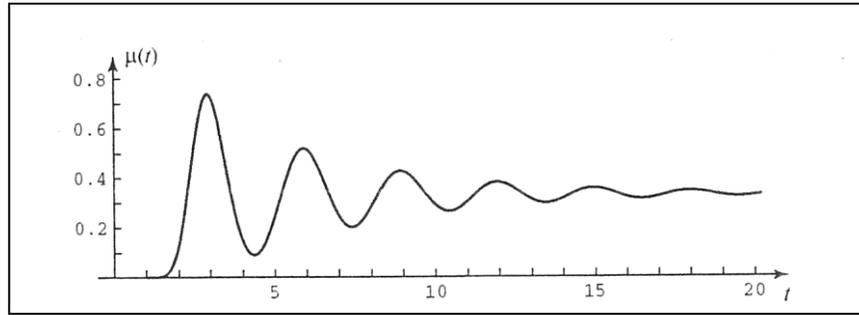


FIGURA II.21.- Función ROCOF para una función GAM(30,0.1) de un Proceso de Renovación.

Las figuras II.20 y II.21 muestran una situación en donde el coeficiente de variación σ/μ para una distribución de tiempos entre falla es mucho más pequeña, en este caso $k = 30$ y $\theta = 0.1$, esto lleva a un mismo tiempo medio entre fallas $\eta = 3$, pero la desviación estandar es pequeña. Las figuras (II.19 y II.21) muestran el ROCOF para dos situaciones GAM(3,1) y GAM(30,0.1), estas figuras sugieren que el ROCOF (también llamado densidad de renovación cuando este es un proceso de renovación) converge al valor $1/\eta$.

Por una directa aplicación del Teorema del Límite Central, sabemos que la variable aleatoria

$$\frac{T_n - n\eta}{\sigma\sqrt{n}}$$

es asintóticamente normal. Esto puede ser usado para obtener resultados asintóticos de una variable aleatoria $N(t)$ con tiempos largos.

TEOREMA 3

Para Un proceso de renovación donde los tiempos entre evento poseen media η y desviación estándar σ^2 ,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(N(t) < a(t)) = \Phi(y)$$

Donde:

$$a(t) = \frac{t}{\eta} + y\sigma\sqrt{\frac{t}{\eta^3}}$$

Demostración: La demostración usa los resultados asintóticos para T_n :

$$P(N(t) > a(t)) = P(T_{a(t)} > t)$$

$$P(N(t) > a(t)) = P\left(\frac{T_{a(t)} - \eta a(t)}{\sigma\sqrt{a(t)}} > \frac{t - \eta a(t)}{\sigma\sqrt{a(t)}}\right)$$

$$P(N(t) > a(t)) = P\left(\frac{T_{a(t)} - \eta a(t)}{\sigma\sqrt{a(t)}} > \frac{t - \eta\left[\frac{t}{\eta} + y\sigma\sqrt{\frac{t}{\eta^3}}\right]}{\sigma\sqrt{\frac{t}{\eta} + y\sigma\sqrt{\frac{t}{\eta^3}}}}\right)$$

$$P(N(t) > a(t)) = P\left(\frac{T_{a(t)} - \eta a(t)}{\sigma\sqrt{a(t)}} > \frac{-\eta y\sigma\sqrt{\frac{t}{\eta^3}}}{\sigma\sqrt{\frac{t}{\eta} + y\sigma\sqrt{\frac{t}{\eta^3}}}}\right)$$

$$P(N(t) > a(t)) = P\left(\frac{T_{a(t)} - \eta a(t)}{\sigma\sqrt{a(t)}} > -\frac{y}{\sqrt{1 + y\sigma/\sqrt{\eta t}}}\right) = P\left(\sqrt{1 + y\sigma/\sqrt{\eta t}} \frac{T_{a(t)} - \eta a(t)}{\sigma\sqrt{a(t)}} > -y\right)$$

Ahora permitamos que $t \rightarrow \infty$ de manera que $a(t)$ es un entero, la constante $\sqrt{1+y\sigma/\sqrt{\eta t}}$ converge a 1 y la variable aleatoria $(T_{a(t)} - \eta a(t)) / \sigma\sqrt{a(t)}$ converge a la distribución estandar normal. De esta manera :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(N(t) < a(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\left(\sqrt{1 + y\sigma/\sqrt{\eta t}} \frac{T_{a(t)} - \eta a(t)}{\sigma\sqrt{a(t)}} > -y\right)$$

Aquí ϕ es la cdf de la distribución normal estándar.

II.3.- ESQUEMA GENERALIZADO INTERNO DEL “ VICON”

Una vez planteada toda la teoría requerida para la elaboración del programa, a continuación las figuras II.22 y II.23 muestran de manera esquematizada la estructura interna del mismo de manera muy generalizada.

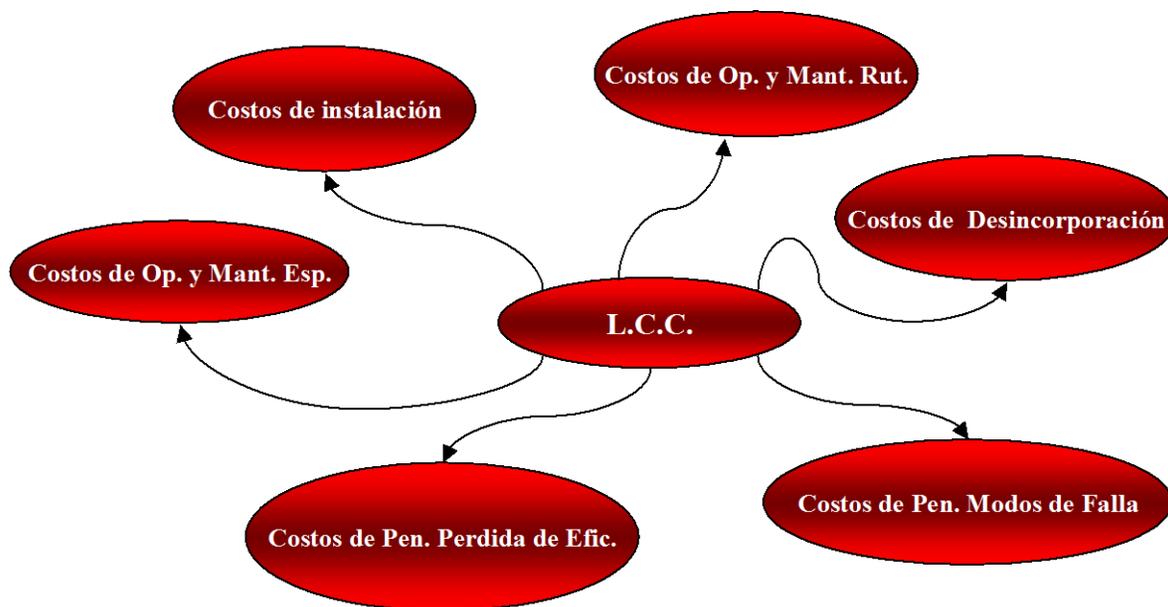


FIGURA II.22.- Esquema generalizado interno del programa “ VICON”

La figura II.22 muestra el desglose de costos tomados en cuenta por el programa para realizar la evaluación, cuya programación fue realizada tomando como base toda la información suministrada al principio de este capítulo; por otro lado la figura II.23 muestra de manera muy genérica toda la estructura interna del programa dedicada a modelar los modos aleatorios de falla, tomando como base para su programación toda la información suministrada en la parte final de este capítulo.

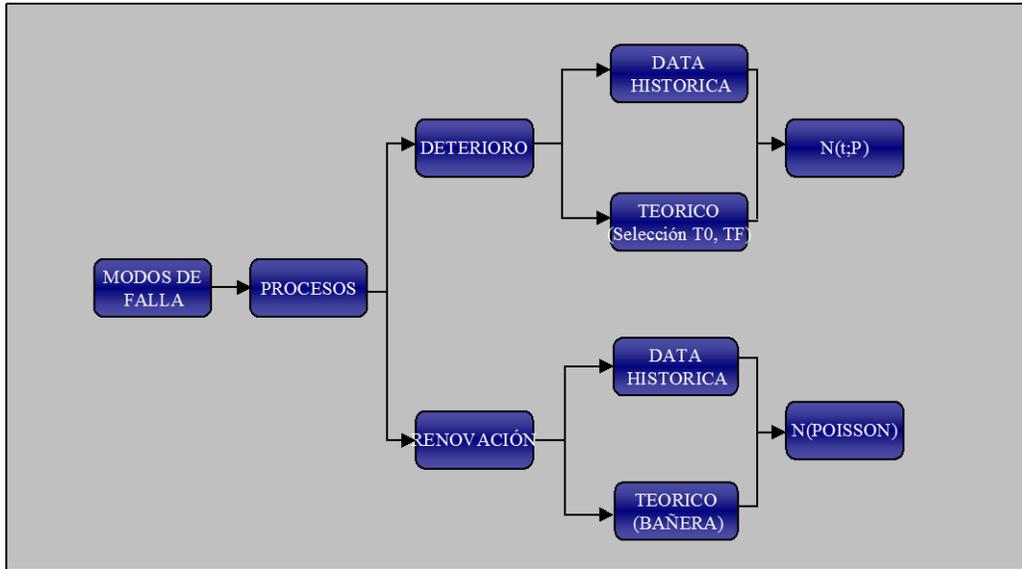


FIGURA II.23.- Esquema generalizado interno para tratar los modos aleatorios de falla

CAPÍTULO III: EVALUACIÓN DE PLANTA COMPRESORA PUNTA DE MATA

Con el fin de simplificar la evaluación y obtener una mejor tendencia del comportamiento aleatorio de los diversos activos estudiados, los mismos fueron agrupados tomando en cuenta el criterio de un mismo contexto operacional. De esta manera según su tiempo de vida, modelo de equipo, capacidad y otras variables importantes para su clasificación se llegó a la configuración siguiente:

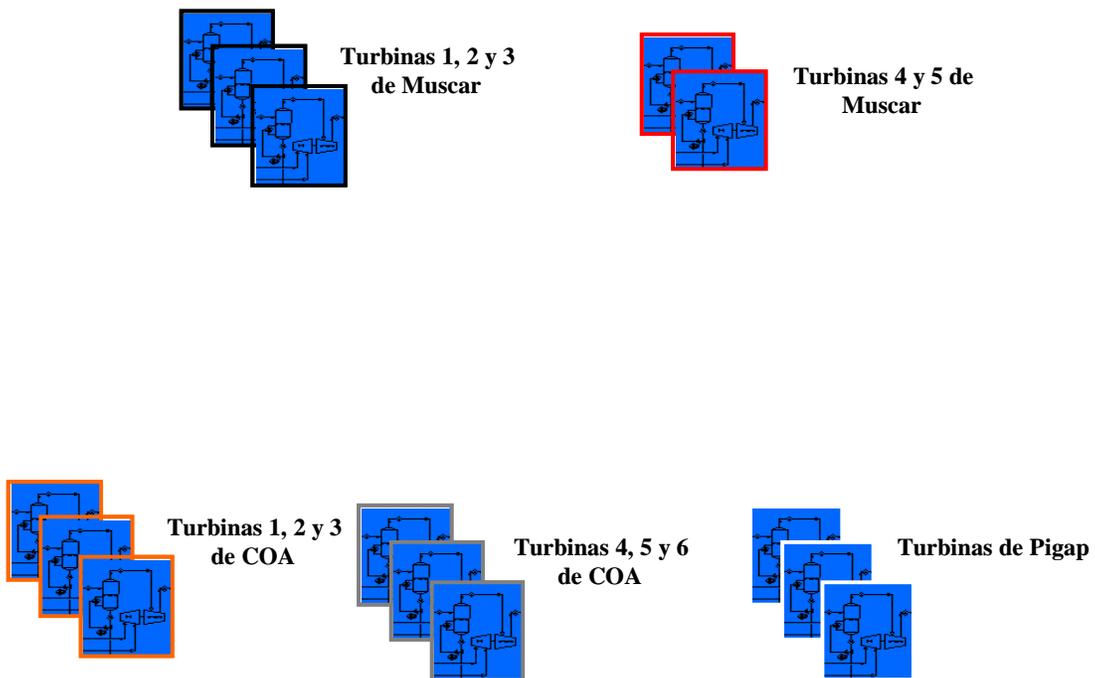


FIGURA III.1 Clasificación para la Evaluación

A continuación se mostrará una comparación entre los resultados obtenidos de evaluaciones realizadas con el programa *VICON* y el programa *LIFESPAN*, ambos pertenecientes a la industria petrolera específicamente a INTEVEP.

III.2.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS T1, T2 Y T3 DE MUSCAR

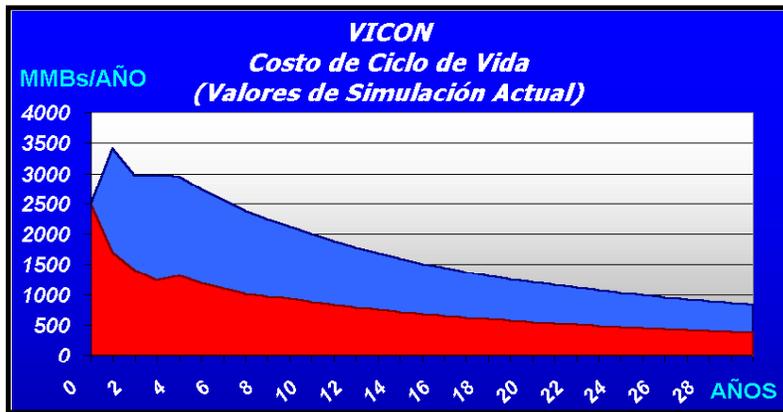


FIGURA III.2 VICON (T1,T2 y T3 de MUSCAR)

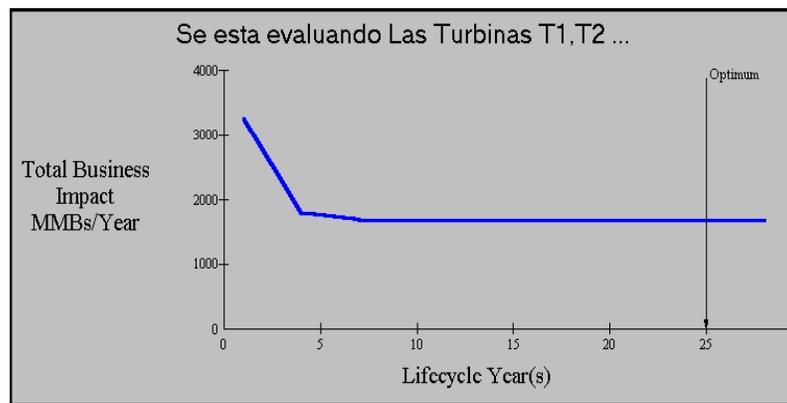


FIGURA III.3 LIFESPAN (T1,T2 y T3 de MUSCAR)

Los resultados obtenidos en ambas evaluaciones fueron similares debido al impacto medio que produce la penalización por perdida de producción. Este comportamiento se mantiene en las siguientes evaluaciones debido a que tienen asociadas la misma cantidad de ingresos por unidad de producción. La última evaluación muestra un cambio significativo en su comparación con los dos programas y será discutido en la parte final del capítulo.

III.3.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS T4 Y T5 DE MUSCAR

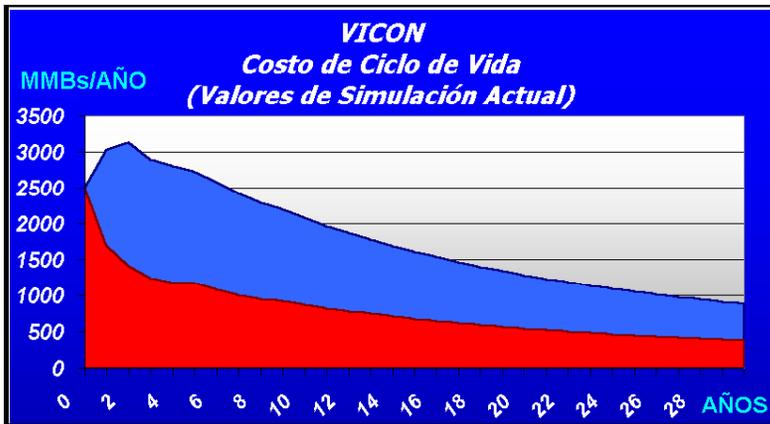


FIGURA III.4 VICON (T4 y T5 de MUSCAR)

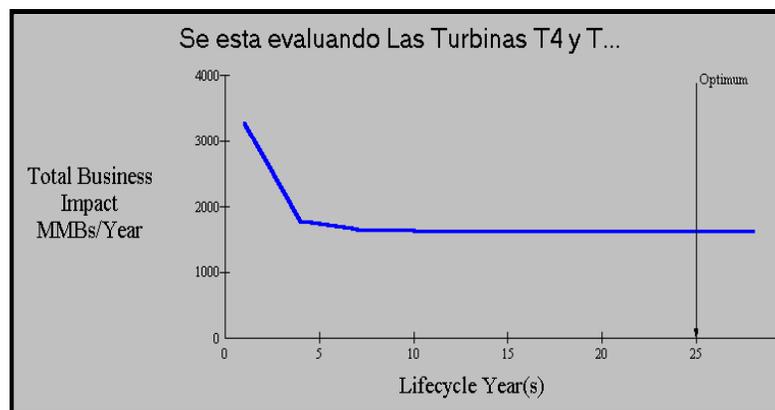


FIGURA III.5 LIFESPAN (T4 y T5 de MUSCAR)

III.4.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS T1, T2 Y T3 DE COA

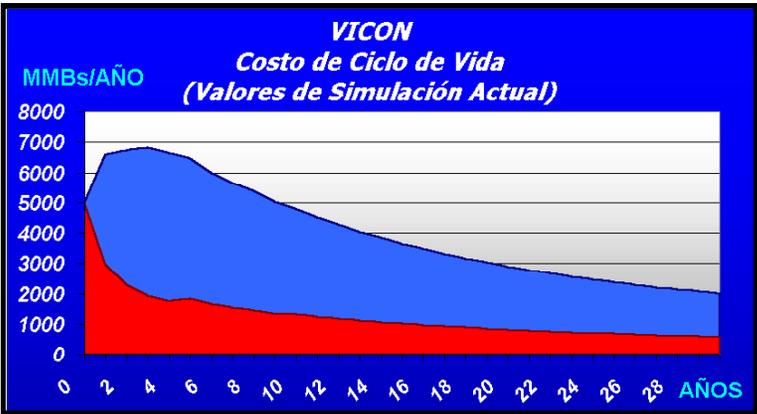


FIGURA III.6 VICON (T1,T2 y T3 de COA)

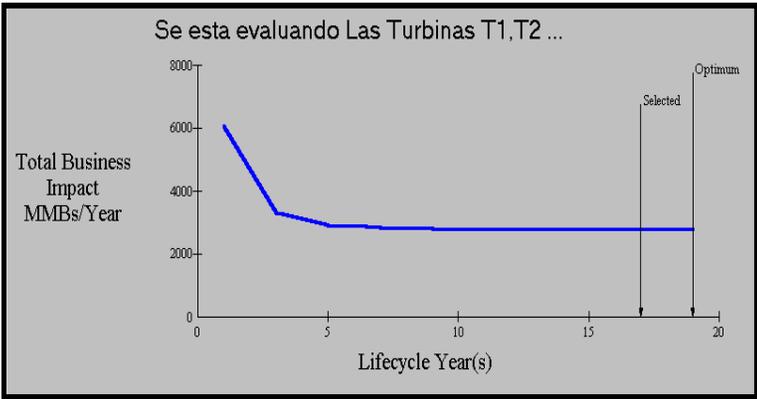


FIGURA III.7 LIFESPAN (T1,T2 y T3 de COA)

III.5.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS T4 Y T5 Y T6 DE COA

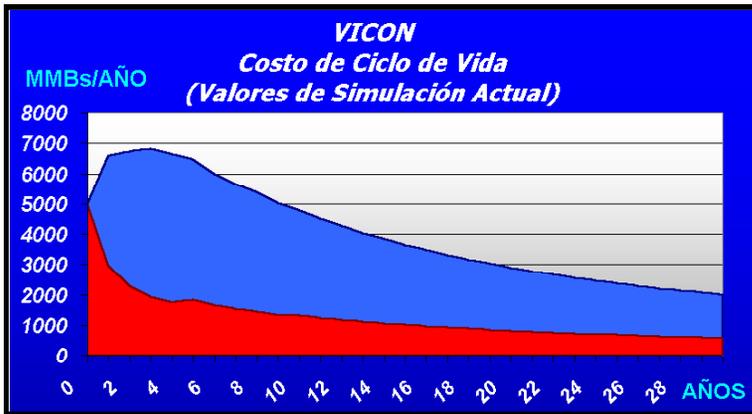


FIGURA III.8 VICON (T4,T5 y T6 de COA)

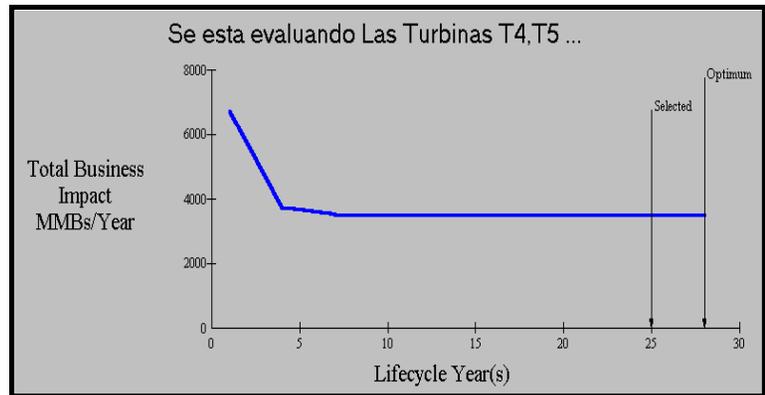


FIGURA III.9 LIFESPAN (T4,T5 y T6 de COA)

III.6.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PARA LAS TURBINAS DE PIGAP

Es importante mencionar que la evaluación LCC para las turbinas de PIGAP fue realizada suponiendo que su producción está destinada en un 100% a la inyección de gas comprimido en pozos petroleros, con la finalidad de estimularlos e incrementar su producción. Según estudios realizados por la empresa petrolera, se estima que por cada 900 millones de pie cúbicos de gas inyectado se estimulan unos 180 mil barriles de petróleo, lo cual significa que por cada millón de pie cúbico se generan unos 4000 \$.

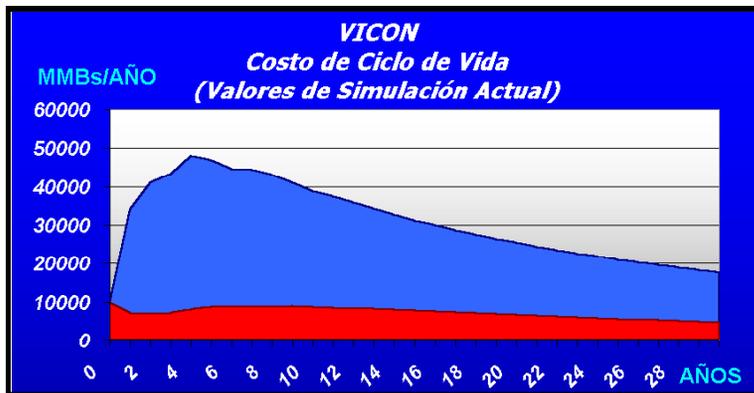


FIGURA III.10 VICON (Turbinas de PIGAP)

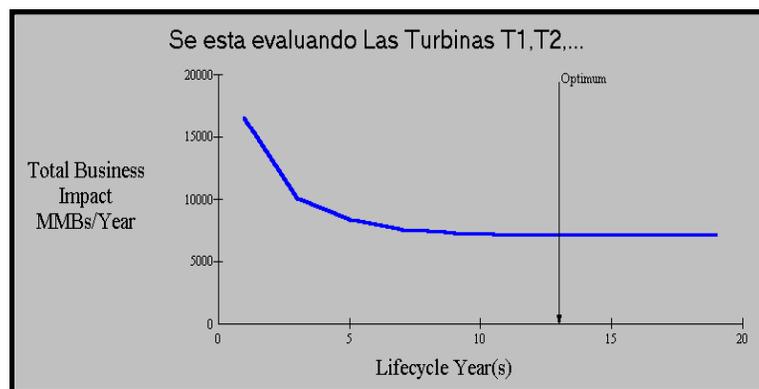


FIGURA III.11 LIFESPAN (Turbinas de PIGAP)

Debido al alto impacto que genera la penalización por pérdida de producción en PIGAP como consecuencia de los altos ingresos por unidad de producción, los resultados en ambas evaluaciones cambiaron significativamente.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

Un análisis de Costo de Ciclo de Vida implica el manejo de una gran cantidad de variables que de una u otra manera impactan significativamente la evaluación del activo a lo largo de su vida útil, por lo tanto identificar cuales son las más importantes según el activo estudiado llevará a la evaluación a los mejores resultados.

Un análisis detallado de la confiabilidad y mantenibilidad de un equipo que presente altos niveles de producción representa uno de los aspectos mas importantes en un análisis LCC.

Para este tipo de activos los costos de penalización por perdida de producción como consecuencia de la indisponibilidad inducen a oportunidades de mejora en este ámbito ya que representan en gran porcentaje los costos de la curva LCC.

La adecuada asignación del tratamiento que se le asigne a un determinado modo aleatorio de falla es de vital importancia para obtener resultados con el menor grado de incertidumbre asociado posible.

Es por esto que para la evaluación de un análisis LCC es recomendable contar con una buena data histórica del activo que facilite la toma de decisiones en cuanto a la asignación de modelos de comportamiento para los modos de falla aleatorios.

El programa *VICON* es una herramienta perteneciente a Intevep (Departamento de Confiabilidad) que cumple con todos los requisitos necesarios para un buen análisis LCC, con el fin de continuar con los procesos que permitan optimizar de forma integral el proceso de gestión de los activos involucrados en las diversas actividades de exploración, producción, refinación, mercadeo y distribución del petróleo y sus derivados.

CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES

Para la planta compresora “ Punta de Mata”, un análisis detallado de la confiabilidad del equipo resulta de vital importancia ya que los altos costos asociados a la penalización por perdida de producción juegan un papel muy importante en el comportamiento de la curva LCC.

Lo expuesto en el párrafo anterior se puede evidenciar en las curvas LCC proporcionadas por el programa **VICON**, cuya banda de costos de penalización por perdida de producción (sobretudo en la evaluación realizada a las turbinas de PIGAP) representa un gran porcentaje de la totalidad de costos en la evaluación.

La banda azul nos indica todo el dinero que estamos dejando de percibir por la pérdida de producción debido a los modos aleatorios de falla, como todos sabemos una manera de incrementar las ganancias es disminuyendo su indisponibilidad, lo cual implica un incremento en los costos de mantenimiento. Pero la pregunta que surge en todo momento siempre es “hasta que punto puedo llegar para no gastar inclusive aún más”.

Un incremento de los costos de mantenimiento que se puede observar en un incremento de la banda roja, pudiera disminuir como consecuencia los costos de penalización por perdida de producción como consecuencia de los modos aleatorios de falla que se pueden observar en la banda azul y a su vez el total de costos en la evaluación. El momento que indica cual debe ser el límite de incremento de los costos de mantenimiento se presenta cuando a pesar de notarse una disminución en la banda azul, el total de costos comienza a incrementarse (véase figuras anexo 13, 14 y 15).

Debido al gran impacto que pueden ocasionar las variables en la evaluación, para realizar un buen análisis LCC es necesario contar con especialistas del área evaluada con la finalidad de extraer una buena data e ingresarlos al programa con el menor grado de incertidumbre asociado posible

BIBLIOGRAFÍA

- EBELING, Charles E., “Reliability and Mantenibility Engineering”, Mc Graw-Hill, New York, 1997.
- FABRYCKY, W.J. y BLANCHARD, B.S., “Life Cycle Costing and Economic Analysis”, Prentice Hall, Inc, New Jersey, USA, 1991.
- Grupo Corporativo Confiabilidad Operacional de PDVSA, “Introducción a la Confiabilidad Operacional”, PDVSA-CIED, Venezuela, 1999.
- KECECIOGIO, Dimitri, “Reliability Engieenering Handbook”, , Prentice Hall, New Jersey, USA, 1991.
- LABOUCHERE Colin, "A Software Training Course For Intevp in APT-LIFESPAN, APT-STOCK, APT SCHEDULE”, The Woodhouse Partnership Ltd, Diciembre 2001.
- MATALOBOS, Angel D., “Confiabilidad en Mantenimiento”, Ediciones IESA, Caracas, Venezuela. 1992.
- O`CONOR, Patrick D., “Practical Reliability Engineering”, Tercera Edición, Editorial Book Crast, New York, USA, 1996.
- RIGDON, Steven E. y BASU, Asit P, “Stadistical Methods for the Reliability of Repairable Sistem”, Canada. 2000.
- SMITH, David J., “Reliability, Mantenibility and Risk”, 5ta Edición, Butter Worth-Heine Mann, USA, 2000.

ANEXO

MANUAL DE USO “VICON”

El programa “VICON” es una herramienta perteneciente a PDVSA INTEVEP destinado a realizar Análisis de Costo de Ciclo de Vida para activos de la empresa petrolera, dicho programa fue creado para aceptar una gran variedad de escenarios posibles a la hora de una evaluación, los cuales se refieren directamente al tipo de información que se maneja del activo, es por ello que un estudio detallado del siguiente manual ayudará a obtener los mejores resultados y el menor grado de incertidumbre posible asociado.

Un Análisis de Costo de Ciclo de Vida siempre presenta un grado de incertidumbre en los resultados como consecuencia de la imprecisión de los datos de entrada, y del comportamiento aleatorio que presenta el activo durante su ciclo de vida, motivado a esto el usuario debe dominar de una manera clara todas las variables involucradas en la corrida del programa, es decir, que debe presentar cierto grado de conocimientos sobre mantenimiento de equipos de manera que la selección de las diversas opciones en los diversos escenarios del programa sea la más confiable.

Una vez tomadas en cuenta todas las consideraciones planteadas en los párrafos anteriores, a continuación se presenta de una manera clara y detallada toda la estructura del programa, la forma como desplazarse en el mismo a través de sus diversos renglones de costos y la manera de ingresar los datos y selecciones en los diversos renglones mencionados.

Ventana Principal

La ventana principal muestra un grupo de datos de entrada, así como una variedad de botones que permiten llegar a las diversas pantallas del programa, de manera que puedan ser ingresados todos los datos de entrada sin ningún tipo de complicación, como se muestra en l figura anexol. Entre ellos tenemos:

- **Nombre del Activo:** Es la casilla en donde se le asigna el nombre al activo que está en estudio, por lo general se deben colocar nombres que identifiquen claramente al activo de manera que facilite su ubicación en búsquedas futuras.

• **Descripción:** Es un espacio destinado a colocar una breve descripción del activo en estudio, así como diversas palabras claves que le puedan servir al usuario para su fácil ubicación en cualquier otro momento si se cuenta con diversos archivos cuyos activos de estudio presentan nombres parecidos. De igual forma permite ingresar cualquier otra información que el usuario considere importante para la evaluación.

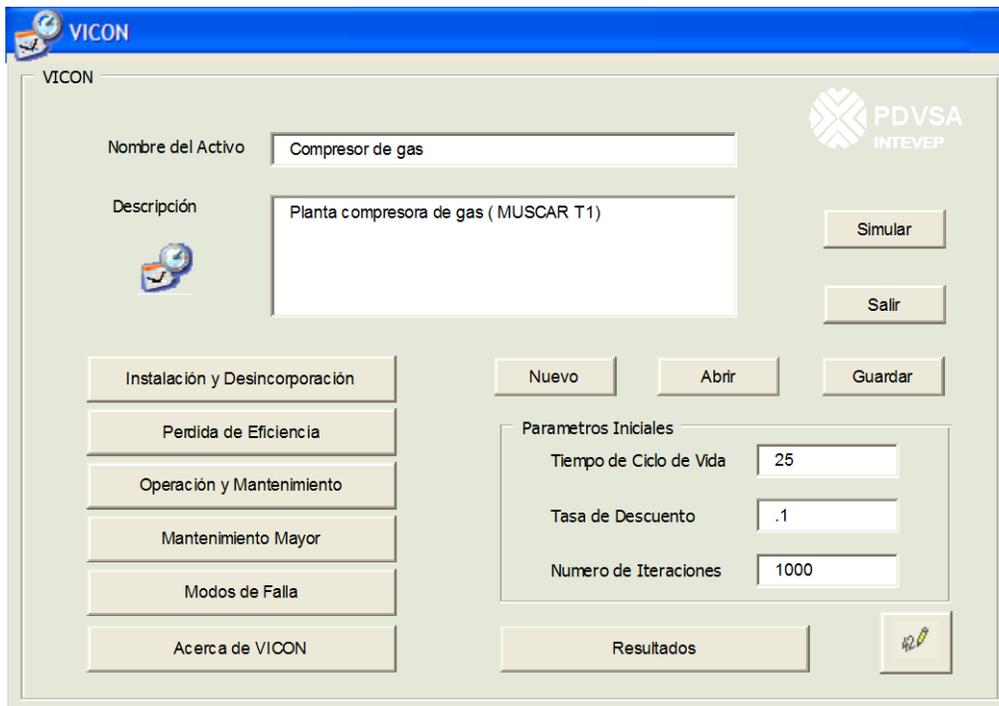


FIGURA ANEXO 1 - Ventana Principal del Programa “VICON”.

• **Tiempo del ciclo de vida:** Se refiere al tiempo que se tiene estimado será la duración del ciclo de Vida del Activo, este valor debe ser analizado detalladamente previo a su ingreso ya que la velocidad de la corrida del programa se verá afectada por un numero muy grande de años en la evaluación, es por ello que debe evitarse colocar un tiempo del ciclo de vida mucho mayor al debido ya que solo se lograría disminuir la eficiencia del programa.

- **Tasa de descuento:** Es el valor de la tasa interna de retorno que se manejará para la evaluación, el mismo se asume constante para la evaluación y dicha información puede por lo general ser suministrada por la empresa.

- **Numero de iteraciones:** El programa esta construido con diversas herramientas que trabajan de forma estadística, para ello es necesario trabajar con procesos de simulación “ Monte Carlo”, hay simulaciones internas que se detienen cuando encuentran un valor esperado, pero hay una simulación general que necesita un número de iteraciones que debe ser ingresado por el usuario. Este valor jugara un papel importante en los resultados obtenidos, ya que un número grande de iteraciones nos llevará a resultados más precisos pero la corrida tendrá mayor duración. El usuario debe tomar la decisión del valor que será ingresado, dependiendo del grado de importancia del activo o del impacto económico que produzcan pequeñas variaciones del análisis. Por otro lado en algunas ocasiones el numero de iteraciones ingresado por el usuario para la corrida del programa puede no ser el suficiente para llegar a un nivel de convergencia, es por ello que en la ventana de resultados se presenta la opción de continuar con otro numero de iteraciones una vez concluida la corrida con el fin de llegar a un nivel de convergencia en los resultados, en dicha ventana se brinda una información mas detallada de esta opción.

En la pantalla principal se encuentran una variedad de botones que resultan de gran importancia para la evaluación, los cuales son explicados detalladamente a continuación:

- **Nuevo:** Si la evaluación se está realizando sobre un activo por primera vez, se debe pulsar el botón “NUEVO” luego de colocar el nombre del mismo y de esta manera se creará un archivo de dicha evaluación.

- **Abrir:** Si la evaluación será realizada sobre un activo estudiado anteriormente, del cual se halla creado un archivo, se debe pulsar el botón “ABRIR” luego de escribir el nombre del activo como fue guardado, de esta manera se tendrán todos los datos cargados de dicha evaluación y podrán ser cambiados según el requerimiento.

- **Guardar:** Ya sea un nuevo activo o un viejo activo que fue abierto para realizar algunas modificaciones en los datos de entrada o en la manera como se realizo la

evaluación, si se quiere guardar un archivo del trabajo realizado se debe pulsar el botón “GUARDAR”. En el caso que halla sido modificado un archivo se perderá la vieja información y se guardarán los cambios realizados.

- **Simular:** Una vez ingresados todos los datos a través de las diversas ventanas del programa se debe hacer click en el botón “SIMULAR” para comenzar la corrida, la duración de dicho proceso dependerá del numero de iteraciones seleccionados así como de las selecciones utilizadas dentro del programa.

- **Salir:** Permite salirse del programa, es recomendable haber creado un archivo previo.

- **Lápiz:** Esta opción muestra una ventana donde pueden ser ingresados diversos comentarios referentes a datos ingresados en las ventanas del programa a través de un menú desplegable, todas las ventanas presentan esta opción y envían al mismo menú desplegable por tanto nos limitaremos de explicar nuevamente la función de esta opción.

Los cinco primeros botones que se encuentran enmarcados en el lado izquierdo de la ventana principal permiten la entrada a las diversas ventanas que dan acceso a los diversos tipos de costo que utiliza el programa para su análisis, a continuación se presenta en forma detallada el significado de las diversas casillas y botones que se encuentran distribuidos a lo largo de las mismas:

Costos de Instalación y Desincorporación

Este botón da acceso a la ventana en donde son ingresados los diversos costos que involucran la instalación y desincorporación del activo, en el caso que no se disponga de la información de algún renglón de costos se puede dejar la casilla en blanco y si se cuenta con algún costo que no esté especificado en ninguna de las opciones se puede ingresar en alguna de estas, con el fin de reflejar todos los costos del activo sin afectar de ninguna manera el análisis (véase figura anexo 2). En dicha hoja se encuentran cuatro aspectos importantes que se explicaran a continuación:

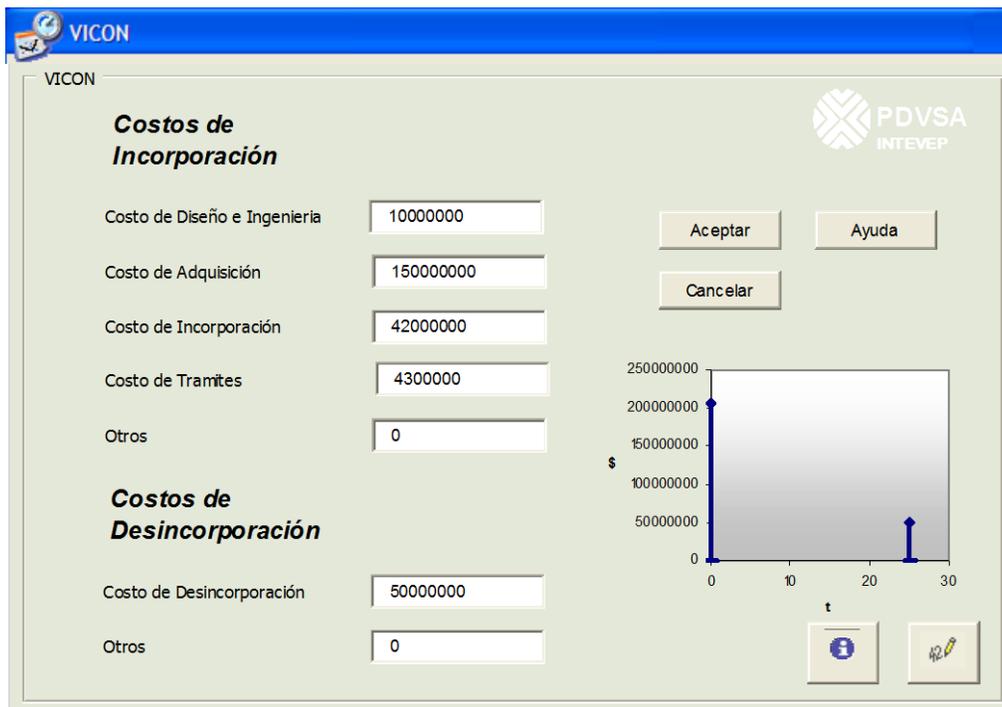


FIGURA ANEXO 2 - Ventana de Costos de Instalación y Desincorporación.

- **Aceptar:** Una vez ingresados todos los datos de la ventana y verificado que los mismos sean fiables, se debe hacer click en este botón y de esta manera se cargarán al programa para retornar a la pantalla principal. Esta función aplica para todos los botones “ACEPTAR” de las diversas ventanas a lo largo del programa pero retornando a la ventana de la cual se origine la misma, por tal motivo nos limitaremos de mencionarlas nuevamente a lo largo del manual.

- **Cancelar:** Este botón te devuelve a la pantalla principal sin cargar los valores que hallan sido ingresados hasta el momento en la ventana de costos de instalación y desincorporación. Esta función aplica para todos los botones “CANCELAR” de las diversas ventanas a lo largo del programa pero retornando a la ventana de la cual se origine la misma, por tal motivo nos limitaremos de mencionarlas nuevamente a lo largo del manual.

- **Ayuda:** Este botón permite el acceso a una ventana donde se encuentra un menú desplegable que brinda de manera sencilla información general de todas las ventanas del programa, con la finalidad de aclarar pequeñas dudas principalmente en cuanto a ingreso de datos. Esta función aplica para todos los botones “Ayuda” de las diversas ventanas a lo largo del programa, por tal motivo nos limitaremos de mencionarla nuevamente a lo largo del manual.

- **i:** Con la finalidad de observar el comportamiento que presenta la data ingresada, este botón carga la gráfica mostrada con dichos valores para representarlos en forma visual, y así guiar e ir indicando al usuario el comportamiento de la corrida. Esta función aplica para todos los botones “i” de las diversas ventanas a lo largo del programa para cargar las gráficas que en ellas se encuentren, por tal motivo nos limitaremos de mencionarla nuevamente a lo largo del manual.

Costos de Operación y Mantenimiento

Este botón da acceso a la ventana en donde son ingresados todos los costos anualizados por concepto de operación y mantenimiento como lo son: costos de mano de obra, costos de repuestos, costos de logística, costos de consumo de energía, pérdida de producción asociada y otros el cual permite ingresar el costo de algún renglón que no halla sido planteado anteriormente pero que tenga un impacto significativo desde el punto de vista económico en la evaluación (véase figura anexo 3). En dicha hoja se encuentran tres aspectos importantes que se explicaran a continuación:

- **Factor de incremento anual:** Este es un factor que incrementa anualmente cada uno de los costos en forma independiente a partir del valor inicial ingresado. Es importante mencionar que este factor de incremento es independiente de la inflación y está relacionado directamente con cambios operativos durante el ciclo; si se considera que el costo no sufrirá ningún incremento independiente de la inflación se puede dejar esta casilla vacía y se asumirá un costo constante para este tipo a lo largo del ciclo de vida.

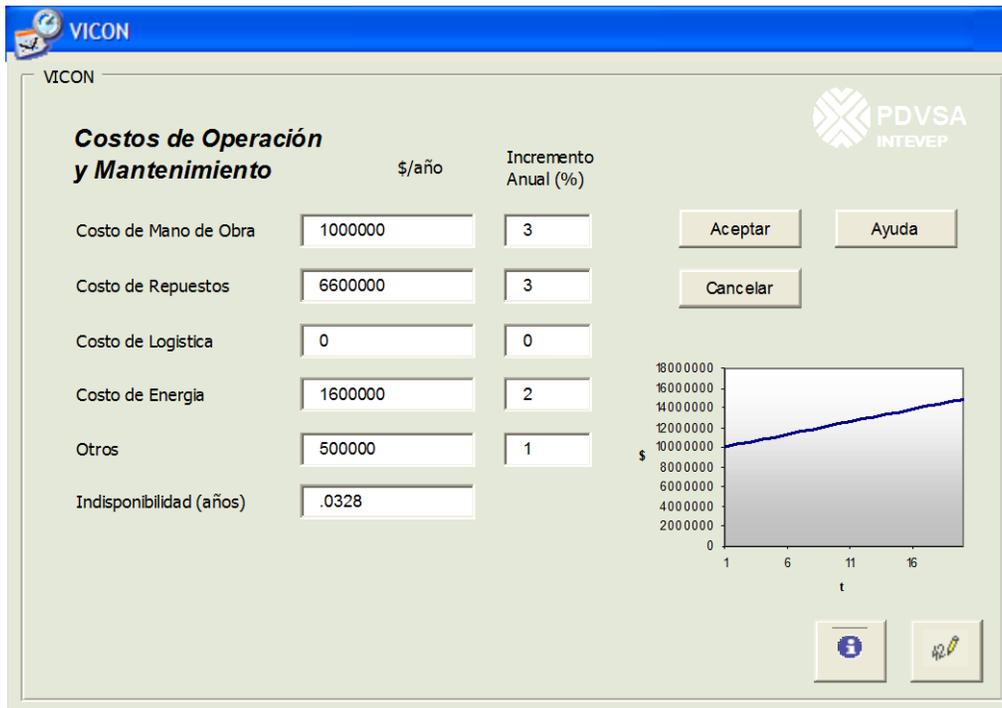


FIGURA ANEXO 3 - Ventana de Costos de Operación y Mantenimiento.

- **Indisponibilidad:** Se refiere al tiempo promedio que el activo permanece no operativo como consecuencia de sus diversos mantenimientos rutinarios anualizados. Este dato juega un papel muy importante en la evaluación, sobre todo cuando se tienen niveles de producción elevados, ya que la pérdida de producción durante el tiempo que el activo no se encuentra operativo para sus diversos mantenimientos de rutina son tomados en cuenta como costos por penalización.

- **Gráfica:** Esta permite visualizar el comportamiento de la suma de todos los costos anualizados por concepto de operación y mantenimiento rutinario a lo largo del ciclo de vida, afectados cada uno de ellos en forma previa por sus respectivos factores de incremento, ayudando a tomar decisiones en cuanto a posibles modificaciones de los mismos si el usuario lo considera con el fin de mejorar el proceso de evaluación del activo en estudio.

Costos de Mantenimientos Especiales

Al igual que en los costos de operación y mantenimiento, este botón da acceso a la ventana donde son ingresados los costos relacionados con los mantenimientos especiales (véase figura anexo 4).

Durante el ciclo de vida de un activo deben ser realizadas una serie de mantenimientos mayores que son efectuados con cierta frecuencia, con la finalidad de evitar un deterioro acelerado del equipo, los cuales incluyen: costos de mano de obra, costos de repuestos, costos de logística, costos de consumo de energía, pérdida de producción asociada y otros el cual permite ingresar el costo de algún renglón que no halla sido planteado anteriormente pero que tenga un impacto significativo desde el punto de vista económico en la evaluación. Estos mantenimientos por lo general son efectuados de manera periódica pero en muchas ocasiones se presentan diversos tipos que difieren en el tiempo entre parada y parada, en sus tiempos de mantenibilidad y en las actividades realizadas.

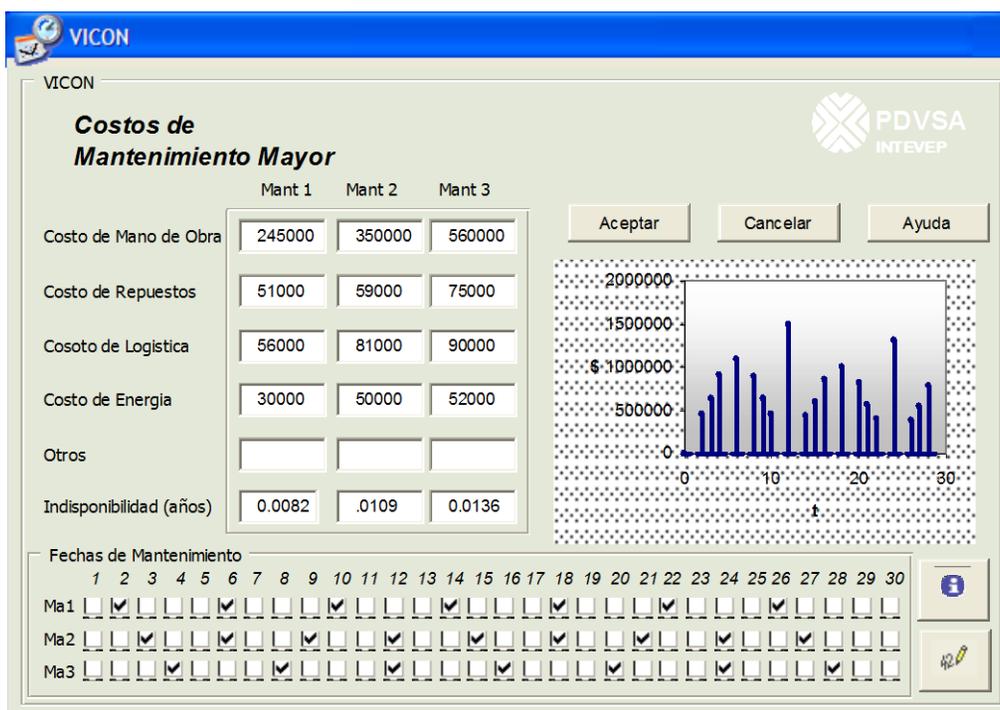


FIGURA ANEXO 4 - Ventana de Costos de Mantenimiento Mayor.

Por ejemplo se puede tener un mantenimiento mayor que se efectúa cada 16000 horas con una mantenibilidad de tres días, otro cada 24000 horas con una mantenibilidad de cuatro días y un último que se lleve a cabo cada 36000 horas con una mantenibilidad de cinco días. Por tal motivo esta ventana (figura anexo 4) presenta la opción de introducir los diferentes renglones de costos para tres tipos distintos de mantenimientos mayores (Mant1, Mant2 y Mant3) y en la parte inferior de la ventana se encuentran las casillas de selección donde se indican los años donde se efectuarán los diversos tipos mantenimientos mayores a lo largo del ciclo de vida. Es muy importante mencionar que en muchas ocasiones algunos mantenimientos incluyen todo el trabajo que se efectúa en otro, por ejemplo un mantenimiento que se efectúa cada 36000 horas aproximadamente puede incluir todos los trabajos realizados en un mantenimiento de cada 24000 horas, por lo que si llegasen a coincidir en un mismo año en la evaluación puede que no sea necesario este último. El usuario debe tener en cuenta lo mencionado anteriormente y decidir si se llevara a cabo en ese año ambos mantenimientos. En la figura se muestra un ejemplo en donde el Mant3 cubre el Mant2, no siendo necesario colocar en los años que coincidan este último mencionado con la finalidad de optimizar el proceso. Fíjese que si el Mant2 cubriera todos los trabajos del Mant1 tampoco fuese necesario colocar Mant1 en los años 6 y 18 del ciclo de vida.

Penalización por pérdida de eficiencia

Este botón permite acceder a la ventana donde son ingresados los datos para determinar la pérdida de eficiencia del activo a lo largo del ciclo de vida; aspecto que juega un papel muy importante en la evaluación sobre todo en la empresa petrolera en donde los márgenes de producción son sumamente elevados y pequeñas variaciones se hacen notorias fácilmente produciendo un gran impacto económico (véase figura anexo 5):

Al comienzo del ciclo de vida útil de un activo su producción asociada es tomada como un 100 % de la producción, pero al transcurrir el tiempo como consecuencia del proceso de envejecimiento del mismo, su eficiencia comienza a disminuir ocasionando una caída en la producción; en análisis de costos de ciclos de vida esta disminución representa una pérdida de oportunidad asociada llamada por lo general “penalización por pérdida de

producción”, los cuales deben ser incorporados a los costos del ciclo de vida del activo, de igual forma resulta de vital importancia la producción a lo largo del ciclo de vida ya que es esta la que debe ser penalizada en el momento que se produzca una parada de forma prevista (mantenimiento) o imprevista por alguna falla aleatoria.

El programa presenta dos opciones para crear la curva de producción del activo a lo largo de su ciclo de vida, estas serán seleccionadas según la información disponible por el usuario y serán analizadas detalladamente a continuación.

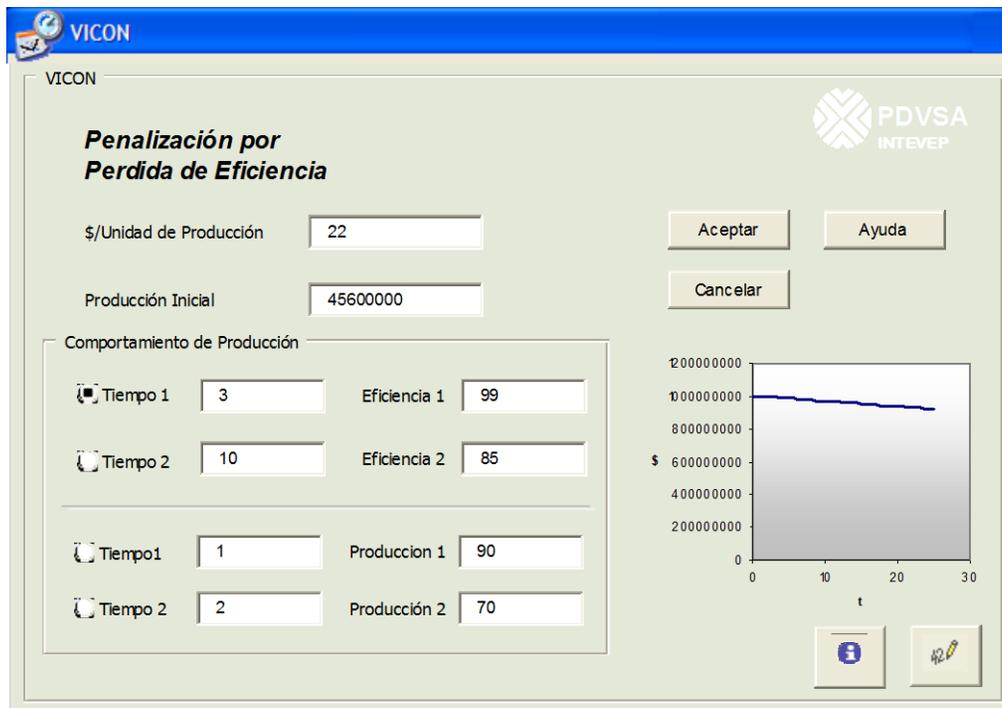


FIGURA ANEXO 5 - Ventana de Penalización por Pérdida de Eficiencia.

- **Curva de eficiencia:** Una primera opción trabaja con eficiencias, en donde el usuario una vez introducidos los valores de dólares por unidad de producción y producción inicial debe colocar un valor de eficiencia para un año determinado en el ciclo de vida haciendo click previamente en “**Tiempo 1**”, de manera tal de obtener una recta en el comportamiento de la producción a lo largo del ciclo de vida. También se pueden colocar dos valores de eficiencia para dos años determinados del ciclo de vida haciendo click previamente en

“**Tiempo 2**”, de manera tal de obtener una curva en el comportamiento de la producción a lo largo del ciclo de vida.

- **Curva de producción:** Al igual que la opción anterior en esta se debe ingresar los valores de dólares por unidad de producción y producción inicial, luego se debe colocar un valor de producción para un año determinado en el ciclo de vida haciendo click previamente en “**Tiempo 1**”, de manera tal de obtener una recta en el comportamiento de la producción a lo largo del ciclo de vida. También se pueden colocar dos valores de producción para dos años determinados del ciclo de vida haciendo click previamente en “**Tiempo 2**”, de manera tal de obtener una curva en el comportamiento de la producción a lo largo del ciclo de vida. Fíjese que en la primera opción el comportamiento de la curva esta condicionada a la producción inicial ya que las eficiencias ingresadas son porcentajes de esta, mientras que esta opción se construye con producciones específicas para la creación de la recta o la curva según sea la selección.

Penalización por Modos de Falla

Este botón da acceso a una de las ventanas más complejas del programa ya que es donde se tratan las fallas aleatorias del activo. Estas por lo general juegan un papel muy importante en los costos del ciclo de vida del mismo y es por ello que a continuación se explicará detalladamente las diversas opciones que tiene el usuario para aproximarse lo más posible al comportamiento de los diversos modos aleatorios de fallas que presenta el activo, con el fin de alcanzar el menor grado de incertidumbre posible en la evaluación.(véase figura anexo 6).

Un equipo por mas que cumpla con todos sus mantenimientos de rutina y mantenimientos especiales esta expuesto a fallas aleatorias, las cuales provocan paros imprevistos que producen ya sea en conjunto o en forma individual un gran impacto desde el punto de vista económico; por tal motivo el programa puede simular el comportamiento de cada modo de falla en específico o grupo de fallas que puedan relacionarse desde el punto de vista tanto económico como de ocurrencia y mantenibilidad representando en conjunto un papel importante en la evaluación.

Previo a la evaluación el usuario debe clasificar los diversos modos de fallas del activo, el programa admite un máximo de diez, en donde deben ser colocados los mas críticos por sus altos costos asociados de reparación y penalización, los más frecuentes que por tener un alto numero de ocurrencia deben ser analizados en forma independiente y todos aquellos que no son considerados como críticos ni tienen un alto nivel de ocurrencia pero que agrupados causan un impacto económico significativo en el activo los cuales pueden ser reunidos en diversos subgrupos en donde se deben regir por diversas características tales como: similitud en sus costos de reparación y similitud en sus tiempos de mantenibilidad.

Como fue comentado anteriormente, a cada modo de falla o grupo de modos de fallas se le puede asignar un comportamiento. La figura anexo 6 muestra la ventana en donde son ingresados los diversos modos de falla y el tratamiento que se le dará a cada uno, así como sus costos de reparación y porcentaje aproximado en la paralización de la producción como consecuencia de la misma.

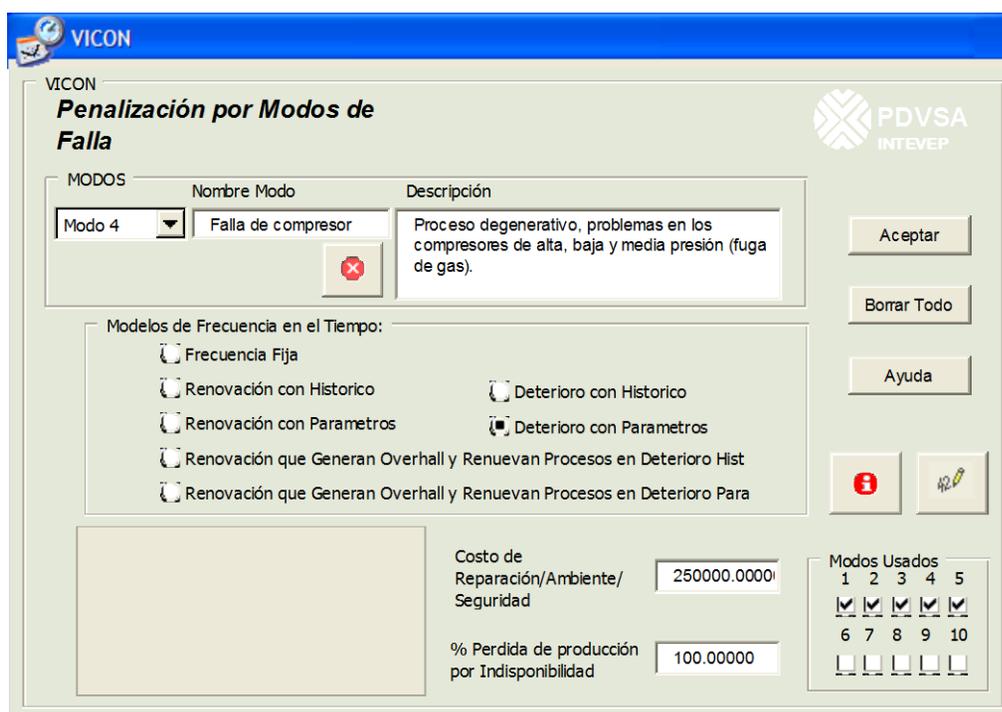


FIGURA ANEXO 6 - Ventana de Penalización por Modos de Falla.

- **MODOS:** Como primer paso se debe seleccionar el número del modo de falla que se va a ingresar de manera que todo el tratamiento que será aplicado al mismo sea almacenado por la memoria; seguido se encuentran dos cuadros de texto en donde el usuario debe ingresar el nombre asignado al modo de falla y una breve descripción sobre el mismo que explique de manera general sus características. Una vez seleccionado el número del modo de falla e ingresado sus datos correspondientes, en la parte inferior de la ventana se muestran dos cuadros de texto donde uno está destinado para ingresar los costos totales por concepto de reparación, penalización ambiental, seguridad y cualquier otro gasto que pueda generar la falla en estudio y el otro para colocar en forma porcentual la pérdida de producción que la falla genera. El botón que muestra una “x” ubicado debajo del cuadro de texto que permite ingresar el nombre del modo de falla cumple con la función de borrar toda la información del modo de falla en tratamiento.

Una vez ingresados todos los datos generales del modo de falla se debe seleccionar el modelo de frecuencia que le será asignado del grupo de opciones que presenta la ventana de penalización por modos de falla, luego es necesario pulsar el botón “i” de esta manera se tendrá acceso a las diversas ventanas donde se ingresan las diversas variables según sea el modelo de frecuencia seleccionado a aceptación del modelo frecuencia fija en donde los datos de entrada son cargados en la misma ventana principal de modos de falla a través de un cuadro que se habilita en la misma.

- **Modos usados:** Este cuadro indica el número de modos ingresados hasta el momento, así como el número de ellos que aún permanecen disponibles para cargar al programa.

- **Borrar todo:** Este botón limpia toda la información ingresada relacionada con los modos de falla, tanto en su ventana principal como en las diversas ventanas que esta deriva. Como la información que será perdida puede ser valiosa para el usuario antes de ejecutarse aparecerá un cuadro de alerta donde se pregunta si se está seguro desea perder toda la información; de decir “si” toda la información será eliminada, por el contrario al decir “no” se cancela dicha función y se mantiene la información.

The image shows a dialog box titled "Frecuencia Fija". It has two input fields. The first is labeled "Cada" and contains the value "0.3", with the unit "Años" to its right. The second is labeled "Indisponibilidad(Años)" and contains the value "0.015". At the bottom left is a button labeled "Cancelar". At the bottom right is a small icon of a person inside a square, which typically represents an information or help function.

FIGURA ANEXO 7 - Cuadro de Frecuencia Fija.

- **Frecuencia fija:** Es el modelo más sencillo para tratar los modos de falla, en este simplemente se ingresa cada cuantos años se espera presentará y la indisponibilidad que la misma producirá. De esta manera se asume que la falla se presenta en forma periódica a través del ciclo de vida y su tiempo de reparación será el mismo para todo momento que se produzca. Este modelo puede ser utilizado para aquellas fallas que presenten una conducta constante a lo largo del ciclo de vida y su impacto económico no juegue un papel muy importante en la evaluación, véase figura anexo 7, de otra manera es recomendable utilizar alguno de los otros modelos que serán analizados a continuación que mejor se puedan ajustar a su conducta de manera tal de obtener un menor grado de incertidumbre en la evaluación.

Renovación con Histórico:

Este modelo asume que la reparación de la falla deja al activo como nuevo y que la aparición de una próxima del mismo tipo no queda condicionada a esta, es decir, hablando en términos de confiabilidad que queda tan bueno como nuevo y se asume un proceso de renovación sin memoria. Este modelo puede ser asignado a fallas que una vez reparadas dejan al activo como nuevo y por lo general son aquellas que implican cambio de pieza por una nueva y no reparación.

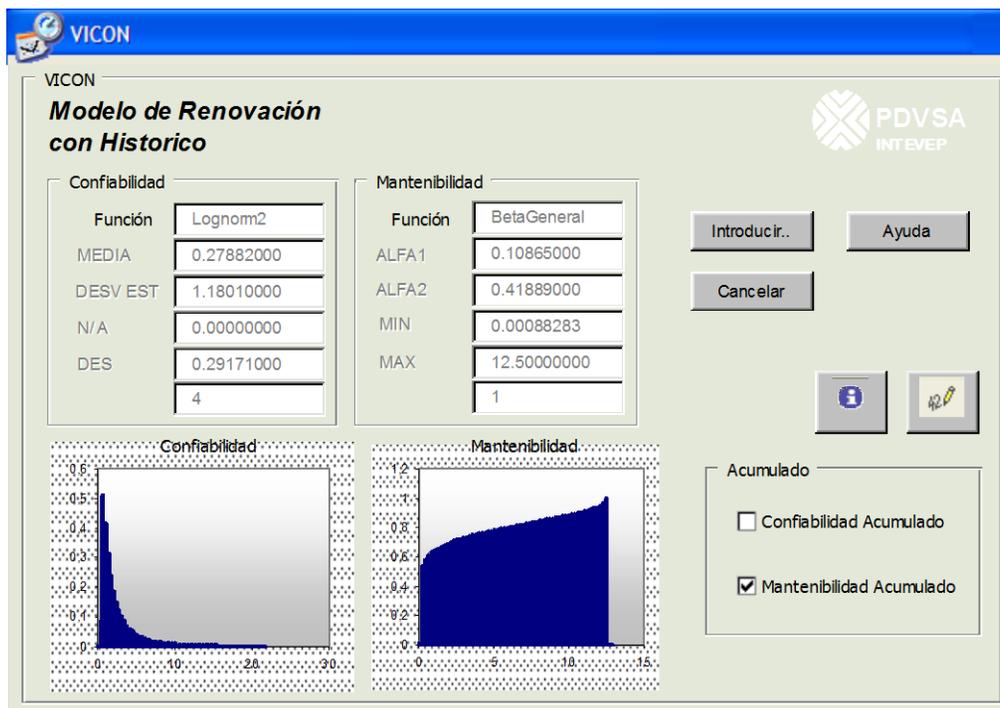


FIGURA ANEXO 8 - Ventana de los Modos de Falla con Modelo de Renovación con Histórico.

La figura anexo 8 muestra la ventana donde son tratados los modos de falla con un modelo de renovación con histórico. A continuación se explicará de manera detallada todo el procedimiento a seguir para ingresar los datos necesarios de ser seleccionado este modelo:

Para utilizar este modelo es necesario contar con una data histórica de la falla, ya sea preferiblemente del activo o de algún otro que siga un mismo patrón de conducta. Dicha data debe ser ingresada en una hoja de cálculo a la que se tendrá acceso haciendo “click” en el botón “ Introducir”, de esta manera aparecerán dos columnas en donde a la izquierda se deben colocar los datos de confiabilidad y a la derecha los datos de mantenibilidad. Luego de aceptar se llega nuevamente a la ventana donde es tratado este modelo de renovación con histórico, la misma brinda información importante del modo de falla para el usuario. Se puede observar un cuadro denominado confiabilidad en donde es colocada la función del mejor ajuste obtenido por el programa de los tiempos operativos entre fallas de la data ingresada así como sus diversos parámetros que la definen, de igual forma aparece otro cuadro denominado mantenibilidad en donde es colocada la función del mejor ajuste

obtenido por el programa de los tiempos de mantenimiento de falla de la data ingresada así como sus diversos parámetros que la definen. Estos ajustes son mostrados gráficamente en la parte inferior de la ventana pero es necesario hacer “click” previamente en el botón “I” con la finalidad de cargar las gráficas con los datos mostrados en la parte superior. Normalmente las gráficas muestran la función densidad pero en la parte inferior derecha se muestra un cuadro donde es posible seleccionar la función acumulada de cada una de las gráficas con el objetivo de brindar mayor información de la evaluación.

Renovación con Parámetros:

Este modelo presenta el mismo principio y es tratado de igual forma que el anterior a diferencia que las funciones de confiabilidad y mantenibilidad no son obtenidas a través de ajustes de datas históricas sino que son asignadas por el usuario directamente, por tal motivo es necesario ciertos conocimientos acerca de las diversas funciones estadísticas con las que trabaja el programa. El procedimiento es muy sencillo, se debe seleccionar una función por medio del menú desplegable que se encuentra ubicado dentro del cuadro de confiabilidad, luego se habilitarán los diversos parámetros necesarios para definir la función seleccionada; el mismo procedimiento se debe efectuar para ingresar los datos necesarios de mantenibilidad.

Al igual que la ventana anterior, estos ajustes son mostrados gráficamente en la parte inferior de la ventana pero es necesario hacer “click” previamente en el botón “I” con la finalidad de cargar las gráficas con los datos ingresados en la parte superior. Normalmente las gráficas muestran la función densidad pero en la parte inferior derecha se muestra un cuadro donde es posible seleccionar la función acumulada de cada una de las gráficas con el objetivo de brindar mayor información de la evaluación (véase en la figura anexo 9).

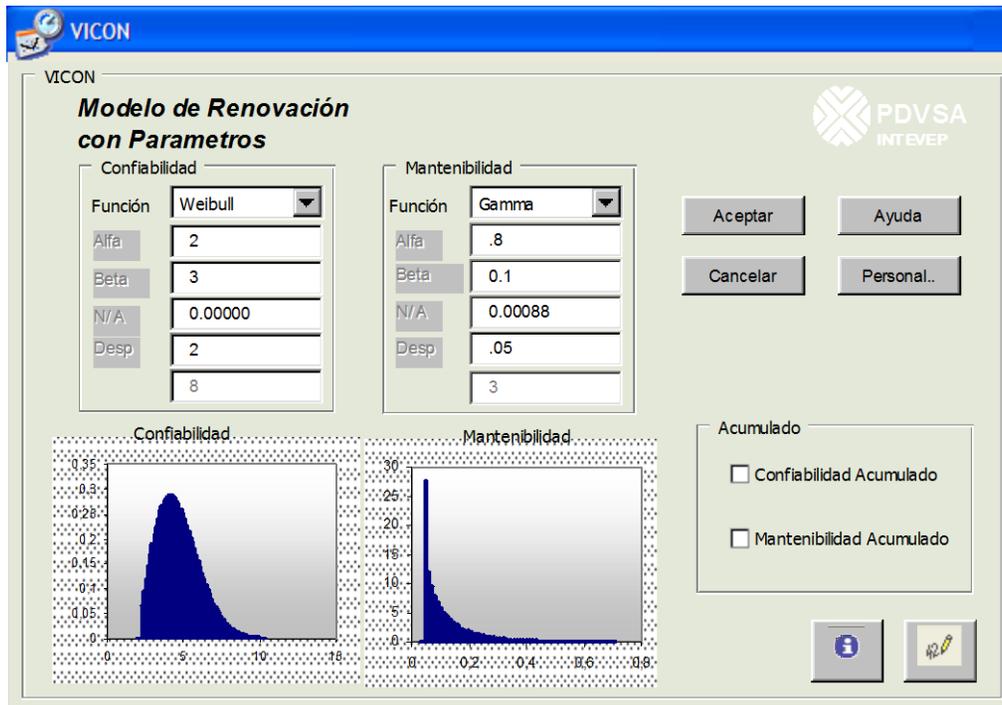


FIGURA ANEXO 9 - Ventana de los Modos de Falla con Modelos de Renovación con Parámetros.

Este modelo por lo general debe ser utilizado cuando se presente un modo de falla de renovación y no se disponga de una data histórica confiable que por el contrario pueda traer errores significativos en la evaluación.

Deterioro con Histórico:

Este modelo asume un proceso degenerativo del activo a medida que se presenta la falla, es decir que una falla está condicionada por las anteriores y en términos de confiabilidad se dice que es un proceso con memoria. Por lo tanto el mismo se va deteriorando con el tiempo y la probabilidad de ocurrencia de una falla es cada vez mayor. Este modelo es utilizado para tratar fallas que cumplen con un proceso de deterioro en el tiempo y por lo general son aquellas que implican alguna reparación o mantenimiento pero no cambio de pieza.

La figura anexo 10 muestra la ventana donde son tratados los modos de falla con un modelo de deterioro con histórico. A continuación se explicará de manera detallada todo el procedimiento a seguir para ingresar los datos necesarios de ser seleccionado este modelo:

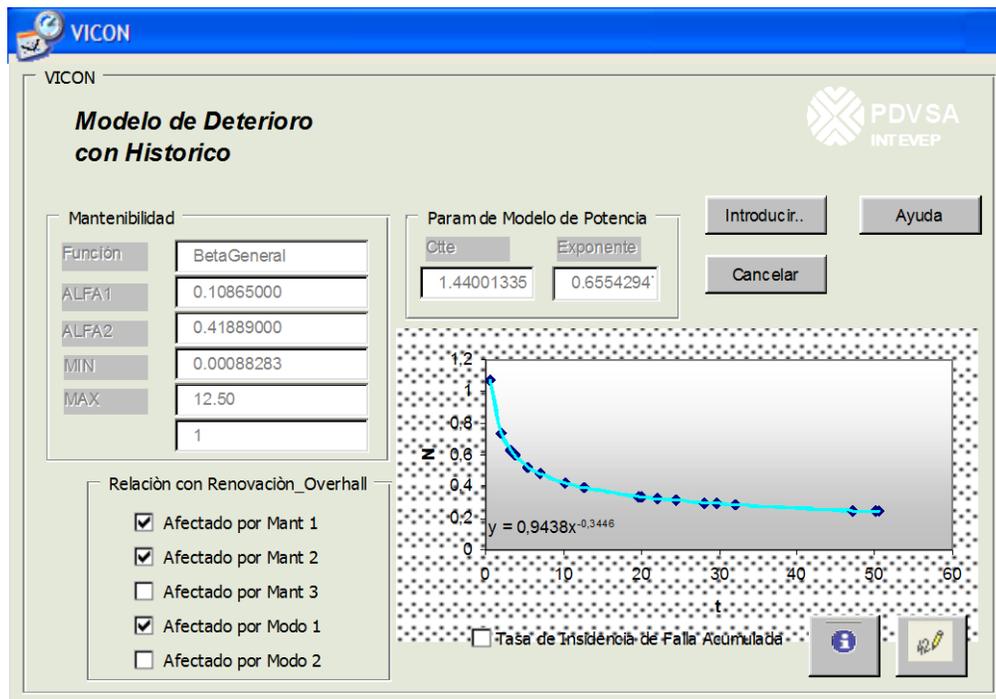


FIGURA ANEXO 10 - Ventana de los Modos de Falla con Modelo de Deterioro con Histórico.

Para utilizar este modelo es necesario contar con una data histórica de la falla, ya sea preferiblemente del activo o de algún otro que siga un mismo patrón de conducta. Dicha data debe ser ingresada en una hoja de cálculo a la que se tendrá acceso haciendo “click” en el botón “ Introducir”, de esta manera aparecerán dos columnas en donde a la izquierda se deben colocar los datos de tiempos operativos y a la derecha los datos de tiempos fuera de servicio. Luego de aceptar se llega nuevamente a la ventana donde es tratado este modelo de deterioro con histórico, la misma brinda información importante del modo de falla para el usuario.

El cuadro denominado mantenibilidad es utilizado para mostrar al igual que el modelo anterior de renovación con histórico los datos de mantenimiento. Como fue mencionado anteriormente los tiempos operativos son tratados bajo el criterio de un proceso degenerativo por lo tanto esta ventana los trata con un modelo de potencia, cuya función es obtenida partiendo de la data histórica. A su derecha se encuentra un cuadro

denominado parámetros del modelo de potencia, en donde se pueden observar los dos coeficientes que definen la función acumulada. La gráfica que se observa muestra la tasa de incidencia en el tiempo pero en la parte inferior derecha se muestra un cuadro donde es posible seleccionar la función acumulada con el objetivo de brindar mayor información de la evaluación.

Estos procesos degenerativos por lo general se ven interrumpidos como consecuencia de algunos mantenimientos mayores e inclusive de algunos otros modos de falla que cumplan con un proceso de renovación. Por esta razón y con el fin de obtener los mejores resultados en la evaluación esta ventana permite seleccionar cual o cuales de los mantenimientos mayores y cual o cuales de los modos de falla tratados con un modelo de renovación reinician el proceso degenerativo del modo tratado.

Es importante mencionar que los modos de falla de renovación capaces de reiniciar este modo tratado con un modelo de deterioro pueden ser un máximo de dos y deben ser colocados en las dos primeras opciones de la página principal de modos de fallas. En la parte inferior izquierda de la figura anexo 8 se realizan las selecciones mencionadas en los párrafos anteriores.

Deterioro con Parámetros:

Este modelo presenta el mismo principio y es tratado de igual forma que el anterior a diferencia que la función de mantenibilidad no es obtenida a través de ajuste de data histórica sino que es asignada por el usuario directamente, por tal motivo es necesario ciertos conocimientos acerca de las diversas funciones estadísticas con las que trabaja el programa. El procedimiento es muy sencillo, se debe seleccionar una función por medio del menú desplegable que se encuentra ubicado dentro del cuadro de mantenibilidad, luego se habilitarán los diversos parámetros necesarios para definir la función seleccionada.

Los tiempos operativos son tratados bajo el criterio de un proceso degenerativo por lo tanto esta ventana los trata con un modelo de potencia, cuya función es obtenida de dos maneras. La primera, parte de la construcción de la curva de la bañera y sus diversos

parámetros de forma son ingresados en el cuadro denominado “Parámetros de forma” como se puede observar en la ventana de la figura anexo 11, el mismo cuadro presenta una segunda opción en donde se asigna directamente los dos parámetros necesarios para la construcción de una función potencial de incidencia de falla a lo largo del ciclo de vida.

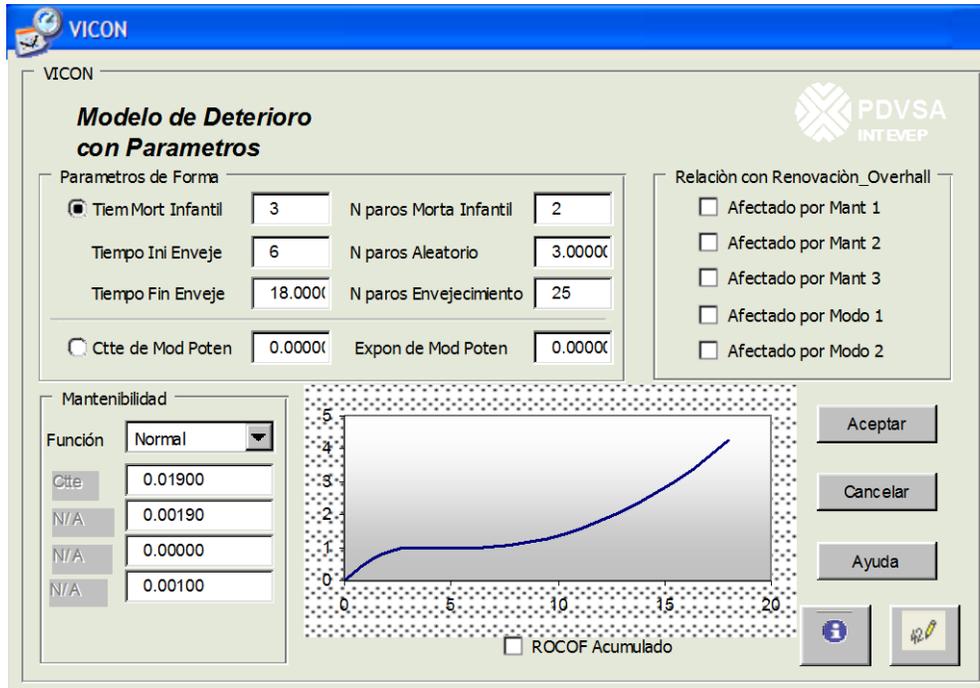


FIGURA ANEXO 11 - Ventana de Modelo de Deterioro con Parámetros.

Las demás opciones de la ventana donde es tratado este modelo de deterioro con parámetros tienen el mismo comportamiento que las opciones de la ventana del modelo de deterioro con histórico por lo tanto no se explicarán nuevamente.

Resultados de Simulación de Ciclo de Vida

En esta ventana se muestran todos los resultados obtenidos de la evaluación luego de haber concluido la corrida y es de vital importancia una buena interpretación de los mismos para toma de decisiones. La ventana muestra una gran diversidad de información, por lo tanto a continuación se explicará detalladamente sus diversos cuadros de resultados y botones de opciones que en ella se presentan.

En la figura anexo 12 podemos observar la ventana “**Resultados de simulación de ciclo de vida**”, en ella se encuentran varias selecciones importantes para la interpretación de los resultados. El cuadro superior derecho denominado “Tipo de evaluación” muestra dos opciones para presentar los resultados de la evaluación, estas deben ser seleccionadas por criterio del usuario según sea el tipo de evaluación y el tipo de información esperada. Una primera opción llamada “Equivalente Anual” muestra el valor presente anual equivalente hasta el año “N”, en esta opción se evalúa la eficiencia económica del sistema y una segunda opción llamada “Presente neto” refleja el flujo de caja neto en el año “N”, en esta opción se evalúa el momento en el cual el activo comienza a generar pérdidas económicas.

En la parte inferior del cuadro mencionado anteriormente se muestra el cuadro denominado “Valores de”, cuya finalidad es proporcionar los resultados de la evaluación en función de su moda, lo cual no es más que los valores de costos anualizados con mayor número de ocurrencia obtenidos de la simulación; también presenta la opción de mostrar los valores de los costos anualizados en función de un valor promedio obtenido de todos aquellos posibles valores que arrojó la simulación.

Estos costos anualizados pueden ser visualizados en la tabla que se muestra en la parte central de la ventana tratada, donde se refleja el costo más probable o el costo promedio (según sea la selección del cuadro “Tipo de evaluación”) para cada año durante el ciclo de vida y se muestra con un asterisco el menor valor durante el ciclo de vida que puede tener varias interpretaciones según sea la selección.

Estos resultados también son mostrados de forma gráfica en la parte superior derecha de la ventana tratada, mostrándose la moda y media (Gráficas azul oscuro y azul claro) con la finalidad de visualizar la tendencia de las diversas curvas que puede mostrar el programa.

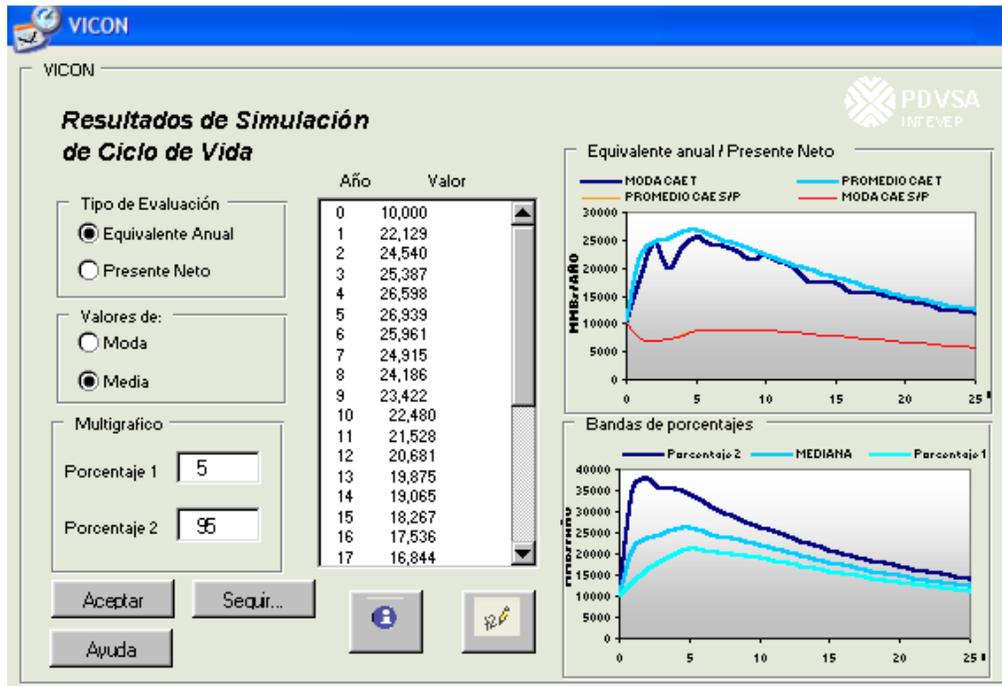


FIGURA ANEXO 12 - Ventana de Resultados de la Simulación del Ciclo de Vida.

En ella se muestra también información de los costos debido únicamente a las diversas reparaciones tanto de mantenimiento rutinario como de mantenimientos correctivos, indicando su moda y su media (Gráficas roja y naranja), solo que estas por lo general presentan un comportamiento muy similar y no se pueden diferenciar a simple vista.

La diferencia entre los costos totales y los costos por reparación indican el costo de penalización por pérdida de producción como consecuencia de los modos aleatorios de falla; significando esta banda oportunidades de mejoras para el activo.

En la parte inferior izquierda se muestra un cuadro denominado “Multigráfico” que permite obtener dos curvar del análisis LCC en función de su probabilidad de ocurrencia con el fin de establecer una banda de posibles escenarios de la evaluación, los límites de esta banda son ingresados en forma porcentual y por lo general indican el mejor y peor escenario posible en el análisis. Esta banda se puede observar a través de la gráfica mostrada en la parte inferior derecha denominada “Bandas de porcentajes”.

En esta ventana aparece un botón nuevo llamado “Seguir” que permite al usuario continuar con otro número de iteraciones de no llegar a observar en las gráficas un buen nivel de convergencias o si por criterio del usuario se desea continuar para ver si ocurre algún cambio en el comportamiento de la evaluación. Al hacer “click” en este botón aparecerá un cuadro preguntando el número de iteraciones que desea incrementar en la evaluación, luego de aceptar el programa terminará de correr las iteraciones restantes y se mostrará de nuevo la ventana de resultados.

**POSIBLES ESCENARIOS DE UN ANÁLISIS LCC REALIZADOS CON EL
PROGRAMA VICON**

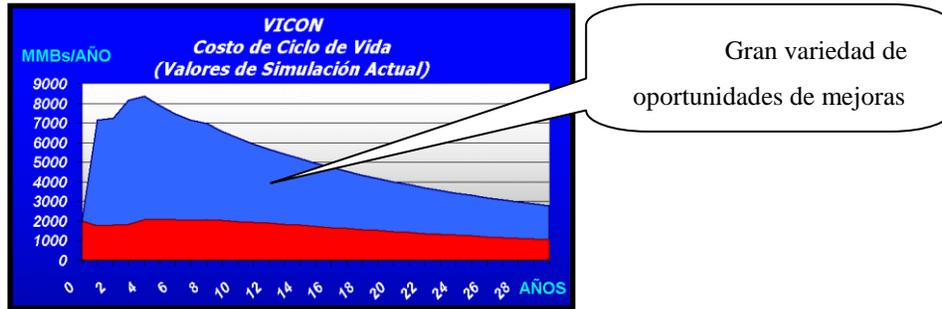


FIGURA ANEXO 13 – Primer Escenario

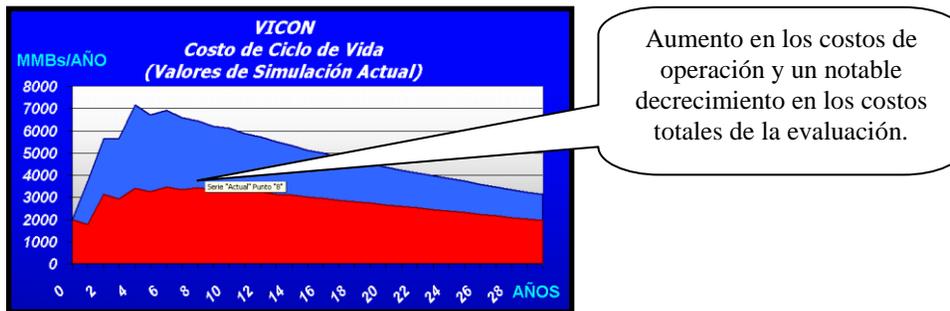


FIGURA ANEXO 14 – Segundo Escenario

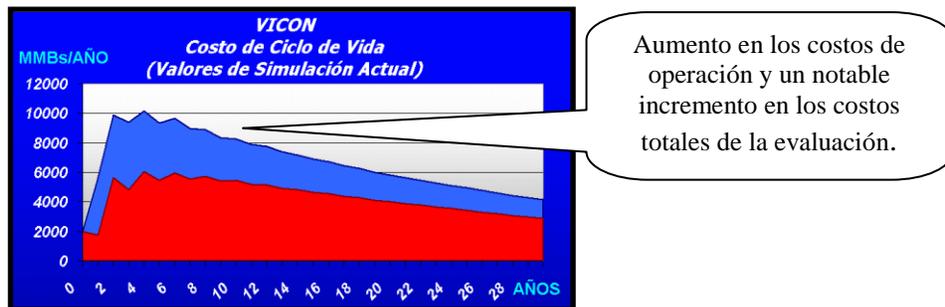


FIGURA ANEXO 15 – Tercer Escenario