

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE PROYECTOS DE INVERSIÓN DE CAPITAL BASADO EN ASPECTOS DE CONFIABILIDAD

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Castillo A., Henry J.
para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE PROYECTOS DE INVERSIÓN DE CAPITAL BASADO EN ASPECTOS DE CONFIABILIDAD

TUTOR ACADÉMICO: Ing. Alfonso Quiroga.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Alberto S. Windmüller.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Castillo A., Henry J.
para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

Castillo A. Henry J.

**MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE
PROYECTOS DE INVERSIÓN DE CAPITAL BASADO EN
ASPECTOS DE CONFIABILIDAD**

Tutor Académico: Prof. Alfonso Quiroga. Tutor Industrial: Ing. Alberto Windmüller. Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2002. 254 págs.

Palabras Claves: Diseño, Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad.

RESUMEN

El objetivo primordial de la tesis es proponer un manual de procedimientos para el desarrollo de proyectos de inversión de capital, para la reestructuración de instalaciones, y el reemplazo óptimo de equipos. Este manual está basado en metodologías de confiabilidad para el diseño, así como aspectos que involucran a la mantenibilidad en el diseño. Con este manual se pretende obtener una instalación confiable desde el diseño, mejorar el rendimiento de las mismas a través de una reestructuración, complementándolo con la mejor opción de reemplazo de equipos. La misión es buscar la máxima utilización del activo (UA), caracterizada a través de sus beneficios económicos. Para validar parte del manual se hizo una evaluación y reestructuración de la unidad de alquiler del Centro de Refinación Paraguaná, a través del software Raptor. Con este ejercicio se demostró la capacidad de la herramienta en el diseño, y reestructuración de instalaciones. Luego también se verificó la metodología de optimización de reemplazos de equipos, en un caso didáctico, a través del programa ECCVA, el cual fue desarrollado como herramienta que permite aplicar el modelo económico propuesto.

DEDICATORIA

Este trabajo fundamental para mi formación como profesional y como persona, me permitió por sobre todas las cosas aprender de los demás, escuchar muchos puntos de vistas, y que existe un espacio sin fin en conocimientos desconocidos por mí. En la medida en que he ido descubriendo cosas, los límites de mi mundo se van expandiendo cada vez más, y más, y en la medida en que voy experimentando esto me que tengo muchas cosas por aprender. Por todo esto y por los beneficios que me trajo este trabajo se lo dedico:

A Dios por ser mi amigo y por ayudarme a conseguir lo que me he propuesto.

A mis padres Henry y María quienes son los seres que más amo, quienes me apoyaron incondicionalmente en todo momento, y que deseo transmitirles mis satisfacciones.

A mis hermanos porque deseo darles un ejemplo de trabajo y dedicación.

Y a mi novia Yusmari porque es una persona especial que con cariño me ha hecho una persona más optimista, y me enseñó que hay que trabajar bastante para lograr las metas.

AGRADECIMIENTOS

Para empezar agradezco inmensamente a Dios por ser el que me ha cuidado y ayudado al logro de mis objetivos a lo largo de mi vida.

Expreso una alta gratitud al Ing. Alberto Windmueller quien me apoyó en todo momento, y que me enseñó a ser constante en el trabajo para obtener un buen producto final.

Al profesor Alfonso Quiroga muchas gracias por apoyarme y estar pendiente de la tesis.

También agradezco mucho el apoyo y atención recibida por parte de los ingenieros Carlos Parra, Antonio Álvarez, Carlos Barrueta, y demás integrantes del grupo de confiabilidad de Intevp quienes me ayudaron incondicionalmente durante el desarrollo del proyecto.

Y le agradezco mucho al Ing. Jose Luis Kum quien medió la oportunidad de trabajar en el proyecto, y por su atención y apoyo recibido en el momento en que lo necesité.

A todos muchas gracias!!!

ÍNDICE GENERAL

	pp.
RESUMEN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
LISTA DE ANEXOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I **PROCESO DE EJECUCIÓN DE PROYECTOS Y DEFINICIÓN DE LAS** **METODOLOGÍAS A UTILIZAR**

1.1	Definición de las Fases del Proceso de Ejecución de Proyectos	4
1.2	Confiabilidad desde la Fase de Diseño	7
1.3	Confiabilidad Operacional	7
1.4	Metodologías de Confiabilidad Operacional	10
1.4.1	Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LCC)	10
1.4.2	Modelos Basados en Riesgo (MBR)	19
1.4.3	Análisis de Costo - Riesgo - Beneficio (ACRB)	24
1.4.4	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)	24
1.4.5	Inspección Basada en Riesgo (IBR)	29
1.4.6	Análisis de Criticidad (AC)	29
1.4.7	Análisis Causa Raíz (ACR)	31
1.4.7.1	Árbol de Falla	33

CAPÍTULO II **DISEÑO PARA CONFIABILIDAD**

2.1	Definición de Confiabilidad a través de elementos que influyen en la misma	35
2.2	Indicadores de Confiabilidad	
2.2.1	Función Confiabilidad	36
2.2.2	Tasa de Falla	37
2.2.3	Relación de Confiabilidad en los Componentes	38

2.2.4	Factores Relacionados	41
2.2.4.1	Tiempo Medio entre Mantenimiento (TMEM)	42
2.2.4.2	Disponibilidad (A)	42
2.3	Predicción de la Confiabilidad	43
2.4	Confiabilidad en el ciclo de vida de los sistemas (Consideraciones en Fases del Diseño)	45

CAPÍTULO III

PAUTAS PARA CONSIDERAR MANTENIBILIDAD EN EL DISEÑO

3.1	Definición de Mantenibilidad	47
3.2	Indicadores de la Mantenibilidad	48
3.2.1	Factores de Tiempo utilizados para el Mantenimiento	49
3.2.1.1	Tiempo Medio para Mantenimiento Correctivo (\overline{M}_{ct})	49
3.2.1.2	Tiempo Medio para Mantenimiento Preventivo (\overline{M}_{pt})	51
3.2.1.3	Tiempo Medio para Mantenimiento Eficaz (\overline{M})	52
3.2.1.4	Tiempo por Demoras Logísticas (LDT)	52
3.2.1.5	Tiempo por Demoras Administrativas (ADT)	53
3.2.1.6	Tiempo Fuera de Servicio por Mantenimiento (MDT)	53
3.2.2	Factores de Horas Laboradas de Mantenimiento	53
3.2.3	Factores de Frecuencia de Mantenimiento	54
3.2.4	Factores de Costo para Mantenimiento	55
3.2.5	Relaciones entre Factores de Mantenimiento	56

CAPÍTULO IV

TÉCNICAS PARA DESARROLLAR ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

4.1	Técnicas Predictivas	59
4.1.1	Beneficio	59
4.1.2	Importancia de la Técnica	60
4.1.3	Descripción de la Técnica para mantenimiento predictivo	60
4.1.4	Métodos para la Estimación de Confiabilidad usados en las Técnicas Predictivas	66
4.1.4.1	Análisis Carga-Resistencia	67
4.1.4.2	Estimación de la Confiabilidad basada en la Condición	68
4.2	Técnicas Preventivas	69
4.2.1	Programa de Mantenimiento Preventivo	69
4.2.2	Elementos del Programa de Mantenimiento Preventivo	71
4.2.3	Paquete de Tares para Mantenimiento Preventivo	72
4.2.4	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad	73

4.2.4.1	Preservar Funciones del Sistema	73
4.2.4.2	Identificar Modos de Fallas que puedan producir fallas funcionales no deseadas	74
4.2.4.3	Establecer Priorización de Modos de Fallas	74
4.2.4.4	Evaluación de las tareas de mantenimiento preventivo en base a su pertinencia y efectividad	74
4.2.4.5	Consideraciones de Costo – Beneficio	75
4.3	Paradas de Plantas	75
4.4	Optimización de Inventarios	76
4.5	Inspección	77
4.6	Predicción del Tiempo medio para Reparar (TPPR)	77
4.6.1	Definición del Tiempo Promedio para Reparar	78
4.6.2	Distribución Log-Normal	79
4.6.3	Implementación del TPPR	80
4.6.4	Elementos de TPPR	81
4.6.5	Establecer reglas y suposiciones	82
4.6.6	Nivel de Predicción del Sistema	82

CAPÍTULO V

MODELO ECONÓMICO PARA LA EVALUACIÓN DE ACTIVOS

(Manual del programa ECCVA)

5.1	Introducción al programa ECCVA	84
5.2	Inicio del programa	85
5.2.1	Pantalla de llenado de datos	86
5.2.2	Pantalla para el Costo Anual Equivalente (CAE)	91
5.2.3	Pantalla para el Valor Presente Neto (VPN) y el Valor Presente Anual (VPA)	93
5.2.4	Detalle del Mantenimiento Preventivo, el Mantenimiento Correctivo, y las Penalizaciones en gráficos de barras	94
5.3	Llevar la data a la Base de Datos del programa, y Almacenarla en un archivo (*.xls)	95

CONCLUSIONES	97
---------------------	-----------

RECOMENDACIONES	98
------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA	101
---------------------	------------

ANEXOS

Anexo A	104
Anexo A-1	105

Anexo A-2	194
Anexo A-3	200
Anexo B	213
Anexo C	250

ÍNDICE DE FIGURAS

N°		Pág.
1	Parámetros involucrados en Confiabilidad	8
2	Agrupación típica de Instalación	9
3	Costo del Ciclo de Vida	11
4	Estructuración de Riesgo	20
5	Distribución Probabilística	21
6	Modelo de Decisión	23
7	Modelo Costo-Riesgo- Beneficio	24
8	Modelo de Criticidad	30
9	Circuito en Serie	39
10	Circuito en Paralelo	39
11	Curva Clásica de la Bañera	40
12	Ciclo de mantenimiento correctivo	49
13	Relaciones entre el tiempo fuera de servicio y los factores logísticos	58
14	Modelo de Interferencia de Carga – Resistencia	67
15	Desarrollo/Mejoramiento de un Programa de Mantenimiento Preventivo	70
16	Distribución Log-Normal	79
17	Presentación del Programa	85
18	Módulo de “Selección del Activo”	86
19	Módulo de “Producción de la Instalación”	86
20	Módulo de “Factores Económicos”	87
21	Módulo de “Costo Inicial de la Inversión”	87
22	Módulo de “Costo de Operación”	88
23	Módulo correspondiente al Mantenimiento Preventivo	88
24	Módulo para caracterizar los eventos que producen indisponibilidad	89
25	Módulo del Costo Total por evento para el Mantenimiento Correctivo	89
26	Módulo para llenar los costos asociados a cada evento	90

27	Módulo del “Costo por Penalizaciones”	91
28	Módulo asociado al “Costo de Desincorporación”	91
29	Gráfico del Costo Anual Equivalente	92
30	Gráfico del Valor Presente Neto y el Valor Presente Anualizado para el activo en estudio	93
31	Gráfico del Mantenimiento Correctivo detallado por eventos	94
32	Lista de los años para seleccionar el año i a ingresar la data	95
33	Módulo para cambiar de pantalla, guardar la data en archivos, y cargar archivos almacenados	96
34	Cuadro de Diálogo por ingresar incorrectamente el nombre del archivo	96
35	Metodología para la reestructuración de instalaciones	198
36	Metodología para la optimización de selección/reemplazo de equipos	202
37	Resultados de la evaluación para el subsistema-3	216
38	Resultados de la evaluación para el subsistema-6	216
39	Resultados de la evaluación para el subsistema-9	217
40	Simulación del subsistema-3 para 4 años y 100 corridas	217
41	Resultados para la simulación de una falla en el subsistema-3	218
42	Impacto del primer escenario en la unidad de alquiler	218
43	Resultados de la simulación del segundo escenario para 4 años y 100 corridas	220
44	Simulación del segundo escenario para una falla en el subsistema-3	220
45	Simulación del segundo escenario en la unidad de alquiler para 4 años y 100 corridas	221
46	Simulación del sistema de bombeo del rehervidor de la torre despojadora para 4 años y 100 corridas	222
47	Simulación del sistema de bombeo del rehervidor de la torre despojadora para una falla	223
48	Simulación del sistema de bombeo de reciclaje de isobutano para 4 años y 100 corridas	223

49	Simulación del sistema de bombeo de reciclaje de isobutano para una falla	224
50	Simulación del sistema de bombeo de condensado del rehervidor de la torre desisobutanizadora 4 años y 100 corridas	224
51	Simulación del sistema de bombeo de condensado del rehervidor de la torre desisobutanizadora para una falla	225
52	Simulación de redundancia en el sistema de bombas de reciclaje de isobutano para el subsistema-6	226
53	Resultados para la simulación de una falla del caso A	226
54	Simulación de redundancia en el sistema de bombas del rehervidor de la torre despojadora para el subsistema-6	227
55	Resultados de la simulación de una falla para el caso B	227
56	Resultados de la simulación del caso A en la unidad de alquilación	228
57	Resultados de la simulación del caso B en la unidad de alquilación	229
58	Simulación del segundo escenario para el subsistema-6	231
59	Resultados para la simulación de una falla en el segundo escenario	231
60	Resultados de la simulación del segundo escenario para la unidad de alquilación	232
61	Simulación del sistema de bombeo del asentador de ácido para 4 años y 100 corridas	234
62	Simulación del sistema de bombeo del asentador de ácido para una falla	234
63	Simulación del sistema de bombeo de carga de la torre depropanizadora para 4 años y 100 corridas	235
64	Simulación del sistema de bombeo de carga de la torre depropanizadora para una falla	235
65	Simulación del sistema de bombeo de sobrecarga de la torre depropanizadora para 4 años y 100 corridas	236
66	Simulación del sistema de bombeo de sobrecarga de la torre depropanizadora para una falla	236

67	Simulación del sistema de bombeo de vaciado de alquilerato para 4 años y 100 corridas	237
68	Simulación del sistema de bombeo de vaciado de alquilerato para una falla	237
69	Simulación del sistema de bombeo de fondo de la torre depropanizadora para 4 años y 100 corridas	238
70	Simulación del sistema de bombeo de fondo de la torre depropanizadora para una falla	238
71	Simulación del Caso A: Redundancia agregando una bomba al sistema de bombeo de carga a la torre depropanizadora	239
72	Simulación del Caso A para una falla	240
73	Simulación del Caso B: Redundancia agregando una bomba al sistema de bombeo de sobrecarga a la torre depropanizadora	240
74	Resultados para la simulación de una falla del Caso B	241
75	Resultados de la simulación para el caso A en la unidad de alquileración	241
76	Resultados de la simulación para el caso B en la unidad de alquileración	242
77	Simulación del segundo escenario para el subsistema-9	244
78	Simulación del segundo escenario para una falla	245
79	Resultados de la simulación del segundo escenario para la unidad de alquileración	245
80	Resultados de la simulación del tercer escenario para la unidad de alquileración	247
81	Resultados de la simulación del tercer escenario para una falla de la unidad de alquileración	248

LISTA DE ANEXOS

- A** Manual de procedimientos para el diseño de proyectos de inversión de capital basado en aspectos de confiabilidad
- B** Informe de evaluación y reestructuración de la unidad de alquiler del Centro de Refinación Paraguaná
- C** Glosario de términos

INTRODUCCIÓN

El creciente mundo industrial en un ambiente de globalización y las exigencias de los mercados en calidad de los productos y servicios, ha generado una mayor atención y dedicación en la planificación inteligente y temprana para alcanzar los objetivos deseados en el producto y funcionalidad de la instalación. Por lo tanto, para ser más competitivos hay que conseguir la mayor rentabilidad de la instalación, de manera, de obtener la mayor utilización del activo. Aumentar la rentabilidad de la instalación, o en general del negocio, significa maximizar el valor del dinero invertido (optimizando costos) durante el ciclo de vida del proyecto. Para lograr esto se deben aplicar los conceptos, metodologías y procedimientos de confiabilidad desde las fases del diseño, y no limitarla a la etapa de construcción y operación. Se debe considerar metas de confiabilidad y disponibilidad como objetivos a conseguir en el diseño, y desarrollar las subsiguientes fases considerando aspectos y metodologías que permitan bajos costos del ciclo de vida.

El presente trabajo trata de un manual que apoya el diseño de instalaciones con la aplicación de conceptos, metodologías y lineamientos de confiabilidad desde las fases tempranas de la planificación y diseño del proyecto.

Este manual guía a los encargados de llevar el desarrollo de proyectos a incluir en todo momento el concepto de confiabilidad, como base para el desarrollo de cada fase del diseño de activos, a través de metodologías y lineamientos de confiabilidad operacional.

El objetivo de este manual es satisfacer las metas de confiabilidad y disponibilidad en proyectos de inversión de capital en cada fase del negocio: exploración, producción, manufactura. Es bien conocido que la disponibilidad de un activo es mejorada a través de las prácticas de mantenimiento, calidad de sistemas de detección, diagnósticos rápidos, intervenciones al menor tiempo, destrezas por parte

del personal, disponibilidad de recursos, etc. Todos estos parámetros afectan en gran medida el tiempo fuera de servicio, variables que afectan a la mantenibilidad del activo, y por consiguiente a la disponibilidad. La mejora de la disponibilidad implica una revisión de la confiabilidad de los componentes o equipos que forman parte del sistema; evaluación de los procedimientos operacionales y de las actividades de mantenimiento, de manera de saber si son los más adecuados; evaluación de las habilidades y experiencia del personal, contra la pericia que se requiere; revisión de la logística empleada, etc. De manera que si la organización del mantenimiento no tiene en cuenta éstos puntos a la hora de evaluar su gestión, muy probablemente desempeñarían un mantenimiento muy frecuente y costoso, que conduciría a aumentar moderadamente la disponibilidad pero los beneficios (flujo de caja) anuales no serían satisfactorios.

Es más eficiente desde el punto de vista económico implementar estas metodologías y lineamientos desde la fase de diseño, que es la forma de obtener mayor impacto en el rendimiento de una instalación (beneficios económicos) al menor costo del ciclo de vida. Por lo tanto, se debe integrar todas estas disciplinas a través de un manual que permita guiar la implementación en un proyecto de inversión de capital.

El trabajo se inicia con una descripción de las fases de desarrollo de proyectos, y las metodologías que de alguna manera se van a implementar en dichas fases (Capítulo I). Las fases de desarrollo de proyectos se describirán de una manera sencilla, en vista de que se van a desarrollar completamente en el manual de procedimientos propuesto, mientras que las diferentes metodologías de la confiabilidad operacional serán descritas más a fondo, en vista de que serán citadas en el manual.

Una vez dado el preámbulo general, se presentará un estudio de la confiabilidad y los parámetros que permite implementarla en el diseño (Capítulo II). Estos parámetros se definirán a través de elementos que influyen en la confiabilidad, medidores de la confiabilidad, predicción de confiabilidad, y consideraciones a realizarse para aplicar confiabilidad en las fases del diseño.

Luego se definirá la mantenibilidad como parámetro importante a considerar en el diseño, los aspectos involucrados en el diseño basado en mantenibilidad, y evaluación de este parámetro (Capítulo III). En este capítulo comprende de una manera bastante completa, la forma de considerar mantenibilidad en el diseño del proyecto a concretarse en las fases de desarrollo.

Posteriormente se describen las técnicas y estrategias para diseñar el mantenimiento, las cuales constituirán las bases de su futura gestión (Capítulo IV). De esta manera se planifica y se prevee la logística necesaria para emprender el mantenimiento, que constituye el soporte para mantener operativa la instalación, en dicho proyecto.

A continuación se presentará un manual para la descripción y manejo del programa ECCVA (Capítulo V), que permitirá el uso eficiente del mismo y su potencialidad.

En los anexos se presenta el “Manual de Procedimientos para el Diseño de Proyectos de Inversión de Capital basado en aspectos de Confiabilidad” propuesto (Anexo A). Un informe de evaluación de la Unidad de Alquiler del Centro de Refinación Paraguaná, a través del software “Raptor” como apoyo para validar parte del capítulo I, y totalmente el capítulo II del manual propuesto (Anexo B). Y por último, se facilitará un glosario de términos (Anexo C).

El manual se va a constituir en tres (3) capítulos como son: Diseño de una instalación (Capítulo I), Reestructuración de una Instalación (Capítulo II), y Optimización de Reemplazo Total o Parcial de Equipos (Capítulo III). En cada capítulo se presentará en detalles los lineamientos y metodologías a seguir de cada uno de los tres escenarios planteados.

Seguidamente se presentará un capítulo para las conclusiones, otro para las recomendaciones, y por último las referencias bibliográficas.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.- FASES DE EJECUCIÓN DE PROYECTOS Y DEFINICIÓN DE LAS METODOLOGÍAS A UTILIZAR

1.1 Definición de las fases de ejecución del proyecto

Visualización

Los proyectos se generan siempre que se desea satisfacer alguna necesidad de producción o refinación, ya sea de forma directa o para apoyar a otras instalaciones en estas áreas. Para empezar se realiza un análisis del ambiente externo e interno de la corporación o análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) el cual es parte de todo ciclo de planificación. De esta manera se determina la factibilidad económica para emprender el negocio.

En esta fase se deben satisfacer los siguientes puntos esenciales:

- Establecer los objetivos y propósitos del proyecto.
- Verificar la alineación de los objetivos del proyecto con las estrategias corporativas.
- Realizar el desarrollo preliminar del proyecto.
- Definir el Alcance del proyecto a través de la capacidad de producción de la instalación para el cumplimiento con las necesidades del mercado.
- Establecer la meta de disponibilidad mínima para cumplir con la producción propuesta como meta en un período de tiempo determinado.

- Establecer la meta de confiabilidad deseada según lineamientos de la gerencia, y la planificación de la frecuencia de paros mayores.
- Establecer factores del Costo del Ciclo de Vida como parámetros importantes a cumplir.

Conceptualización

En esta fase el nivel de desarrollo del diseño es más profundo, en vista de que se han establecido los objetivos principales al proyecto, y se tienen los lineamientos descritos. El propósito de esta fase es la de seleccionar la(s) mejor(es) opciones, mejorar la precisión de los estimados de costos y el tiempo de implantación y de esta manera reducir la incertidumbre, cuantificar los riesgos asociados y determinar el valor esperado para la(s) opción(es) seleccionada(s).

En esta fase se deben cumplir los siguientes objetivos:

- ❑ Organizar la fase de planificación del proyecto.
- ❑ Desarrollar varios diseños del sistema de forma más específica.
- ❑ Seleccionar la(s) opción(es) preferida(s) y solicitar los fondos para ejecutar las actividades que permitan obtener un estimado de costo Clase II.

Definición

El propósito de esta fase es desarrollar en detalle el alcance y los planes de ejecución de la opción seleccionada durante la fase de Conceptualización, a fin de obtener el financiamiento requerido para ejecutar el proyecto, preparar la documentación que sirva de base para la ingeniería de detalle, la contratación para la ejecución del proyecto y confirmar si el valor esperado del proyecto cumple con los objetivos del negocio.

La fase de Definición debe satisfacer tres objetivos principales:

- Desarrollar el paquete de definición del proyecto.
- Establecer el proceso de contratación y el documento de solicitud de ofertas (DSO).
- Preparar el paquete para autorización del proyecto.

Implantación

En esta fase, es cuando se materializa el proyecto. Esta fase comienza una vez que se haya realizado una evaluación del estado de completación (grado de definición FEL) de la fase de Definición. La meta de esta fase es la contratación y materialización del plan de ejecución del proyecto hasta la completación mecánica. Las contrataciones se realizan según lo establecido en la fase de definición, para cubrir con las diferentes actividades asociadas a la materialización. La ejecución se realiza de acuerdo a los procedimientos y/o manuales desarrollados en la fase de definición.

Operación

En esta fase la instalación es puesta en marcha para la generación de los ingresos, en donde su operación, mantenimiento y control se lleva a cabo según lo establecido en las fases previas. Para garantizar el correcto funcionamiento (desempeño), evitar fallas críticas y conocer el estatus de la instalación se debe modelar la misma a través de la evaluación continua de los índices de desempeño, como son: confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad. El modelaje de la instalación nos permite conocer y predecir si la instalación está en capacidad de cumplir con las metas del negocio en años próximos. Y en función de esta evaluación tomar las medidas pertinentes para solventar los posibles problemas.

En los siguientes ítems se va definir la base teórica para este trabajo en función de prácticas, metodologías y lineamientos que son la base de la plataforma de sustentación del manual de procedimientos. El primer concepto fundamental a definir es la confiabilidad desde fase del diseño.

1.2 Confiabilidad desde la fase de diseño

Es la aplicación de conceptos, metas y procedimientos de confiabilidad a lo largo de toda la vida del proyecto, es decir, desde la etapa de Definición y Desarrollo hasta la fase de Desincorporación. La forma de realizar este proceso se desarrolla en el Capítulo II a través de un esquema.

Es por ello que es importante describir las metodologías existentes en confiabilidad que permiten la evaluación continua y mejoramiento del desempeño de una instalación, para lo cual empezaremos por definir la Confiabilidad Operacional.

1.3 Confiabilidad Operacional

Es la capacidad de una instalación o sistema (integrados por procesos, tecnología y gente), para cumplir su función dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico. Es importante puntualizar que en un programa de optimización de Confiabilidad Operacional, es necesario el análisis de los siguientes cuatro parámetros: confiabilidad humana, confiabilidad de los procesos, mantenibilidad de los equipos y la confiabilidad de los equipos.

La variación en conjunto o individual de cualquiera de los cuatro parámetros presentados en la figura 1, afectará el comportamiento global de la confiabilidad operacional de un determinado sistema.

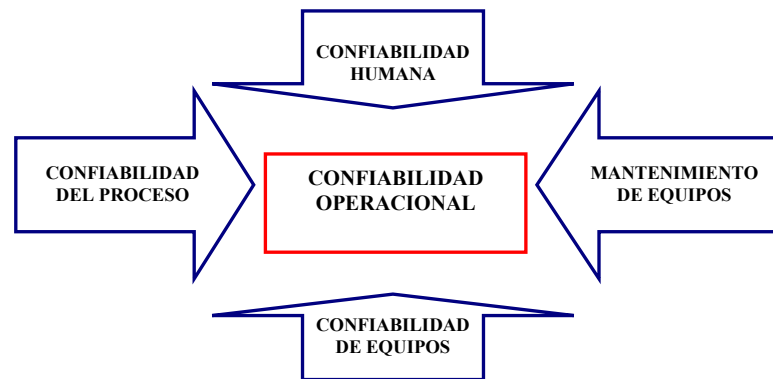


Figura 1. Parámetros involucrados en Confiabilidad.

Para el logro del cumplimiento de los objetivos trazados en mejorar confiabilidad operacional, se definirán la forma de trabajo y las herramientas para el logro de su fin. A continuación se desarrolla el esquema de trabajo de la confiabilidad operacional:

a) Equipos naturales de trabajo

En el contexto de confiabilidad operacional, se define como el conjunto de personas de diferentes funciones en la organización, que trabajan juntas por un periodo de tiempo determinado en un clima de potenciación de energía, para analizar problemas comunes de los distintos departamentos, apuntando al logro de un objetivo común.

En un enfoque tradicional, el concepto de trabajo en equipo comprende un sistema de progresión de carrera que exige a cada nuevo gerente “*producir su impacto individual y significativo al negocio*”. Gerentes rotando en ciclos cortos en diversos campos, creando la necesidad de cambios de iniciativa para “*dejar su huella*”.

Sin embargo, en la cultura de los más exitosos existe afinidad por el trabajo en equipo. Los equipos naturales de trabajo son vistos como los mayores contribuyentes al valor de la empresa, y trabajan consistentemente a largo plazo. Los gerentes guían

a los miembros hacia el crecimiento del equipo y a obtener mejores resultados bajo el esquema “*ganar-ganar*”. Los éxitos del equipo son logros del líder de turno.

b) Jerarquía de activos

Define el número de elementos o componentes de una instalación y/o planta en agrupaciones secundarias que trabajan conjuntamente para alcanzar propósitos preestablecidos. La figura 2 muestra el estilo de agrupación típica de una instalación, donde se observa que la jerarquía de los activos la constituyen grupos consecutivos.

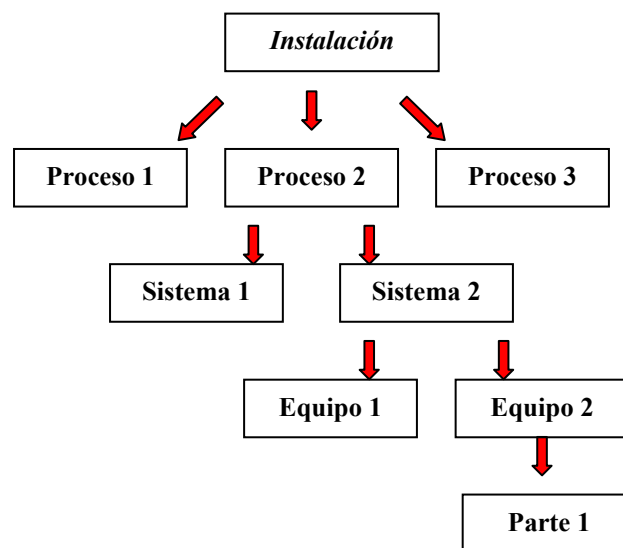


Figura 2. Agrupación típica de Instalación.

Como puede verse en la figura 2, una planta compleja tiene asociada muchas unidades de proceso, y cada unidad de proceso podría contar con muchos sistemas, al tiempo que cada sistema tendría varios paquetes de equipos, y así sucesivamente. A medida que descendamos por la jerarquía, crecerá el número de elementos a ser considerados.

c) Unidades de Proceso

Se define como una agrupación lógica de sistemas que funcionan unidos para suministrar un servicio (ej. electricidad) o producto (ej. gasolina) al procesar y manipular materia prima e insumos (ej. agua, crudo, gas natural, catalizador).

d) Sistemas

Conjunto de elementos interrelacionados dentro de las unidades de proceso, que tienen una función específica. Ej.: Separación de gas, suministrar aire, regeneración de catalizador, etc.

1.4 Metodologías de Confiabilidad Operacional

Entre las metodologías de Confiabilidad Operacional a ser utilizadas para incluirse en el análisis de confiabilidad a aplicarse desde la fase de diseño tenemos:

1.4.1 Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LCC)

1.4.2 Modelos Basados en Riesgo (MBR)

1.4.3 Análisis de Costo - Riesgo - Beneficio (ACRB)

1.4.4 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

1.4.5 Inspección Basada en Riesgo (IBR)

1.4.6 Análisis de Criticidad (AC)

1.4.7 Análisis Causa Raíz (ACR)

1.4.7.1 Árbol de Falla

También se definirá la incertidumbre como parámetro importante a considerar para los modelos y metodologías en la toma de decisión.

1.4.1 Análisis del Costo del Ciclo de Vida (ver aplicación en el anexo A y B)

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 a lo largo de toda la vida de los activos.

En el costo del ciclo de vida se divide en dos etapas que se identifican en la figura 3:

Capex: Abarca todo lo referente con la inversión inicial de capital en la que se incluyen: diseño, desarrollo, adquisición, instalación, desincorporación, etc.

Opex: Se incluyen todo lo referente a gastos operacionales, de mantenimiento y gastos por penalización.

Con el análisis del Costo del Ciclo de Vida se busca elegir la mejor opción a través de un balance entre Capex y Opex.

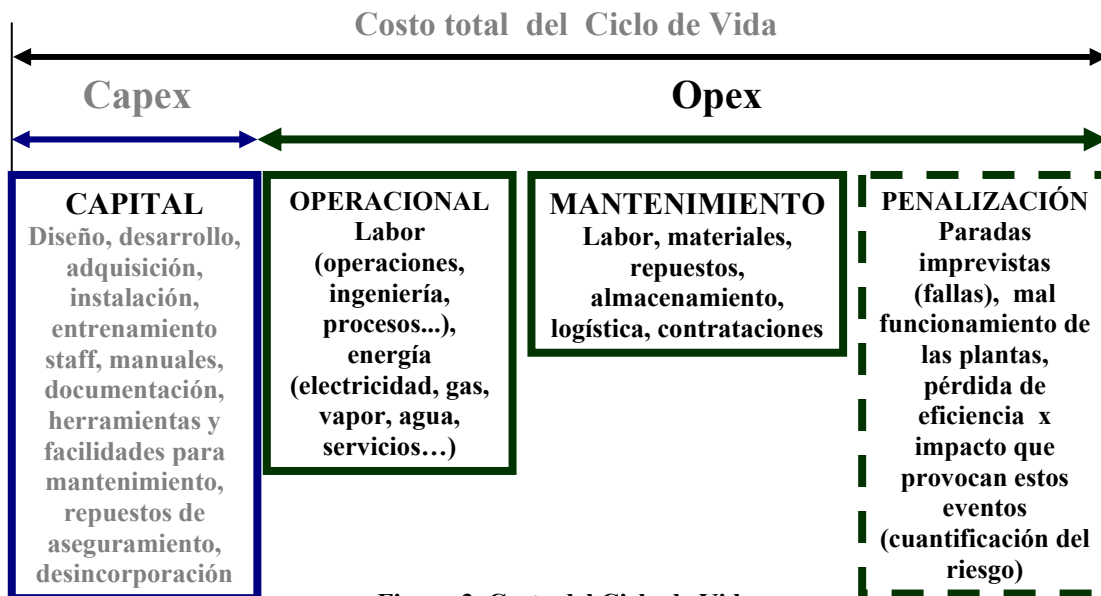


Figura 3. Costo del Ciclo de Vida.

Dentro del proceso de identificación del ciclo óptimo de utilización de los activos, existen muchas decisiones y acciones, tanto técnicas como no técnicas, que se deben adoptar a lo largo del ciclo de vida. Es de interés particular, aquellas decisiones relacionadas con el proceso de mejoramiento de la confiabilidad de los activos (calidad del diseño, tecnología utilizada, complejidad técnica, frecuencia de fallas, costos de mantenimiento preventivo/correctivo, niveles de mantenibilidad y accesibilidad), ya que estos aspectos, tienen un gran impacto sobre el costo total

del ciclo de vida del activo, e influyen en gran medida sobre las posibles expectativas para extender la vida útil de los activos a costos razonables. Por estos motivos, es de suma importancia dentro del proceso de estimación del ciclo de vida de los activos, evaluar y analizar detalladamente los aspectos relacionados con la confiabilidad.

Metodología del Costo del Ciclo de Vida

Los objetivos principales son evaluar y optimizar el costo del ciclo de vida de los activos, mientras se satisfacen los requerimientos específicos de proyectos estructurándose en tres elementos, esto son:

- Costo de Capital.
- Costo de Operación y desincorporación.
- Impacto en generación de ingresos, ej.: debido al fallo o selección de equipos.


El objetivo es habilitar la toma de decisión objetiva entre las opciones, en todas las fases del ciclo de vida de un activo, en la fase temprana de un proyecto. La valoración de los datos de costos, beneficios y riesgos; será necesaria para revisar éstas opciones y así poder tomar decisiones fundamentadas. Se debe realizar un proceso iterativo de revisión para resguardar los objetivos comerciales de la rentabilidad del conjunto del proyecto por encima del ciclo de vida.

Fases de Aplicación en el Proyecto

La aplicación en un proyecto se hace a través de las siguientes fases del ciclo de vida:

- Fase de Visualización (Exploración de ideas).
- Fase de Conceptualización (Preparación del Diseño).
- Fase de Definición.
- Fase de Implementación.

Los costos involucrados en estas cuatro fases son referidas algunas veces como costos de adquisición.

- Fase Operacional (incluye mantenimiento).
 - Fase de Desincorporación o Disposición.
- 
- Frecuentemente referidas a costos de propiedad

Mientras que los costos de propiedad en que se incurre durante las dos últimas fases son menos visibles que los costos de adquisición, ellos usualmente representan la mayor parte del costo total del ciclo de vida.

La aplicación temprana del análisis de LCC es crucial para optimizar el proyecto y su asociación a los costos del ciclo de vida. La flexibilidad en el cambio de los diseños y opciones, incrementa cada vez más los límites en el avance del proyecto, y a medida que se avanza hacia las últimas etapas el diseño del sistema se torna bastante rígido, con menos oportunidades para un rediseño, debido a que las modificaciones pueden ser muy costosas.

Impacto en el Proyecto

Mientras se desarrolla el proyecto, las premisas y decisiones del negocio o suposiciones de las fases previas tienen un impacto en fases subsecuentes y finalmente en la rentabilidad. La herramienta LCC, es aplicable a todas decisiones (técnicas), pequeñas y grandes, durante el proyecto. Dependiendo de la magnitud de las decisiones que se tomen, ocasionalmente las premisas del negocio tendrán que ser revisada para asegurar su continua validación.

Es importante tener presente a la disponibilidad y sus factores de influencia, tales como confiabilidad y mantenibilidad, dentro de los objetivos a establecer en la fase de visualización, para garantizar buenas bases en el diseño y tener un impacto beneficioso en el LCC. Las penalizaciones financieras por pérdidas de ingresos, son costos importantes a tomar en cuenta en el desarrollo del proyecto para lograr un diseño acorde con los objetivos y lineamientos a trazarse en la fase de visualización. La misma lógica debe ser aplicada a los costos de operación, mantenimiento y desincorporación. Adicionalmente, la influencia de los factores que producen

indisponibilidad de los equipos para el cumplimiento de su servicio, sus costos de operación, y los costos de mantenimiento consecuentes del desempeño del mismo, podrían por lo tanto, ser una parte integral del diseño de procesos y evaluaciones en LCC. Estas consideraciones podrían ser críticamente revisadas durante el desarrollo del proyecto y ser continuamente evaluadas a lo largo de las fases del proyecto a fin de optimizar CAPEX de manera de obtener un bajo costo del ciclo de vida.

La optimización del LCC se logra cuando el balance entre CAPEX (adquisición, instalación, otros) y OPEX (operación, mantenimiento, pérdida de producción) dan el más bajo costo total elevando los beneficios del activo.

Pasos en el procedimiento de análisis del Costo del Ciclo de Vida

Básicamente el procedimiento consta de cuatro pasos desde “distintos escenarios” para la implementación del LCC durante el proyecto. Dependiendo de la magnitud del caso, las tareas pueden ser acortadas o combinadas por razones de conveniencia. Sin embargo, en principio todas ellas pueden ser direccionadas.

También se usarán Listas de Control que sirven como ayudantes para el seguimiento, y para identificar factores que pueden ser reportados en un informe cuando se hacen decisiones sobre el ciclo de vida. En particular ayudan a identificar costos de operación los cuales pueden ser pasadas por alto.

1. Definición del Esqueleto y Alcance (paso 1)

El objetivo de este paso es desarrollar un entendimiento fundamental de la edición y suministro del esqueleto o estructura para el análisis del Costo del Ciclo de vida.

- Identificar Objetivos
 - Las funciones, sistemas o equipos a ser examinados.
 - Razones para la aplicación del procedimiento.

- Objetivos de acuerdos con las partes relevantes.
- Identificar Limitaciones
 - Físicos (limitaciones en recursos o en tiempo).
 - Técnicos (propiedad de activos, limitaciones de espacio).
 - Presupuesto (limitaciones de CAPEX).
- Establecer Criterio de Decisión

El criterio a para tomar una decisión debe fundamentarse en los objetivos del negocio a ser concretados, y en el cual el índice OPEX puede ser descontado.

- Identificar Opciones Potenciales

Identificar elementos del proyecto, equipos y funciones con costos significativos (Tener presente los requerimientos funcionales para ayudar al desarrollo de opciones).

- Comparar con lineamientos base (una opción basada en prácticas existentes).
- Comparar con Benchmarks.
- Listar todas las posibles opciones.
- Establecer Opciones
 - Filtrar las sugerencias más extravagantes.
 - El punto sobre la revisión de opciones evita trabajo innecesario.
 - Reducir las opciones excluyendo aquellas donde la justificación no están bien soportadas.

- Tipos de opciones permanentes en primer y segundo orden de prioridad.

- Estimación Costo/Beneficio

Estimar los costos/beneficios para cada opción y enumerarlos bajo encabezados comunes (por ejemplo: adquisición, operación, mantenimiento, disposición).

Considerar los requerimientos y la probabilidad de impacto en los siguientes aspectos:

- Ambiente y seguridad.
- Demanda en utilidades.
- Infraestructura.
- Generación de ingresos.

Comparar todas las opciones e identificar costos comunes para cada una (y los que no influenciarán la decisión a tomar).

Acordar lista de aspectos para la evaluación del riesgo, y de esta manera obtener una mejor valoración.

- Auditoría y Retroalimentación

Documentar adecuadamente para establecer la mejor vía en las decisiones a tomar.

2. Controladores de Costos y Costos de Averías (paso 2)

El objetivo de este paso es encontrar cuales opciones merecen concentrar esfuerzos (controladores de costos) y desglosar los costos sobre funciones de apoyo relevantes. Los controladores de costos son activos que tienen un impacto

significativo en CAPEX, OPEX y/o generación de ingresos (por ejemplo en caso de una falla).

- Identificar Controladores de Costos

Revisar cada listado de opciones desde las primeras tareas de “estimación costo/beneficio” para determinar su potencial como un controlador de costo.

- Definición de Elementos de Costos

Determinar el mínimo nivel necesario de detalle para discriminar entre los controladores de costos (Los elementos definidos podrían ser apropiados para determinar los costos y proveer una base para la justificación).

- Establecer Estructura

Crear una estructura para seleccionar costos de elementos. Esta estructura se puede apoyar en una matriz para justificar no sólo razones y asignaciones de costos, sino también considerar escenas benchmarks para casos futuros.

- Identificar Costos

Recolección y estimación de datos de costos de acuerdo a una base. En caso de un vacío en la valoración de la data, se debe hacerse una formulación de suposiciones, necesarias para el análisis de sensibilidad (paso 3).

- Reporte y Auditoría

Aplicar el procedimiento puesto en el paso 1.

3. Análisis y Revisión de Sensibilidad (paso 3)

El objetivo de este paso es preparar los requerimientos de información para el proceso de toma de decisiones en el próximo paso, y generar la predicción del costo

del ciclo de vida para cada opción seleccionada, clasificación de las opciones, examinar sensibilidad e identificar riesgos.

- Justificación desde el punto de vista del LCC

Usar los resultados del Costo/Beneficio del paso 1 y aplicar el factor CAPEX equivalente y relevante o asignarlo al modelo en desarrollo.

En caso de requerir estudios detallados, debido a que el modelo usado no es adecuado para la modelación de repuestos, análisis de riesgo o evaluación del mantenimiento, se recomienda apoyarse en la metodología de confiabilidad para asistir la toma de decisión, tales como MCC, IBR, AMEF, ACRB, etc.

- Clasificación de Opciones

Clasificar las opciones en orden al aporte en los beneficios y bajos costos del ciclo de vida.

Comprobar la confianza de la clasificación (explicar razones para el nivel de confianza). No tomar el resultado inicial como el definitivo en la evaluación.

- Examinar Sensibilidad

Para cambiar un número de parámetros apropiados en el modelo, examine la robustez financiera de las opciones. Direccionando cualquiera otro riesgo envuelto, como técnicos, recursos o tiempo.

- Reporte y Auditoría

Reportar resultado y preparar revisión para el próximo paso.

4. Implementación (paso 4)

En este paso se comunica el resultado de los pasos previos, se acuerda una decisión y la estrategia para llevarla a cabo en las siguientes fases del proyecto.

- Reporte de Conclusiones

Los resultados pueden ser presentados juntos con soportes de argumentos.

Mencionar las actividades requeridas en las fases subsiguientes del proyecto.

- Toma de Decisiones

Seleccionar la opción preferida.

En caso de que se amerite una revisión se solicitarán los procedimientos que envuelven a la opción elegida, y debe ser posible realizar cambios para mejorarla.

- Llevar a Cabo

Continuación del soporte del proyecto para un especial cuidado en la preparación de las especificaciones funcionales o evaluaciones de ofertas.

- Auditoría y retroalimentación

Revisión de la documentación asegurando que todos los aspectos relevantes hayan sido registrados.

Registrar y publicar experiencias en beneficios que pueden ser de valor para otros proyectos.

1.4.2 Modelos Basados en Riesgo (ver aplicación en el anexo A-1)

Riesgo

El riesgo es un valor probabilístico, que al ser cuantificado permite caracterizar una decisión de los siguientes términos:

- **La probabilidad de éxito de la decisión con los beneficios asociados.**

• **La probabilidad de fracaso de la decisión con las consecuencias asociadas**

Ofreciendo al “tomador de decisiones” un panorama claro para soportar su juicio en base al balance entre ambas magnitudes.

Es un término probabilístico que se entiende como la probabilidad de tener una pérdida, y comúnmente se cuantifica en dinero (dollars (\$), bolívares, etc.).

$$\text{Riesgo} = \text{Prob. de falla} \times \text{consecuencia de la falla}$$

$$R(t) = F(t) \times \text{consecuencia de la falla}$$

En la figura 4 se observa como se cuantifica el riesgo y que aspectos son tomados en cuenta.

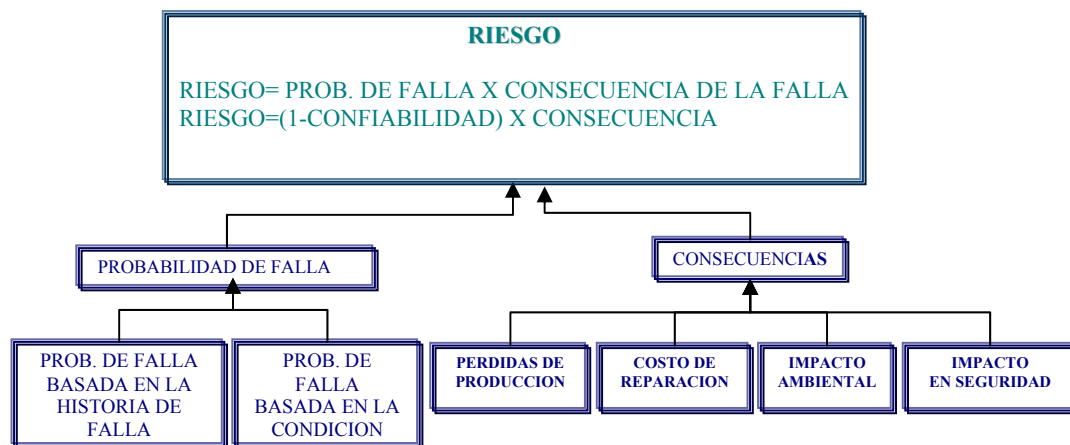


Figura 4. Estructuración de Riesgo.

Como práctica importante a considerarse se encuentra la cuantificación y propagación de la incertidumbre de las variables a través de un modelo. A continuación se desarrollará un poco este concepto.

Incertidumbre

Es una medida de la inseguridad o grado de desconocimiento acerca de una variable o evento.

Cuantificación de la Incertidumbre

Los modelos más conocidos para cuantificar la incertidumbre asociada a una variable son las distribuciones probabilísticas.

Concepto de Distribución Probabilística:

Es un modelo “matemático” que permite cuantificar la incertidumbre asociada a una variable, es decir un modelo que considera todos los posibles valores que dicha variable puede tomar. En la figura 5 se observa una distribución probabilística con sus características.

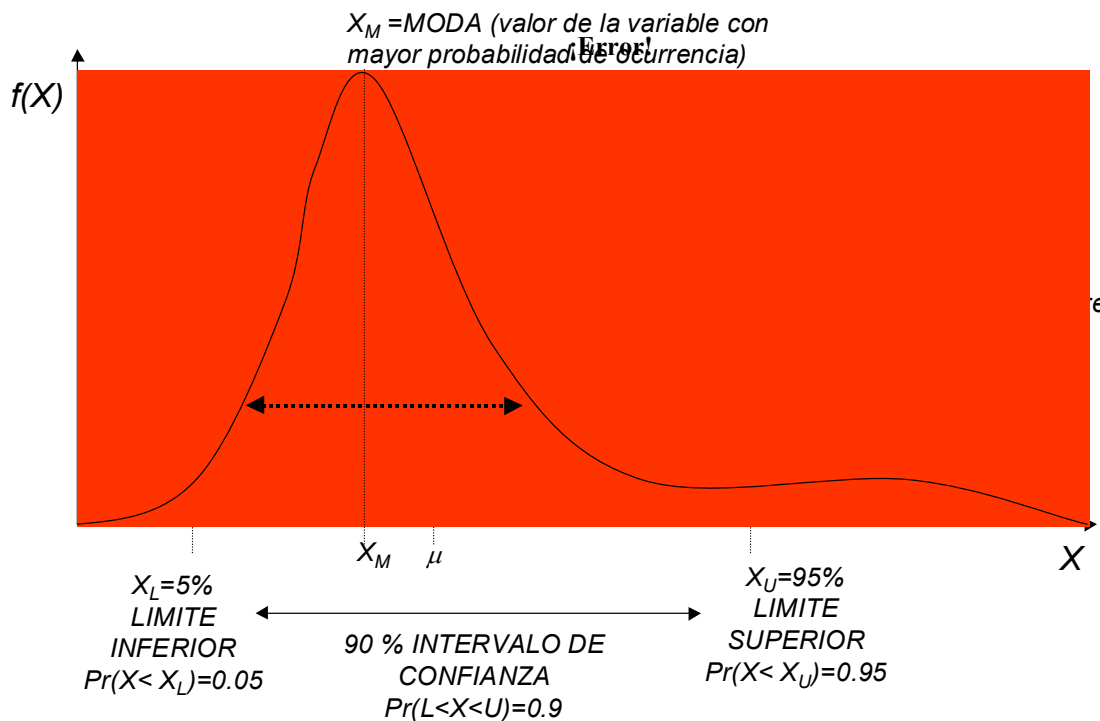


Figura 5. Distribución Probabilística.

Formas de Expresión de la Incertidumbre

Existen tres representaciones típicas para la incertidumbre:

- 1.- La distribución probabilística completa.
- 2.- Un rango de variación de la variable con su grado de certeza.
- 3.- Un estimado puntual (la media o la moda de la distribución).

Las formas “1” y “2” ofrecen información más fidedigna de la realidad.

Propagación de la Incertidumbre

Es el procedimiento que permite incluir y contabilizar la incertidumbre asociada a las variables de entrada, en un determinado modelo de decisión.

Si las variables de entrada al modelo tienen incertidumbre, entonces el resultado o salida del modelo debe tener incertidumbre.

Se sustenta en técnicas de simulación, como “Montecarlo”, “Latin Hypercube” o “Algoritmos Genéticos”. Estas técnicas están incluidas en casi todos los softwares que manejamos diariamente. En la fig. 6 se observa un modelo de decisión en donde se cuantifica y propaga la incertidumbre.

Áreas de aplicación de los modelos de decisión basados en riesgo:

→ Mantenimiento en General:

- Diagnóstico.
- Predicción.
- Planificación.
- Programación.

- Estimación presupuestaria y área financiera en general.
- Estudios Integrados en Yacimientos y Pozos.
- Diseño y Construcción.

Modelo Basado en Riesgo

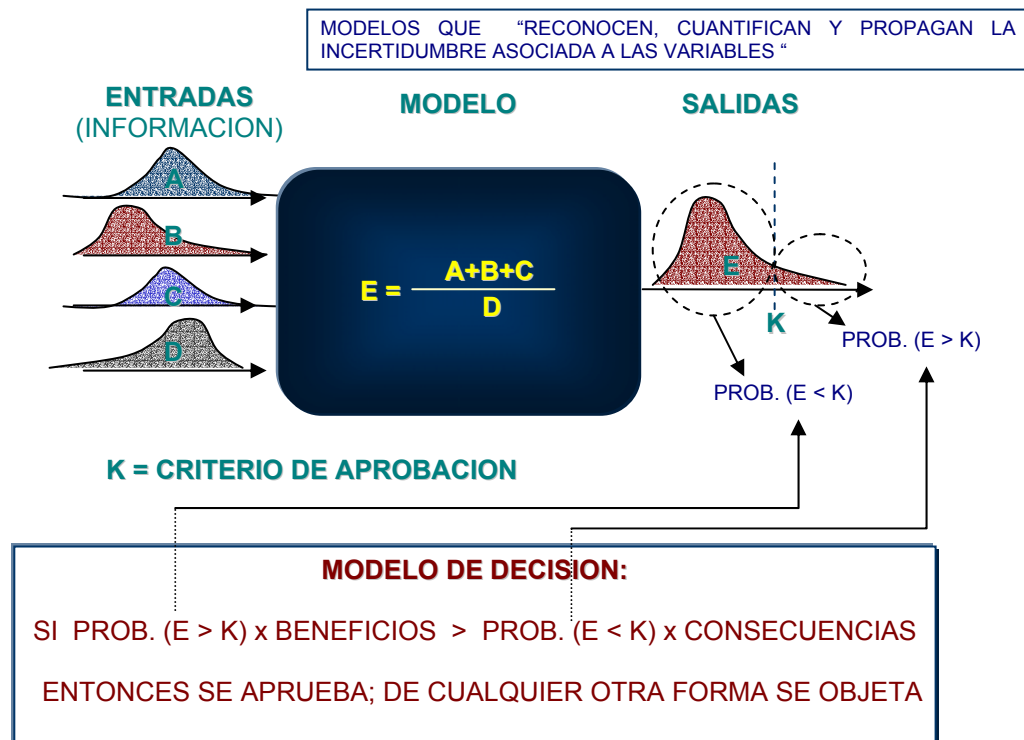


Figura 6. Modelo de Decisión.

1.4.3 Análisis Costo – Riesgo-Beneficio

Este análisis cuantifica el riesgo en dólares, asociado con la frecuencia en tomar acción en mantenimiento o inspección y el costo de mantenimiento a diferentes frecuencias. Luego se suman ambas curvas y se obtiene el punto óptimo como el punto más bajo de la curva. En la figura 7 se observa este modelo.

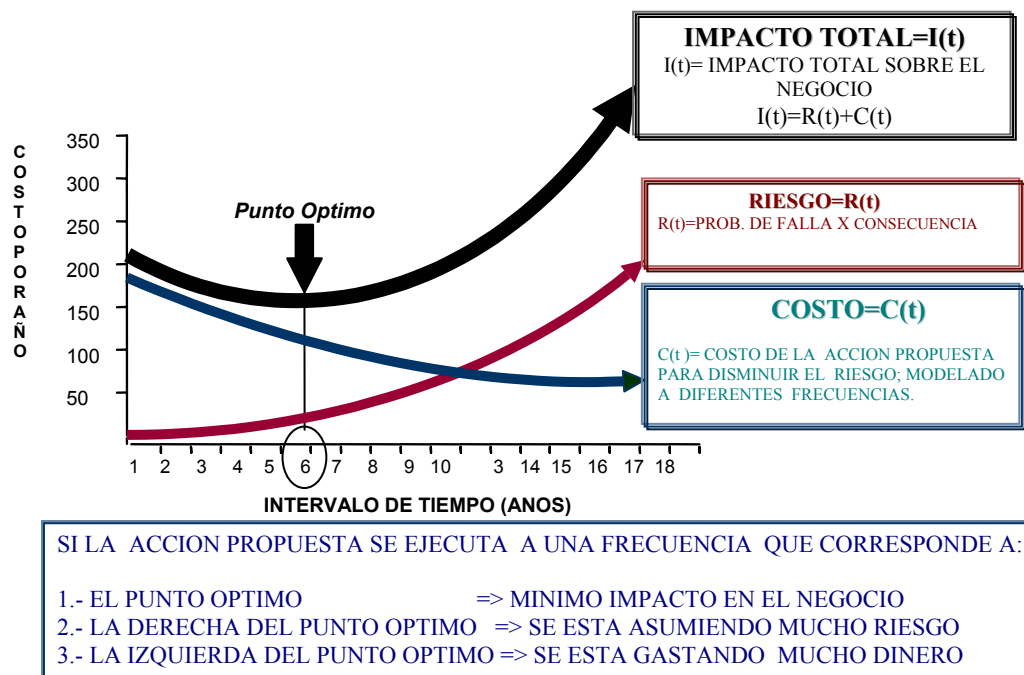


Figura 7. Modelo Costo-Riesgo- Beneficio.

1.4.4 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) (ver aplicación en el anexo A-1)

Es una metodología utilizada en la estructuración sistemática de las pautas que deben realizarse para el aseguramiento de la continuidad de los equipos en el logro de los requerimientos del usuario.

La metodología del MCC es aplicable en equipos y/o sistemas críticos para la producción, seguridad y ambiente; en equipos y/o sistemas con altos costos de mantenimiento; en equipos y/o sistemas genéricos con un alto coste colectivo de mantenimiento y particularmente, si no existe confianza en el mantenimiento existente.

En MCC los proyectos deben ser cuidadosamente seleccionados y definidos; es de suma importancia el involucramiento del cliente; debe hacerse uso de la mejor información de fallas disponibles; los beneficios deben ser mensurables antes y después.

El MCC, busca definir estrategias de mantenimiento que:

- Mejoren la seguridad.
- Mejoren el rendimiento operacional de los activos.
- Mejoren la relación costo/riesgo - efectividad de las tareas de mantenimiento.
- Sean aplicables a las características de una falla.
- Sean efectivas en mitigar las consecuencias de las fallas, es decir, un mantenimiento que funcione y sea a un costo-efectivo.
- Sean documentados y auditables.

A continuación se definirá la secuencia a seguir para la aplicación del MCC:

- Definir Contexto Operacional.
- Definición de Funciones.
- Determinar Fallas Funcionales.
- Identificar Modos de Fallas.

- Determinar Efectos de Fallas.
- Aplicación de la Hoja de Decisión.

El Contexto Operacional: Define en forma precisa todos los elementos que serán considerados en el análisis, desde la definición de las fronteras hasta los distintos activos y/o elementos que forman parte del sistema a evaluar. En línea general, el contexto operacional toma en consideración los siguientes factores:

- Tipo de Operación.
- Impacto Ambiental.
- Estándares de Calidad.
- Niveles de Seguridad.
- Existencia de Redundancia.
- Perfil de operación.
- Ambiente de operación.
- Calidad/Disponibilidad de los insumos requeridos (combustible, aire, etc.)
- Alarmas.
- Monitoreo de primera línea.
- Política de repuestos, recurso y logística.

Para definir un buen contexto operacional, que facilite las etapas siguientes del flujograma de proceso que debe seguir el análisis de MCC, es de suma importancia incorporar los siguientes elementos técnicos:

- 1) **El Diagrama Entrada - Proceso - Salida (EPS):** es una herramienta que facilita la visualización del sistema, para su posterior análisis. Tiene la misma configuración para cualquier sistema o elemento de equipo: uno o muchos insumos son procesados para generar uno o varios productos
- 2) **El diagrama funcional:** el cual es elaborado como un diagrama de flujo que vincula los diferentes procesos que realiza el sistema. El diagrama funcional debe reducir la función global del sistema a sus procesos más sencillos y directos.

Para definir los bloques restantes, es conveniente definir el término de “Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)”, el cual es un proceso estructurado para el análisis de: funciones, fallas funcionales, modos de falla y efectos de falla. Los efectos o consecuencias de las fallas son posteriormente evaluados para determinar acciones de prevención. El proceso es conceptualmente simple y sistemático en su aplicación. La ventaja de este proceso es la capacidad que aporta para considerar las posibilidades de fallas que no se han presentado en la práctica, para así poder establecer medidas preventivas y gerenciar políticas efectivas que eviten o mitiguen las consecuencias de las fallas.

La mejor manera de ejecutar un proceso AMEF es a través de un equipo natural de trabajo (ENT), el cual debe estar integrado por personal familiarizado y conocedor de la planta, proceso o activo objeto de análisis, y por el facilitador, especialista en MCC y quien conducirá el análisis para garantizar que se cumplan con éxito cada una de las etapas.

El AMEF permite identificar sistemáticamente para un sistema y/o activo, los siguientes elementos:

- Función.
- Falla de función o falla funcional.
- Modo de falla.

- Efecto de falla.

Las funciones deben estar enfocadas a lo que se desee que realicen los sistemas o activos. Se dividen en primarias o secundarias. Su descripción está constituida por un verbo, un objeto y el estándar de desempeño deseado.

Las fallas funcionales se presentan cuando una función no se cumple incluso cuando se pierde cualquiera de los estándares de desempeño. Para definir una falla funcional sólo se requiere escribir la función en sentido negativo, es decir, negar la función.

Los Modos de falla son las razones que dan origen a las fallas funcionales. Son las condiciones que se presentan, como desgaste, fractura, pérdida de calibración, suciedad, atascamiento, etc., es decir, lo que hace que la planta, sistema o activo no realice la función deseada. Cada falla funcional puede ser originada por mas de un modo de falla. Cada modo de falla tendrá asociado ciertos efectos, que son básicamente las consecuencias de que dicha falla ocurra.

Los Efectos de fallas son simplemente los que pueden observarse si se presenta un modo de falla en particular. La descripción de un efecto de falla debe cumplir con:

- Tener la información necesaria para determinar consecuencias y tareas de mantenimiento.
- Debe describirse como si no estuviera haciéndose algo para prevenirlos.
- Debe considerarse que el resto de los dispositivos y procedimiento operacionales funcionan o se llevan a cabo.

La descripción del efecto debe dar respuesta a las siguientes interrogantes:

1. ¿Cómo se evidencia la falla?
2. ¿Cómo afecta la seguridad y el medio ambiente?
3. ¿Cómo afecta el proceso?

4. ¿Ocasiona daños físicos a los activos?
5. ¿Qué tiempo se requiere para restablecer la función?
6. ¿Cuáles son los costos de penalización y reparación?

Acciones de Mantenimiento

Luego de analizar las funciones, fallas funcionales, modos de falla y sus consecuencias, el siguiente paso consiste en seleccionar la actividad de mantenimiento.

1.4.5 Inspección Basada en Riesgo (IBR)

Es una metodología que permite determinar la probabilidad de fallas en equipos que transportan y/o almacenan fluidos y las consecuencias que esta pudiera generar sobre los operarios, el ambiente y los procesos.

Se aplica cuando se quiere revisar y/o fijar frecuencias de inspección, cuando se desea optimizar costos de inspección; cuantificar y/o modificar niveles de riesgos y particularmente cuando se requiere mejorar la productividad y la rentabilidad.

Con la aplicación de IBR, se logra optimizar los esfuerzos de inspección (alcance, costos y frecuencia), se evalúa el impacto sobre riesgo de acciones (modificaciones de procesos, instalación de válvulas de aislamiento, instalación de sistemas de detección y mitigación); finalmente se logra apoyar la toma de decisiones, considerando el riesgo cuantificado.

1.4.6 Análisis de Criticidad (AC) (ver aplicación en el anexo A)

Es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su sistema global con el fin de facilitar la toma de decisiones.

La metodología AC posee cierta analogía a la metodología de IBR con la diferencia de que es un análisis más cualitativo del sistema y/o equipo a evaluar.

Para aplicar AC se deben definir los alcances y propósitos del análisis; se debe establecer criterios de importancia y se debe seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección del sistema objeto del análisis.

Generalmente los criterios establecidos para AC son: seguridad, ambiente, producción, costos de operación, costos de mantenimiento, frecuencia de fallas y tiempo promedio para reparar.

El análisis de criticidad aplica en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieran ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso o negocio donde formen parte. Sus áreas comunes de aplicación se orientan a establecer programas de implantación y prioridades en los siguientes campos:

- Mantenimiento
- Inspección
- Materiales
- Disponibilidad de planta
- Personal

El modelo básico de análisis de criticidad se puede establecer como se muestra en la figura 8:

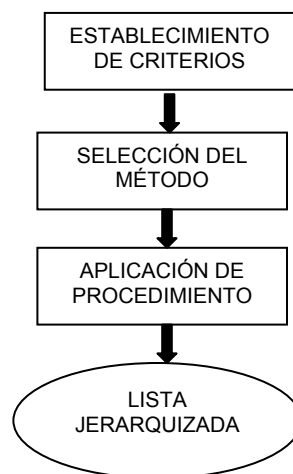


Figura 8. Modelo de Criticidad.

1.4.7 Análisis de Causa Raíz (ACR) (ver aplicación en anexo A-1)

Es una metodología utilizada para identificar las causas que originan las fallas o problemas, las cuales al ser corregidas evitarán la ocurrencia de los mismos. ACR permite buscar la razón por la cual un sistema, instalación, equipo, componente o elemento, no funciona satisfactoriamente.

Su identificación y análisis, requieren un profundo conocimiento del sistema, las operaciones, el personal y los métodos de trabajo.

Tradicionalmente ha existido la tendencia a ver la confiabilidad sólo desde la perspectiva de mantenimiento. Para que la confiabilidad llegue a formar parte de la cultura corporativa, esta debe ser vista como una responsabilidad de todos y no únicamente de mantenimiento como función. Esta metodología de análisis se basa en el manejo holístico del problema, obligando a la consideración de todos los factores que tienen influencia en la desviación del proceso, más allá del ámbito del error operativo (causa física) y de las causas humanas.

El aspecto más importante a considerar en la aplicación del ACR, es que siendo una metodología muy efectiva para la determinación de las causas de un problema esporádico o catastrófico, su mayor potencialidad se encuentra en la eliminación de los problemas crónicos o recurrentes. Todo esto por que la suma de los impactos de los problemas recurrentes normalmente será mayor a aquella alcanzada por los Eventos de Alto Impacto (fallas esporádicas).

Falla

Es una degradación o suspensión del desempeño de los equipos de una instalación.

Eventos de Alto Impacto (esporádicos)

Estos se refieren a eventos esporádicos o únicos que resultan en una pérdida de producción importante y/o altos costos de mantenimiento. Los eventos, donde el impacto sea mayor en SHA o llamados catastróficos, requieren la formación de comités especiales de muy alto nivel de especialización.

Problemas Recurrentes o Crónicos

Son problemas repetitivos en el tiempo. Un problema se considera recurrente cuando ocurre más de una vez en un periodo de tiempo determinado.

Causa Raíz Física

Es el mecanismo de falla del componente. Su solución resuelve la situación instantánea de la falla. Ej.: Material inadecuado.

Causa Raíz Humana

Identifica las acciones humanas que disparan la causa raíz física. Ej.: Selección inadecuada del material.

Causa Raíz Latente (organizacional)

Representan la manifestación de los procesos organizacionales que explican la ocurrencia de las causas raíces humanas. Solo su erradicación garantizará que la falla no se repita en el equipo estudiado o en uno similar. Ej.: Falta de adiestramiento, falta o deficiencia de prácticas o procedimientos de trabajo, MDC (manejo de cambio) no realizado o incompleto (falta de actualización de la información), entre otros.

Modo de Falla

Identifica de qué modo se hace evidente la falla o problema.

1.4.7.1 Árbol de Falla (ver en el anexo A y anexo B)

El árbol de fallas es la representación o desarrollo gráfico deductivo de un suceso final no deseado (evento principal denominado evento tope), pasando por todas sus combinaciones de eventos o sucesos intermedios, hasta llegar a sus causas o eventos básicos, que representan el límite de resolución del árbol. Este método visual se usa para analizar las interrelaciones existentes entre fallas que dan origen al evento tope, facilitando su diagnóstico debido a que en su nivel inferior generalmente se presenta las posibles causas de dichas fallas.

Las ventajas de los árboles de fallas son múltiples, entre las cuales destaca que permite determinar la confiabilidad de un sistema, analizar las interrelaciones existentes entre fallas, determinar cuales factores tienen mayor incidencia sobre la mantenibilidad y operabilidad de los sistemas considerados y la asignación de características a componentes orientadas a la seguridad. La explotación de esta herramienta permitirá pronosticar comportamiento de Instalaciones lo cual facilitará la toma de decisiones respecto a la elaboración de planes de mantenimiento y de Inspección de las instalaciones.

Para la aplicación de la herramienta de árbol de fallas en sistemas, es preciso descomponer dicho sistema (N0) en tantos Niveles (N1, N2, etc.) como sea racionalmente manejable. Este sistema (N0), es sensible a las fallas de los subsistemas (N1) dependiendo de las diferentes interrelaciones existentes (precedencias y simultaneidad) entre dichos subsistemas (N1). Luego, la probabilidad de falla del sistema (N0) esta en función de la probabilidad de falla de los subsistemas (N1). De la misma manera, la probabilidad de falla de un subsistema determinado está en función de la probabilidad de falla de los componentes (N2) de dicho subsistema y de interrelación entre dichos componentes.

El análisis de árboles de falla da origen, aplicando las leyes del “Álgebra Booleana”, a una ecuación simplificada con la que se determina la probabilidad de falla del sistema (N0), dependiendo de las probabilidades de falla de los subsistemas

involucrados (N1) y estos a su vez, de la probabilidad de falla de los componentes (N2).

En el nivel inferior (nivel más bajo) de un árbol de fallas generalmente se presenta las posibles causas de falla del sistema (N0), subsistemas (N1) o componentes (N2).

Pasos a seguir para la construcción de Árboles de Fallas.

1. Definir el objeto del análisis, es decir, el Sistema.
2. Dividir el Sistema en Subsistemas.
3. Describir cada Subsistema totalmente.
4. Dividir el Subsistema en Componentes.
5. Definir el evento indeseable (Evento Tope).
6. Determinar las causas del Evento Tope (Evento de Falla).
7. Determinar las causas de cada Evento de Falla.
8. Repetir el paso 6 hasta cubrir todos los Eventos de Fallas.

CAPÍTULO II

2.- DEFINICIÓN, EVALUACIÓN Y ASPECTOS PARA EL DISEÑO DE LA CONFIABILIDAD

2.1.- Definición de confiabilidad a través de elementos que influyen en la misma (ver aplicación en el anexo A y B)

La confiabilidad se puede definir como la probabilidad de que un sistema o producto cumplirá con la misión para el cual fue diseñado en una manera satisfactoria o, la probabilidad que el activo desempeñe sus funciones de manera satisfactoria, durante un período de tiempo dado, mientras opere en un contexto establecido en el diseño.

El primer elemento en la definición de la confiabilidad es la caracterización del equipo cuantitativamente, a través de un porcentaje o fracción que indica el número de veces que se puede presentar un evento en un número total de pruebas.

El segundo elemento es desempeño satisfactorio, por lo que hay que establecer un criterio específico que describe si un activo es satisfactorio a través de un indicativo.

El tercer elemento, tiempo, es uno de los más importantes porque representan una medición que puede ser relacionado con la degradación del desempeño del sistema. Se debe conocer el parámetro tiempo para evaluar la probabilidad con que el sistema cumple con su función. Es de particular interés predecir la probabilidad de la supervivencia de un activo (sin falla) para un período designado. La confiabilidad se

expresa en términos del tiempo medio entre fallas (TMEF), haciendo crítico el tiempo en la medición de la confiabilidad.

Las condiciones operacionales especificadas bajo las cuales se espera que el sistema funcione, constituyen el cuarto elemento significativo para la definición de la confiabilidad. Estas condiciones incluyen factores ambientales, tales como la localización geográfica donde se espera que el sistema opere y a un período de tiempo anticipado, el perfil operacional, el potencial impacto como resultado de cambios en la temperatura, humedad, vibración, choque, etc. Estos factores no deben únicamente dirigir las condiciones durante el período de operación del sistema, sino durante el período donde el sistema está en un modo de espera, o en caso para un equipo se esté transportando de una localidad a otra.

2.2.- Indicadores de Confiabilidad

La evaluación de cualquier sistema en términos de confiabilidad es basada precisamente en los conceptos de definición de confiabilidad y coeficientes o indicadores. En este punto se desarrollaran los términos y coeficientes para evaluar la confiabilidad. Es importante entender todas las funciones de confiabilidad relacionadas con el diseño del sistema/producción, y también se trataran con términos tales como la función de confiabilidad, tasa de falla, función de densidad de la probabilidad, modelo de confiabilidad, etc., las cuales serán definidas a continuación.

2.2.1.- Función Confiabilidad

La función de confiabilidad también conocida como la función de supervivencia, es determinada a partir de la probabilidad en que un sistema será completamente exitoso en la menor medida para un tiempo especificado. La función confiabilidad, $R(t)$, está definida como:

$$R(t) = 1 - F(t),$$

donde $F(t)$ es la probabilidad en que el sistema falle en un lapso de tiempo t . $F(t)$ está representada a través de una función de distribución. Esta función también se puede representar a través de la siguiente integral:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$$

Luego al resolver esta integral tenemos $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) \cdot d(t)}$, luego esta ecuación se puede escribir también de la siguiente manera:

$R(t) = e^{-t/M} = e^{-\lambda t}$, M es el tiempo medio entre fallas (TMEF) y λ es la tasa de falla instantánea. La vida media y la tasa de falla están relacionadas a través de la siguiente ecuación, $\lambda = \frac{1}{\theta}$, donde la vida media (θ) es calculada como el promedio aritmético de los tiempos en que el equipo se encuentra operando.

Las características de fallas para los diferentes activos no necesariamente es la misma. Existen varias funciones de distribución probabilísticas que han sido desarrolladas en la práctica para describir las características de fallas de los diferentes equipos. Entre estas distribuciones tenemos la Binomial, Exponencial, Normal, Poisson, Ganma, Weibull. Así de esta manera hay que caracterizar el proceso de deterioro de un equipo con la distribución que mejor lo represente.

2.2.2.- Tasa de Falla

La tasa en la cual ocurren las fallas en un intervalo de tiempo específico es llamada tasa de falla para ese intervalo. La tasa de falla por hora se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{\text{número de fallas}}{\text{horas totales en operación}}$$

2.2.3.- Relación de Confiabilidad en los Componentes

Después de haber definido la función básica de confiabilidad y de algunos de sus indicadores asociados al sistema de falla, es apropiado describir su aplicación en el diseño. Durante el diseño de alguna instalación o inclusive equipos, los componentes que formarán parte de su configuración se combinarán de tal manera, ya sea en serie o paralelo, que se logrará cumplir con la meta de confiabilidad y disponibilidad trazada. Esto se hace a través de diagramas de bloques que se colocan y se interconectan para cumplir con el diseño de la instalación.

En el siguiente tópico definiremos el cálculo de la confiabilidad en sistemas en serie y paralelo.

a) Circuitos en Serie

Un circuito en serie tiene una gran utilidad en los diseños, pero exige a todos los componentes que lo conforma su alta continuidad operacional de una manera satisfactoria para garantizar la función correcta del sistema. Luego si asumimos que un sistema está formado por un subsistema A, un subsistema B, y un subsistema C, la confiabilidad del conjunto es el producto de cada uno de los subsistemas, y lo expresamos de la siguiente manera:

$$R = (R_A) \cdot (R_B) \cdot (R_C) \Rightarrow R = (e^{-\lambda_1 t}) \cdot (e^{-\lambda_2 t}) \cdots (e^{-\lambda_n t})$$

$$R = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t}$$

La ecuación asume que la confiabilidad de un componente individual no depende de la confiabilidad de los otros componentes (es decir, cada componente es independiente). Además, las confiabilidades son presentadas como probabilidades. Ver en la figura 9 el circuito en serie.

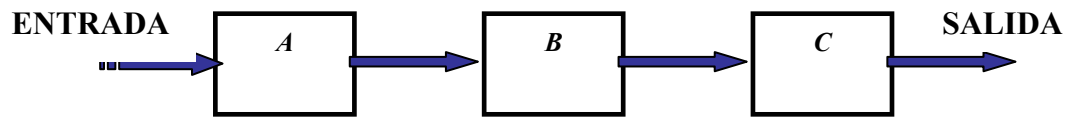


Figura 9. Circuito en Serie.

b) Circuitos en Paralelo

Un circuito en paralelo establece una configuración tal que todos los componentes se encuentran en paralelo. Por ende, para que el sistema falle debe fracasar cada uno de los componentes o subsistemas, también esto depende del número de componentes o subsistemas que requiere que estén operando para el debido funcionamiento del sistema. Si se asume un sistema formado por dos subsistemas no necesariamente idénticos el subsistema A, y subsistema B, y si para que el sistema funcione debe funcionar cualquiera de los dos subsistemas, entonces la confiabilidad se expresa de la siguiente manera:

$$R = R_A + R_B - (R_A) \cdot (R_B)$$

En la figura 10 se muestra el circuito en paralelo correspondiente.

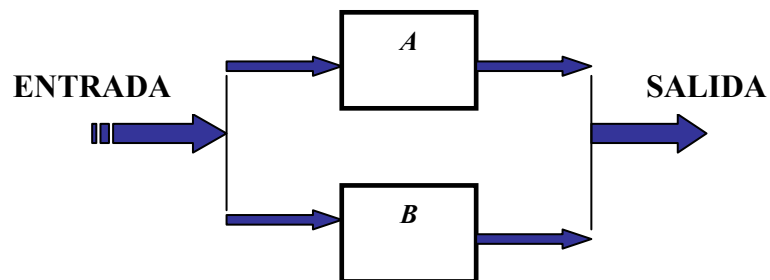


Figura 10. Circuito en Paralelo.

En forma general para un sistema que esté formado por n componentes o subsistemas idénticos, tenemos $R = 1 - (1 - R)^n$.

Los circuitos paralelos en redundancia son usados para aumentar la confiabilidad en los sistemas, que se logra cuando se añaden más componentes en reserva o subsistemas de apoyo. La redundancia se da cuando algún componente falla y se recurre al de reserva.

c) El Ciclo de Vida de un Equipo o Sistema de Equipos

El ciclo de vida de un equipo o sistema de equipos, desde su puesta en servicio hasta su eliminación o desincorporación puede dividirse, de acuerdo a la tasa temporal de fallas que presenta, en tres períodos de vida características, bien definidos:

- Período de arranque.
- Período de vida útil.
- Período de envejecimiento rápido.

En la figura 11 se muestra la curva de la bañera que representa el ciclo de vida de un equipo en función de la tasa de fallas.

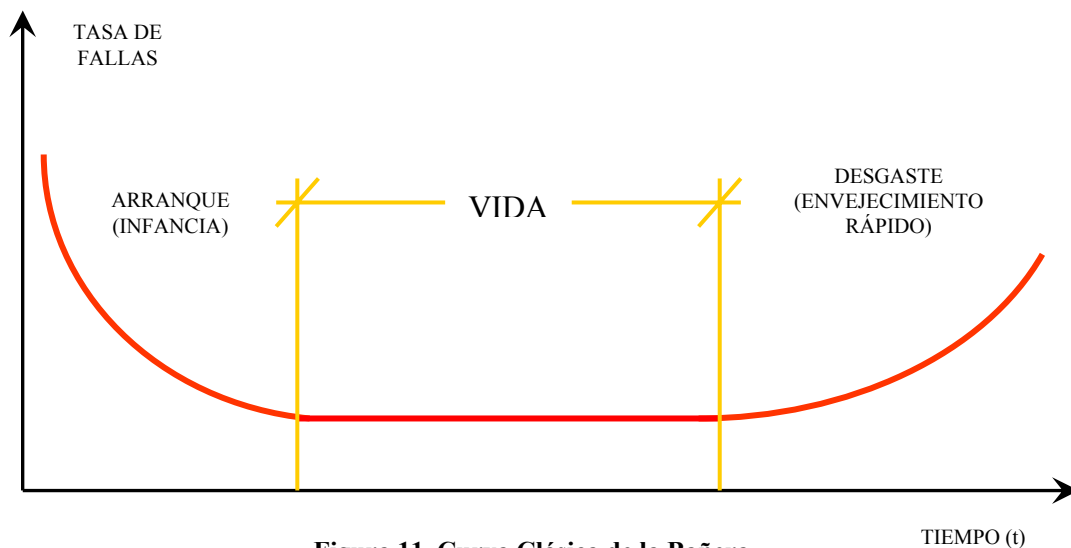


Figura 11. Curva Clásica de la Bañera.

El período de arranque corresponde al lapso de funcionamiento comprendido entre el arranque y la finalización del ajuste del arranque, o período de corrección de defectos de fabricación (infancia). Este período está caracterizado por un descenso en la tasa de fallas desde un valor inicial hasta el correspondiente valor promedio mínimo. Debido a que la naturaleza de los problemas que presentan los equipos en este período tiene que ver con defectos de fabricación, su corrección y ajuste suelen estar cubiertos por una póliza o contrato de garantía otorgada por el fabricante o el vendedor al comprador.

El período de vida útil, se caracteriza por presentar una tasa de fallas constante, correspondiente al valor promedio mínimo que se alcanza al final del período de arranque. Durante el período de vida útil el equipo posee máxima disponibilidad. Un grupo de equipos de distintas calidades y con la misma función se caracterizan por tener tasas de falla diferentes durante el período de vida útil.

El período de desgaste o envejecimiento rápido se inicia con un aumento progresivo de la tasa de fallas, que suele ser consecuencia del deterioro o desgaste de los componentes fundamentales. Durante el período de envejecimiento rápido, el equipo o sistema de equipos puede ser sometido a una operación de reconstrucción que en algunos casos permite extender el período de vida útil aumentando la rentabilidad de la inversión. Para tomar decisiones relativas a la reconstrucción de un equipo deberá hacerse un análisis económico que permita juzgar si la extensión de vida útil obtenible es o no rentable (atractiva).

2.2.4.- Factores Relacionados

En esta sección explicaremos algunos de los factores que se encuentran íntimamente relacionados con la confiabilidad. Entre estos tenemos el tiempo medio entre mantenimiento (TMEM), efectividad, disponibilidad, entre otros.

2.2.4.1 Tiempo Medio entre Mantenimiento (TMEM)

El mantenimiento de un sistema o equipo es consecuencia del diseño basado en confiabilidad, ya que, durante el diseño de confiabilidad se consideran aspectos de mantenibilidad, optimando el diseño en función de la configuración que cumpla con las metas de confiabilidad trazada. De allí que el mantenimiento se genera y se previene a partir del diseño preliminar. El tiempo medio entre mantenimiento (TMEM) es uno de los factores que permite medir la mantenibilidad. Este factor puede ser utilizado para medir el tiempo medio entre las tareas de mantenimiento correctivo (no programadas) o entre las actividades de mantenimiento preventivo (programado) en cuyo caso $TMEM = k(TMEF)$. La frecuencia para el mantenimiento correctivo depende del tiempo medio entre fallas (TMEF), en la medida en que TMEF es mayor la actividad en mantenimiento correctivo disminuirá. Y para bajar la frecuencia del mantenimiento correctivo hay que aumentar la frecuencia del mantenimiento preventivo.

2.2.4.2 Disponibilidad (A)

1. Disponibilidad Inherente (A_i). Es la probabilidad que un sistema o equipo, cuando es usado bajo un estado en condiciones en un entorno ambiental ideal, opera satisfactoriamente en cualquier instante de tiempo requerido. Este excluye acciones de mantenimiento preventivo, demoras de tiempo logísticas, y demoras de tiempo administrativas, y se expresa como:

$$A_i = \frac{TMEF}{TMEF + \overline{Mct}}$$

Donde TMEF es el tiempo medio entre fallas y \overline{Mct} es el tiempo medio para mantenimiento correctivo.

2. Disponibilidad Obtenida (A_a). Es la probabilidad en que un sistema o equipo, cuando se opera bajo un estado de condiciones en un entorno ambiental ideal,

opera satisfactoriamente en cualquier instante de tiempo. En este caso se incluye el mantenimiento preventivo, pero se excluye las demoras de tiempo por logística, demoras administrativas, y se expresa de la siguiente manera:

$$A_a = \frac{TMEM}{TMEM + \overline{M}}$$

Donde TMEM es el tiempo medio entre mantenimiento y \overline{M} el tiempo medio de mantenimiento activo, ambos términos engloban mantenimiento correctivo y preventivo.

3. Disponibilidad Operacional (A_o). Es la probabilidad que un sistema o equipo, cuando se opera bajo un estado de condiciones en un ambiente operacional existente, opera satisfactoriamente. Este se expresa de la siguiente manera:

$$A_o = \frac{TMEM}{TMEM + TMFS}$$

Donde el TMFS es el tiempo medio fuera de servicio que incluye el tiempo para realizar mantenimiento correctivo y preventivo, las demoras de tiempo por la logística, y las demoras administrativas.

2.3.- Predicción de la Confiabilidad

La predicción de la confiabilidad permite conocer el estado del activo a través de una revisión de los requisitos de funcionamiento, establecidos en el diseño, y los factores especificados mediante la asignación. La predicción se realiza mediante los términos de TMEM y/o TMEF, que se comparan contra los requisitos de diseño, evaluando las áreas deficientes para realizar posibles mejoras de diseño.

La predicción de confiabilidad se logra mediante diferentes maneras en los procesos de desarrollo del sistema, la cual varía un poco dependiendo de la disponibilidad de los datos. Las técnicas básicas para la predicción son las siguientes:

1. **Predicción basada sobre el análisis de equipos similares.** Esta técnica se utiliza cuando hay poca disponibilidad de datos, que no permiten el uso de técnicas más sofisticadas. Para el uso de estas técnicas se utiliza los valores de TMEF para equipos similares, con similar grado de complejidad de funcionamiento, funciones similares, y características de confiabilidad similares. Los factores de cantidad y tipo, esfuerzos, y factores ambientales no son considerados. El perfil de confiabilidad para el nuevo equipo es asumido como el perfil de confiabilidad del equipo más comparable en términos de funcionamiento y desempeño.
2. **Predicción basada en grupos de elementos activos.** El Grupo de Elementos Activos está formado por los elementos que conforman un bloque funcional pequeño que controla o convierte energía. El Grupo de Elementos Activos incluye un elemento activo (relevé, transistor, bomba, máquina) y un número de elementos pasivos. A través de la estimación del número del grupo de elementos activos y el uso de factores complejos permite predecir el TMEF.
3. **Predicción basada en la suma de las partes del equipo.** Para el cálculo de la predicción se necesita enumerar las partes que conforman al equipo, y se clasifican por categorías. Luego se asignan las tasas de fallas para cada parte del equipo, y finalmente se combinan para caracterizar el conjunto. Los métodos a usar difieren un poco debido a la fuente de los datos a utilizar, el número de partes y los tipos de categorías, y los niveles de énfasis asumidos.
4. **Predicción basada en el análisis de énfasis.** En la medida que el nivel de detalle del diseño de un equipo es mayor, la predicción será mucho más completa. Esto depende de la determinación de los tipos de partes y cantidades, utilización de la tasa de fallas, proporción de énfasis y consideración de los factores ambientales. También se consideran las interacciones entre los componentes. Frecuentemente se usa un software para la predicción de procesos en instalaciones.

Los resultados de la predicción de confiabilidad permiten también ser utilizados para los datos en la predicción de mantenibilidad, determinación de requerimientos de

soporte específicos como por ejemplo ensayo y soporte de equipos, repuestos y partes a reparar, etc. También determina básicamente la frecuencia de mantenimiento correctivo y la cantidad de acciones de mantenimiento anticipados a lo largo del ciclo de vida; es por esto que los resultados de la predicción de confiabilidad deben ser tan precisos como sea posible.

2.4.- Confiabilidad en el Ciclo de Vida de los sistemas (Consideraciones en Fases del Diseño)

La confiabilidad es una característica de diseño inherente, que debe ser considerada en los sistemas de procesos ingenieriles comenzando con la fase de diseño conceptual. A continuación describiremos la aplicación de la confiabilidad en las diferentes etapas de desarrollo del proyecto.

Requerimientos del sistema en las diferentes fases.

1. Fase de Diseño Conceptual

- Análisis de Factibilidad.
- Requerimientos Operacionales.
- Concepto de Mantenimiento.
- Requerimientos Funcionales.
- Técnica de medición de desempeño.

En esta fase se debe cuantificar y calificar los requerimientos de confiabilidad para el sistema tales como, TMEM, TMEF, λ , etc., para la planeación de confiabilidad.

2. Fase Diseño Preliminar del Sistema

- Análisis del Sistema Funcional.
- Síntesis y asignación de criterio de diseño preliminar.
- Optimización del Sistema.
- Síntesis del Sistema y definición.

En esta fase se lleva a cabo la designación de los requerimientos de confiabilidad, análisis de confiabilidad e intercambios, diseño de soportes, predicción de confiabilidad, revisión del diseño formal y aprobación.

3. Fase de Ingeniería de Detalles y Desarrollo

- Diseño detallado del sistema.
- Desarrollo del prototipo del sistema.
- Ensayo y evaluación del sistema.
- Modificación del sistema.

Se llevará a cabo análisis de confiabilidad e intercambios, diseño de soportes, predicción de confiabilidad, ensayo y evaluación de confiabilidad, revisión del diseño formal y aprobación.

4. Fase Construcción/Producción

- Fabricación, ensamblaje, y ensayo del sistema y sus componentes.
- Construcción del Sistema.

Para esta fase se realizarán ensayos y evaluación de confiabilidad; confiabilidad mediante la recolección de datos, análisis, y acción correctiva.

5. Fase de utilización del Sistema y Soporte del Ciclo de Vida

- Arranque del sistema y sus componentes.
- Soporte del ciclo de vida del sistema.

Esta es la fase más extensa del ciclo de vida. Durante esta fase se recolectarán datos de confiabilidad, se realizarán análisis y evaluación de la confiabilidad del sistema; y posibles modificaciones del sistema.

6. Desincorporación del Sistema

CAPÍTULO III

3.- DEFINICIÓN Y ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LA MANTENIBILIDAD

3.1.- Definición de Mantenibilidad (ver anexo A-1)

La probabilidad de que un activo retorne a servicio dentro de un lapso de tiempo y condiciones preestablecidas. La mantenibilidad se puede definir también como, la habilidad de un activo a ser mantenido. Constituye un parámetro importante dependiente del diseño, debido a que su buena planificación mejora el índice de disponibilidad a través del diseño de estrategias de mantenimiento. Este parámetro puede ser expresado en términos de tiempo de mantenimiento, frecuencia de mantenimiento, y costo de mantenimiento. Luego la mantenibilidad puede ser definida sobre la base de la combinación de los términos que se acaban de definir, de esta manera tenemos lo siguiente:

- a) Es una característica de diseño e instalación la cual se puede expresar como la probabilidad en que un activo será retenido o restaurado a una condición específica dentro de un período de tiempo dado, cuando el mantenimiento se desempeña según los procedimientos y recursos preestablecidos.
- b) Es una característica de diseño e instalación que se puede expresar como la probabilidad que el mantenimiento no se requerirá más tiempo que el período dado, siempre que el sistema sea operado de acuerdo a procedimientos preestablecidos.
- c) Es una característica de diseño e instalación que puede ser expresada por la probabilidad de que el costo de mantenimiento para el sistema no excederá cierta

cantidad para un período designado, siempre y cuando el sistema sea operado y mantenido en concordancia con los procedimientos preestablecidos.

3.2.- Indicadores de la Mantenibilidad

La mantenibilidad se puede medir, en forma general, por una combinación de factores de mantenimiento. Desde la perspectiva del sistema, esto puede ser asumido dentro de las siguientes categorías generales:

1. **Mantenimiento Correctivo.** El mantenimiento no programado realizado, como resultado de la falla, para restaurar un sistema o equipo a un nivel específico de funcionamiento.
2. **Mantenimiento Preventivo.** El mantenimiento programado realizado para retener un sistema a un nivel específico de funcionamiento, consecuente de la aplicación sistemática de inspección, detección, reparación, o la prevención inmediata de fallas mientras se hacen reemplazos de activos o elementos periódicamente.

En este punto es de particular interés definir la forma de medir el tiempo fuera de servicio para la medición de la mantenibilidad. El tiempo fuera de servicio es el tiempo transcurrido para hacer mantenimiento al equipo o sistema una vez que sale de operación. Este parámetro puede ser definido a través de la suma de los siguientes factores: horas laboradas por el personal (se debe considerar el número total de empleados, nivel de destreza, y las horas laboradas en el cumplimiento de mantenimiento, frecuencia de mantenimiento (dada a través del tiempo medio entre mantenimiento→ TMEM, que engloba el tiempo medio para mantenimiento no programado, y el tiempo medio para mantenimiento programado), costo del mantenimiento, factores económicos relacionados con varios elementos de apoyo logístico (entre estos factores tenemos reparaciones, inventario de repuestos, ensayos de equipos, transporte y factores de manejo).

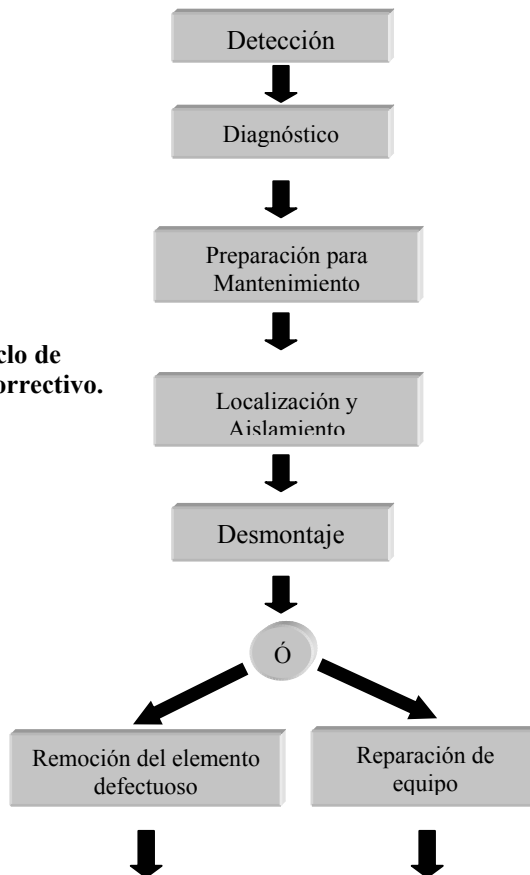
3.2.1- Factores de tiempo utilizados para el mantenimiento

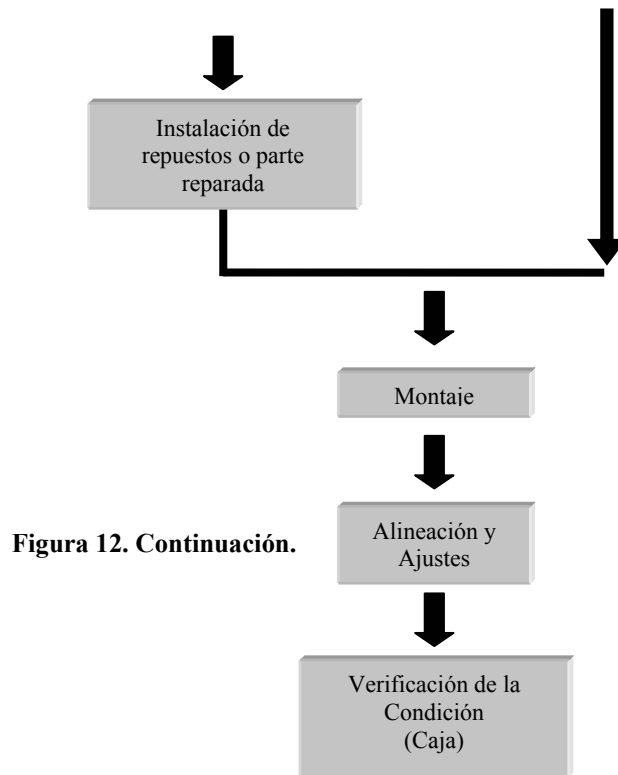
En esta sección se incluyen los tiempos para el mantenimiento correctivo y preventivo, retrasos de tiempo administrativo y logístico, y el tiempo fuera de servicio de todo el mantenimiento (ver anexo A-1).

3.2.1.1 Tiempo medio para mantenimiento correctivo (\overline{Mct})

Es el tiempo que se requiere para reparar o restaurar el sistema a un estado operacional completo, una vez que el mismo ha fallado, a través de una serie de pasos. En la figura 12 se describen los pasos para el ciclo del mantenimiento correctivo a través del siguiente gráfico:

Figura 12. Ciclo de mantenimiento correctivo.





El tiempo medio para mantenimiento correctivo (\overline{Mct}) o el tiempo promedio para reparar (TPPR) que es equivalente, es una combinación del valor representativo del promedio aritmético de los tiempos individuales del ciclo de mantenimiento (Mct_i).

$$\overline{Mct} = \frac{\sum_{i=1}^n Mct_i}{n}$$

Se debe recoger los datos de los diferentes tiempos, especificados en el diagrama anterior, se suman y se obtiene el tiempo para el mantenimiento correctivo en un momento dado. Luego se hace el mismo procedimiento cada vez que se va a realizar alguna actividad de mantenimiento correctivo, de manera de obtener una población de datos. La idea es agrupar estos datos según la distribución que mejor se adapte al conjunto de datos. Para ello se distribuyen los datos según intervalos de

clase. Se realiza una tabla que indique la frecuencia específica y acumulada para cada intervalo. En un histograma de barras se puede observar las frecuencias de los tiempos de reparación y determinar el intervalo que tiene la mayor frecuencia. Los puntos medios y más altos de cada barra pueden ser unidos a través de segmentos de rectas, y poder observar de manera general la forma de la curva que puede adoptar. Luego se elige el tipo de distribución probabilística con que se va a trabajar.

Por lo general, cuando se quiere producir una función de densidad para los tiempos de mantenimiento correctivo, estos se pueden modelar en las siguientes tres curvas:

1. La Distribución Normal aplica a las relativas tareas de mantenimiento directas y acciones de reparación (tareas de remoción y reemplazo simples) que regularmente requiere una medida del tiempo de arreglo para completar con una pequeña variación.
2. La Distribución Exponencial aplica a las tareas de mantenimiento que envuelven métodos de aislamientos de fallas para la sustitución de partes en sistemas largos que resultan en una tasa de reparación constante.
3. La Distribución Log-Normal aplica a la mayoría de tareas y acciones de reparación en mantenimiento abarcando tareas de varias subdivisiones de frecuencia y tiempo de duración desiguales.

3.2.1.2 Tiempo medio para mantenimiento preventivo (\overline{M}_{pt})

Es el tiempo para ejecutar mantenimiento preventivo a través de acciones para retener un sistema a un nivel de funcionamiento especificado. Este incluye funciones tales como inspección periódica, reparación, reemplazo programado de activos críticos, calibración, reacondicionamiento, etc. \overline{M}_{pt} es el tiempo medio transcurrido para realizar preventivo o mantenimiento programado sobre un activo, y es expresado como:

$$\overline{M}_{pt} = \frac{\sum (fpt_i) \cdot (Mpt_i)}{\sum fpt_i}$$

Donde fpt_i es la frecuencia de la acción del mantenimiento preventivo para cada caso, dado en acciones por hora de operación del sistema, Mpt_i es el tiempo transcurrido requerido para la i ésima acción de mantenimiento preventivo.

El mantenimiento preventivo puede ser completado mientras el sistema está en total operación o durante el tiempo fuera de servicio. \overline{M}_{pt} incluye únicamente el tiempo de mantenimiento para ejecutar acciones sobre el activo, no los tiempos de retraso por logística y administrativas.

3.2.1.3 Tiempo medio para mantenimiento eficaz (\overline{M})

Es el tiempo medio requerido para ejecutar mantenimiento programado (preventivo) y no programado (correctivo). En el se excluye las demoras logísticas y las demoras administrativas, y se expresa de la siguiente manera:

$$\overline{M} = \frac{(\lambda) \cdot (\overline{M}_{ct}) + (fpt) \cdot (\overline{M}_{pt})}{\lambda + fpt}$$

Donde λ es la tasa de mantenimiento correctivo o tasa de falla, y fpt es la tasa de mantenimiento preventivo.

3.2.1.4 Tiempo por demoras logísticas (LDT)

El tiempo fuera de servicio debido a las demoras logísticas, son el resultado de la espera para que los repuestos estén disponibles, la demora por la disponibilidad de un dispositivo de ensayo de equipo para ejecutar el mantenimiento, demora por el transporte, demora para el uso de una instalación requerida para mantenimiento, etc. El tiempo de demora logística no incluye el tiempo por mantenimiento eficaz pero constituye el mayor elemento en el tiempo fuera de servicio total de mantenimiento (MDT).

3.2.1.5 Tiempo por demoras administrativas (ADT)

El tiempo por demoras administrativas se refiere a la proporción del tiempo fuera de servicio durante la cual el mantenimiento es retrasado por razones de naturaleza administrativa. El tiempo por demoras administrativas no incluye el tiempo de mantenimiento eficaz pero, frecuentemente constituye un elemento significativo del tiempo fuera de servicio total de mantenimiento (MDT).

3.2.1.6 Tiempo fuera de servicio por mantenimiento (MDT)

El tiempo fuera de servicio de mantenimiento constituye el tiempo requerido para reparar y restaurar un sistema a la condición operacional completa, o para retener a un sistema en esa condición. El tiempo fuera de servicio de mantenimiento incluye tiempo promedio de mantenimiento eficaz (\overline{M}), demoras de tiempo por logísticas (LDT), y demoras de tiempo administrativas (ADT). La valuación de la media o promedio es calculada desde los tiempos consumidos para cada función y frecuencias asociadas (similar al enfoque para calcular \overline{M}). MTD es el tiempo total fuera de servicio de un activo.

3.2.2.- Factores de horas laboradas de mantenimiento

En el tiempo utilizado para la ejecución de mantenimiento es importante considerar las horas laboradas de mantenimiento durante el proceso. El tiempo que se consume puede ser reducido a través de la aplicación de recursos humanos adicionales en el cumplimiento de tareas específicas. Sin embargo, esto puede hacer costoso el mantenimiento, pero particularmente cuando se requieren niveles altos de destreza para la ejecución de tareas el resultado es menor tiempo global. La mantenibilidad es concernida con la facilidad y economía de ejecutar mantenimiento. Un objetivo es obtener el adecuado balance entre los tiempos transcurridos, tiempo de labor, y personal capacitado a un mínimo costo de mantenimiento.

Por lo tanto, cuando se consideran indicadores de mantenibilidad hay que adicionar los elementos de tiempo de labor. De esta manera, algunos de los indicadores que se deben emplear son los siguientes:

1. Horas laboradas de Mantenimiento por hora de operación del sistema (HLM/HOS).
2. Horas laboradas de Mantenimiento por ciclo de operación del sistema (HLM/Ciclo).
3. Horas laboradas de Mantenimiento por mes (HLM/Mes).
4. Horas laboradas de Mantenimiento por acción (HLM/AM).

Cualquiera de estos factores puede ser especificado en valores medios. Esto se puede hacer de la siguiente manera:

$$\overline{HLM} = \frac{(\sum \lambda_i) \cdot (HLM_i)}{\sum \lambda_i}$$

Donde λ_i es la tasa de falla del i-ésimo activo dado en (fallas/horas), y el HLM_i es el promedio de las horas laboradas en mantenimiento necesarias para completar la reparación del activo.

3.2.3.- Factores de frecuencia de mantenimiento

Como la confiabilidad y la mantenibilidad están estrechamente relacionados los factores de TMEF y λ , que son las bases para determinar la frecuencia de mantenimiento correctivo. La mantenibilidad trata con las características en el diseño de sistemas relativo a minimizar los requerimientos para mantenimiento correctivo, para el sistema cuando asumen un estado operacional.

Adicionalmente la mantenibilidad también trata con características de diseño para minimizar requerimientos para el mantenimiento preventivo. A veces se puede mejorar las exigencias de mantenimiento preventivo al considerar dentro de los objetivos las mejoras de la confiabilidad del sistema. La mantenibilidad tiene el objetivo de proveer el balance adecuado entre mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo al menor costo global.

Tiempo medio entre mantenimiento (TMEM)

Es la media o el promedio del tiempo entre todas las acciones de mantenimiento (correctivas y preventivas), y puede ser calculado como:

$$TMEM = \frac{1}{\frac{1}{TMEM_u} + \frac{1}{TMEM_s}}$$

Donde $TMEM_u$ es la media del intervalo para mantenimiento correctivo, y $TMEM_s$ es la media del intervalo para mantenimiento preventivo. El recíproco de $TMEM_u$ y $TMEM_s$ constituye la tasa de acciones de mantenimiento por hora de operación del sistema.

Tiempo medio entre reemplazos (TMER)

Referido a la media del tiempo entre los reemplazos parciales o totales de componentes del activo, es el mayor parámetro dentro de la determinación de los repuestos requeridos. En ocasiones las actividades de mantenimiento correctivo y predictivo no requieren el reemplazo de una parte del componente. Pero muchas veces se requiere el reemplazo de componentes, lo que induce a la necesidad de tener disponible repuestos y requerimiento de un inventario. Adicionalmente se necesitarán altos niveles de apoyo al mantenimiento.

Este factor es muy importante debido a que permite determinar el apoyo logístico para las actividades de mantenimiento correctivo y preventivo. Para el diseño de la mantenibilidad este parámetro se puede maximizar para minimizar el número de componentes para reemplazos donde sea posible.

3.2.4.- Factores de costo para mantenimiento (ver aplicación en anexo A-1)

Para muchos sistemas, los costos de mantenimiento constituyen la mayor etapa del costo total del ciclo de vida. Los costos de mantenimiento son consecuencia de la planificación en el diseño desde etapas tempranas de desarrollo del proyecto. De ahí

la importancia de considerar el costo total del ciclo de vida como parámetro de diseño mayor para definir los requerimientos de los sistemas.

La mantenibilidad está directamente relacionada con las características del diseño de sistemas que resultará en la realización del mantenimiento a un mínimo costo total.

Al considerar los costos de mantenimiento, debemos considerar los siguientes índices de relaciones de costos como criterio en el diseño de sistemas:

1. Costo por acción de mantenimiento (\$/mes).
2. Costo de mantenimiento por hora de operación del sistema (\$/HO).
3. Costo de mantenimiento por mes (\$/mes).
4. Costo de mantenimiento por tarea o porción de tarea (\$/tarea).
5. La proporción del costo de mantenimiento en el costo total del ciclo de vida.

3.2.5.- Relaciones entre Factores de Mantenimiento

En el mantenimiento de sistemas se encuentran diversos factores que están estrechamente relacionados y altamente dependientes de los indicadores de mantenibilidad ya descritos. Estos incluyen varios factores logísticos, como son los siguientes:

1. Suplir sensibilidad o la probabilidad de considerar la disponibilidad de repuestos cuando se necesite, tasa de demanda de repuestos, suplir tiempo a dirigir para determinados activos, niveles de inventario, etc.
2. Efectividad de ensayo y soporte para equipos (confiabilidad y disponibilidad de ensayos de equipos), aplicación de ensayo de equipo, sistema de ensayo minucioso, etc.

3. Aplicación y disponibilidad de mantenimiento en la instalación.
4. Modos de transporte, tiempo entre mantenimiento de instalaciones, y frecuencia.
5. Organización de mantenimiento efectivo y eficiencia del personal.
6. Capacidad de procesamiento de información y datos, tiempo, y frecuencia.

Es importante considerar las iteraciones entre el sistema primario y sus elementos de soporte, de manera de considerarlas en el establecimiento de requerimientos de sistemas en la fase de diseño conceptual. La mantenibilidad es una característica a considerar en el diseño, que se encuentra estrechamente relacionada al área de soporte del sistema, por lo que, el resultado del diseño de mantenibilidad afecta directamente las exigencias del mantenimiento. De esta manera, especificando los factores de mantenibilidad se puede también dirigir requerimientos cualitativos y cuantitativos para sistemas de soporte, de manera de determinar los efectos de un área sobre otra.

A continuación presentaremos las relaciones entre el tiempo fuera de servicio por mantenimiento y por factores logísticos en la figura 13.

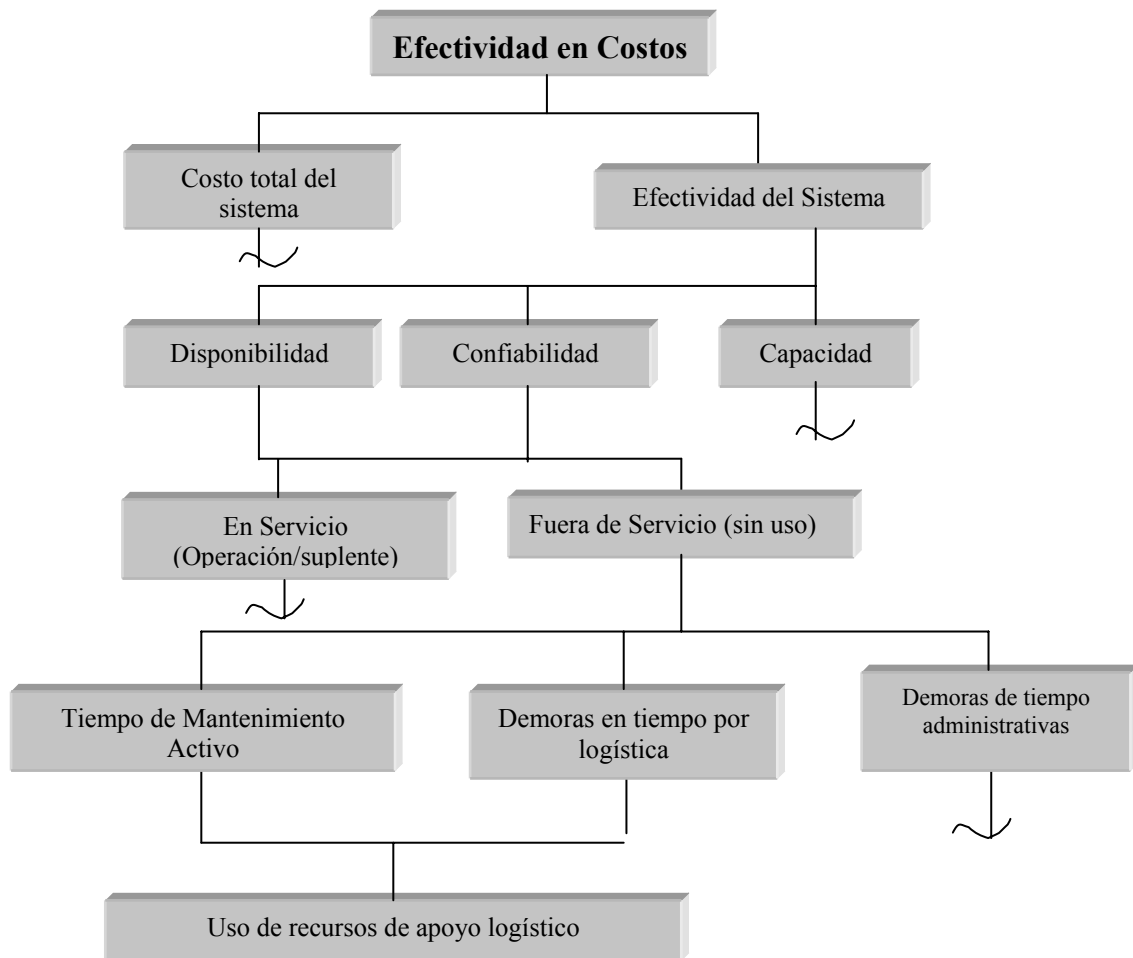


Figura 13. Relaciones entre el tiempo fuera de servicio y los factores logísticos.

CAPÍTULO IV

4.- TÉCNICAS PARA DESARROLLAR ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

4.1- Técnicas Predictivas (ver anexo A-1)

El mantenimiento predictivo es una técnica que permite un método sistemático de monitoreo y tendencia de la condición de equipos. Estas actividades ocurren mientras el equipo está en funcionamiento, y provee un aviso temprano cuando el equipo se encuentra operando en condiciones límites.

4.1.1 Beneficio

El mantenimiento predictivo permite la programación de mantenimiento cuando es requerido y cuando tendrá el menor efecto en actividades programadas requeridas por el equipo en cuestión. Las averías inesperadas de equipos, el mantenimiento programado periódico en fuera de servicio, desmontaje e inspección para determinar condición del equipo son virtualmente eliminados.

Beneficios al implementar el programa de mantenimiento predictivo:

- ✓ La condición del equipo es conocida bajo la dirección de un programa de mantenimiento predictivo, permitiendo que las reparaciones sean planeadas y llevadas a cabo dentro de actividades de apoyo programadas.
- ✓ Reduce el costo de mantenimiento. El mantenimiento necesario puede ser anticipado y planificado. Las actividades de mantenimiento son mejor planificadas desde el punto de vista de mano de obra, repuestos, y herramientas.

- ✓ El mejoramiento del desempeño del equipo se logra a través de esta técnica. El mantenimiento predictivo mide la condición del equipo de manera que se puedan hacer correcciones antes que la ejecución sea comprometida.
- ✓ Provee varias áreas potenciales para ahorros en energía. Elimina la fuente de vibración de alta energía tal como desalineación y desbalance que reducirá el consumo de energía de la máquina. El desbalance de la fase del motor, que incrementa el consumo de energía puede ser corregido obteniendo ahorros en energía e incremento de la vida del motor.

4.1.2 Importancia de la Técnica

El mantenimiento predictivo es una técnica que chequea el estado funcional de un activo mientras se encuentra en operación usando una o más herramientas sofisticadas. Las capacidades para el mantenimiento predictivo han mejorado notablemente debido al bajo costo de la utilización de equipos de computación de escritorio y al incremento de la sofisticación de instrumentos de monitoreo de equipos. También se puede evitar mucho o poco mantenimiento si el equipo es monitoreado en una base regular, en donde se suministran datos que pueden ser usados para proyectar probables situaciones de alarma del estado del equipo.

4.1.3 Descripción de la técnica para mantenimiento predictivo

El primer paso es desarrollar un programa de mantenimientos predictivo efectivo que permita reducir los costos del programa de mantenimiento, para ello se requiere determinar el costo por personal de mantenimiento, el costo por reparación, el costo de repuestos y el costo asociado a pérdidas incurridas debido a al desmontaje del equipo. El próximo paso es identificar el número de horas hombres requerido para monitorear el equipo. Las maquinarias simples (motores, bombas, ventiladores, etc.) requerirán pocos puntos para detectar con precisión el desarrollo de problemas, en equipos complejos la situación puede ser mucho más complicada, tal como ocurre en

turbinas o generadores. Mediante el conteo de los equipos de medición y el número de puntos de monitoreo, se puede estimar el nivel de mano de obra requerido.

La criticidad del equipo, a veces puede requerir mayor frecuencia de monitoreo y en consecuencia incrementará los requerimientos de mano de obra. La frecuencia de monitoreo es una función de la naturaleza crítica del equipo; así que el próximo paso es estructurar el sistema de clasificación de equipos por criticidad. Por ejemplo:

- ✓ Clase 1→ **Equipos Esenciales.** Incluye equipos que deben estar en funcionamiento para la continuación de la totalidad o la mayor parte del proceso. La pérdida de este equipo puede tener un mayor impacto en seguridad, productividad y disponibilidad. También se incluye en este grupo los supuestos equipos que tienen un alto costo de reparación, o una larga desventaja en tiempo para clasificar partes de repuestos.
- ✓ Clase 2→ **Equipos Críticos.** Incluye equipos que limitan la mayor parte de un proceso, y equipo con altos costos iniciales de reemplazo, o problemas de mantenimiento crítico.
- ✓ Clase 3→ **Equipos Serios.** Incluye equipos que no son críticos para procesos, pero requieren monitoreo para asegurar un desempeño aceptable de los procesos.
- ✓ Clase 4→ **Otros Equipos.** Incluyen equipos que son propensos a fallas prematuras debido a modos de operación severos, pero no son considerados críticos para los procesos.

Una vez que el equipo ha sido apropiadamente clasificado, se puede establecer la programación de adquisición de datos y planificar los niveles de mano de obra requeridos. Si no hay el personal requerido en planta, el ahorro potencial del programa debe justificar personal adicional.

Además de los salarios, los costos deben incluir el costo de diagnóstico y análisis del equipo, espacio de la oficina, y cualquier otro costo que será cargado al

programa. Los costos deben incluir también entrenamiento y desarrollo de habilidades adicionales por parte del personal.

Un sistema típico de mantenimiento predictivo contiene cuatro componentes principales: un microprocesador basado en recolectar datos, una computadora central, software y transductores. Cada uno de estos elementos es importante y es vital que funcionen bien como un sistema total. Algunas características importantes del sistema integrado a considerar son:

- ✓ **Uso de software y hardware amigables.** El programa de mantenimiento predictivo frecuentemente se asociará a técnicos e ingenieros que comprenden los mecanismos de operación de la máquina pero no necesariamente tienen suficiente conocimiento sobre computadores. El hardware y software deben ser diseñados para operación simple y franca. La corrección del error debe ser sencilla, pero no debe permitir la libre opción de modificar los datos.
- ✓ **Manejo y dirección de adquisición de datos automatizados.** El objetivo de usar un microprocesador destinado a recolectar datos y una computadora central, es eliminar la posibilidad del error humano durante la entrada de datos, minimizando requerimientos de mano de obra, y automatizar el manejo de datos tanto como sea posible.
- ✓ **Flexibilidad.** El sistema debe ser capaz de recolectar, guardar y presentar datos tales como datos de vibración en una variedad de formatos (desplazamiento, frecuencia, velocidad, aceleración) y generar un análisis preciso de los datos adquiridos. El sistema debe aceptar cualquier entrada de transductor comercialmente disponible.
- ✓ **Confiabilidad.** El hardware y software deben tener antecedentes demostrables de confiabilidad operativa. Es conveniente consultar con usuarios que hayan tenido experiencia con el sistema y conozcan las fortalezas y debilidades del mismo.

- ✓ **Precisión.** Los datos deben ser precisos, puesto que las decisiones sobre el equipo se harán basándose en la información que es recolectada y analizada.
- ✓ **Soporte Técnico.** El entrenamiento y el soporte técnico es una consideración muy importante. Una configuración apropiada para mantenimiento predictivo debe proveer información valiosa a un mínimo nivel de mano de obra, y solo un limitado conocimiento sobre el uso de técnicas de mantenimiento predictivo. Sin embargo, cada sistema requerirá algún entrenamiento en el fundamento del desarrollo y diagnóstico de las bases de datos.
- ✓ **Generación de Reporte.** Es importante una máxima flexibilidad en formato y contenido. El sistema debe ser capaz de generar reportes a varios niveles de detalles. Estos reportes pueden ser:
 - Reporte excepción. Este reporte consiste en la enumeración de equipos que tienen excesos en una o más alarmas o límites de alerta, puntos de datos perdidos, o equipo con una falla predecida antes de la próxima medición de datos programada.
 - Reporte de la última medición. Este reporte es una enumeración de componentes, observaciones en sitio, proyección del tiempo de falla, y evitar puntos de medición. El reporte podría incluir información mostrada en el reporte excepción y una completa revisión de todos los equipos.
 - Reporte del histórico de cada equipo. Incluyendo todos los componentes.
 - Si el sistema no genera automáticamente estos reportes, los requerimientos de mano de obra pueden incrementar substancialmente.

Si uno de los factores limitantes es el nivel del personal o la experiencia; o si el análisis del costo beneficio no es completo, la mejor solución puede ser la creación de un programa piloto. Los proveedores de equipo ayudarán a establecer un programa de entrenamiento del personal de la empresa, normalmente no incluido en el contrato de

servicio. Esta opción permite el desarrollo de los beneficios financieros, provee entrenamiento disponible para el personal interno, y el desarrollo de una base de datos. Otra opción es contratar personal especializado para ejecutar el programa. Con esta opción la necesidad de personal interno adicional es eliminada, así como la necesidad de una inversión en equipos y análisis de datos. En este caso se debe evitar que los proveedores coticen el precio del servicio por mediciones de puntos sin tener en cuenta el tipo de equipo. Un precio basado en el tipo de equipo (motores, bombas vs turbinas, generadores) es el más apropiado.

Hay numerosas técnicas disponibles para la implementación del programa de mantenimiento predictivo. Las técnicas que deben ser implementadas en programas de mantenimiento predictivo incluyen:

- ✓ **Análisis de Vibración**, el cual es ejecutado en equipos mecánicos para evaluar la condición de sus partes mecánicas y los efectos sobre partes relacionadas, mediante la utilización de equipos de computación. La efectividad del montaje es esencial para evaluar vibración en ejes, rodamientos, alineación de acoplamiento y balance de impulsores, para determinar si el equipo está funcionando apropiadamente y dentro de las especificaciones.
- ✓ **Análisis de Ferrografía**, un uso particular de este análisis como técnica predictiva computarizada, es la evaluación de la condición de fluidos lubricantes o fluidos hidráulicos. Los lubricantes o fluidos hidráulicos son analizados por condición, nivel y tipo de contaminación. Una amplia corrección de problemas en equipos relacionados con los lubricantes/fluidos y métodos de mantenimiento pueden ser determinados utilizando la ferrografía. La utilización de análisis de aceites, facilita el mantenimiento y ayuda a extender la vida de equipos críticos.
- ✓ **Termografía**, es usada para analizar equipos que exhiben sobrecalentamiento y transferencia de calor cuando no operan apropiadamente. Estos equipos incluyen tanta variedad como paneles interruptores de circuito, tableros de circuito electrónicos, sistema de tuberías criogénicas, y muchos otros.

- ✓ **Alineación Láser**, se utiliza para detectar desalineación en componentes mecánicos de equipos que pueden acelerar el desgaste o posible falla catastrófica. Esta técnica se utiliza para verificar la apropiada fabricación e instalación de equipos garantizando la uniformidad de los equipos mecánicos antes de la operación. Se utiliza también para monitoreo en línea y asegurar que se mantenga la alineación apropiada durante la operación del equipo. La correcta alineación reducirá el consumo de energía.
- ✓ **El Análisis de Motores**, es utilizado para determinar el nivel de degradación en circuitos de motores eléctricos, tales como resistencia de cada bobina de fase con el motor, resistencia fase tierra, la inductancia de cada bobina y la capacitancia a tierra, todo ello con el motor desconectado. desconectado de la fuente de energía. La detección y corrección de los desbalances reduce el consumo de energía y previene el desgaste del motor.
- ✓ **El Ultrasonido**, es una tecnología utilizada para detectar defectos ocultos en materiales, especialmente metales. Esta tecnología ha avanzado a un equipo controlado por microprocesador completamente digital y portátil para detectar defectos por ultrasonido. Es más seguro y rápido que usar la tecnología de rayos – X para detectar defectos.
- ✓ **La Inspección Visual** donde los ingenieros de mantenimiento, sobre bases regulares, inspeccionan visualmente cada sistema crítico.
- ✓ Un comprensivo programa de mantenimiento predictivo se compone de varias técnicas, las cuales combinadas pueden predecir problemas de fondo tanto a nivel de equipos mecánico como eléctricos.

4.1.4 Métodos para la estimación de confiabilidad utilizados en las técnicas predictivas

Para la estimación de la confiabilidad o la probabilidad de fallas, existen dos métodos que dependen del tipo de datos disponibles, estos son:

- **Estimación basada en datos de condición**, altamente recomendable para equipos estáticos, que presentan patrones de “baja frecuencia de fallas” y por ende no se tiene un “historial de fallas” que permita algún tipo de análisis estadístico.
- **Estimación basada en el historial de fallas**, recomendable para equipos dinámicos, los cuales por su alta frecuencia de fallas, normalmente permiten el almacenamiento de un historial de fallas que hace posible el análisis estadístico.

El análisis tradicional de confiabilidad, basado en el análisis estadístico del tiempo para la falla, ha sido exitosamente utilizado para mejorar el mantenimiento preventivo y traer los equipos y sistemas hasta los actuales niveles de desempeño. Sin embargo, buscando la mejora continua de sus procesos, en las tres últimas décadas, algunas industrias han hecho grandes esfuerzos en la recolección de data diferente a la data de falla, a través de programas de monitoreo de la condición (mantenimiento predictivo), con la finalidad de optimizar las frecuencias de mantenimiento de sus equipos, y tomar acciones proactivas para evitar la ocurrencia de la falla.

La mencionada data de condición, ha sido usada principalmente en forma determinística, es decir, para hacer diagnósticos puntuales, debido a la falta de una adecuada metodología de análisis probabilístico. En esta sección se establecen las bases conceptuales para el cálculo de confiabilidad y probabilidad de falla de equipos estáticos basados en la data de condición. La columna vertebral de este método es el análisis Carga-Resistencia.

4.1.4.1 Análisis Carga-Resistencia

El análisis Carga-Resistencia tiene como premisa el hecho de que las fallas son el resultado de una situación donde la carga aplicada excede la resistencia. Carga y Resistencia son usados en el sentido más amplio de la palabra; es decir, la carga pudiera ser la presión de operación, mientras la máxima presión de operación permisible sería la resistencia. Similar análisis se hace para cualquier otro parámetro relevante de la condición como vibración para equipos dinámicos, o reducción de espesor para el caso de equipos estáticos.

En todos los casos existirá un valor actual de la condición que se monitorea, el cual representará la carga, y un valor límite de la condición que representara la resistencia. Esta última normalmente esta regulada por normas y estándares de la ingeniería.

Contrario a la creencia general, en la mayoría de los casos ni la carga ni la resistencia son valores fijos, por el contrario, sus valores son estadísticamente distribuidos. Cada distribución tiene su valor medio, denotado por μ_s para la carga y μ_r para la resistencia y sus desviaciones estándar σ_s y σ_r respectivamente. Esto es ilustrado en la figura 14.

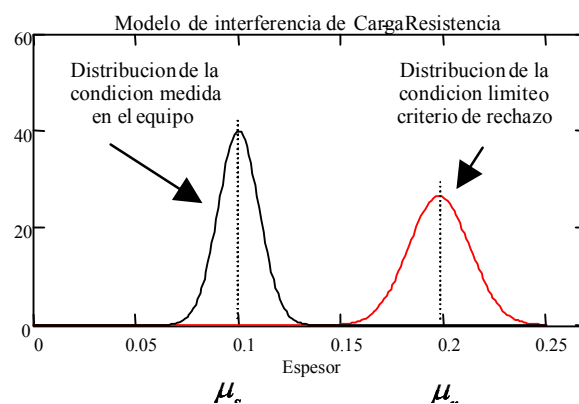


Figura 14. Modelo de Interferencia de Carga – Resistencia.

Cuando la distribución de la condición medida o monitoreada en el equipo tiene algún solape con la distribución de la condición límite o criterio de rechazo, en ese momento existe probabilidad de falla.

La confiabilidad de un elemento bajo la aplicación de una carga es la probabilidad de que su resistencia exceda la carga. Dicha confiabilidad puede calcularse con la siguiente expresión:

Confiabilidad = Probabilidad (Resistencia > Carga)

$$\text{Confiabilidad} = \Phi \left(\frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \right)$$

Donde μ_r y μ_s son las medias de las distribuciones de la resistencia o criterio límite y el esfuerzo o condición monitoreada respectivamente, y σ_r y σ_s las respectivas desviaciones estándar.

El operador “ Φ ”, indica que con el resultado obtenido de la ecuación entre paréntesis, debe buscarse el valor de probabilidad correspondiente en una tabla de la distribución normal.

4.1.4.2 Estimación de la Confiabilidad basada en la Condición

Un parámetro de condición (PC) es cualquier variable física que revele información acerca de las características de desempeño de un equipo o componente. Un parámetro relevante de condición (PRC) es un parámetro cuyo valor numérico caracteriza y cuantifica la condición de un equipo o componente en cualquier instante de su vida operativa.

Para que un PC sea un PRC, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Caracterizar la condición del equipo.

- Ajustar su valor continuamente durante su vida operativa.
- Describir numéricamente la condición del equipo o componente.

Un buen ejemplo de un PRC es el espesor de pared “E”, el cual es comúnmente usado en la industria petrolera para caracterizar el proceso de deterioro debido al fenómeno erosión-corrosión en tuberías en general y en algunos recipientes a presión.

4.2.- Técnicas Preventivas (ver anexo A-1)

La mayoría de los sistemas han tenido continuidad operativa larga debido al mantenimiento correctivo. El mantenimiento correctivo es la ejecución de aproximadamente del total de los recursos imprevistos o tareas de mantenimiento inesperado. Sin embargo, es la planificación previa de inspección y/o tareas de reparación la que minimiza la ocurrencia de un evento.

Las estrategias correctivas restituyen las capacidades funcionales de equipos o sistemas debido a una falla o mal funcionamiento. Sin embargo, el mantenimiento correctivo es más costoso que el mantenimiento preventivo debido a las interrupciones no planificadas de operaciones y el apoyo logístico que implica, tiempo inactivo por disponibilidad de partes de repuestos, y demoras en la localización de averías causados por fallas.

4.2.1 Programa de mantenimiento preventivo

En general, cuando creamos un nuevo o mejoramos un programa de mantenimiento preventivo se requieren dos tópicos de información esencial, estos son: (1) identificación de tareas de mantenimiento que van a ser ejecutadas y (2) cuándo cada tarea de mantenimiento debe ser ejecutada (Ver figura 15).

Cualquier método es usado para determinar qué tarea o si una tarea al ser ejecutado resulta en un tiempo adecuado, condición favorable, o encontrando fallas mediante la selección de tareas. El siguiente paso es incorporar el programa de

mantenimiento preventivo dentro de la infraestructura de operaciones existentes y asegurar que sea implementado en las operaciones de cada día.

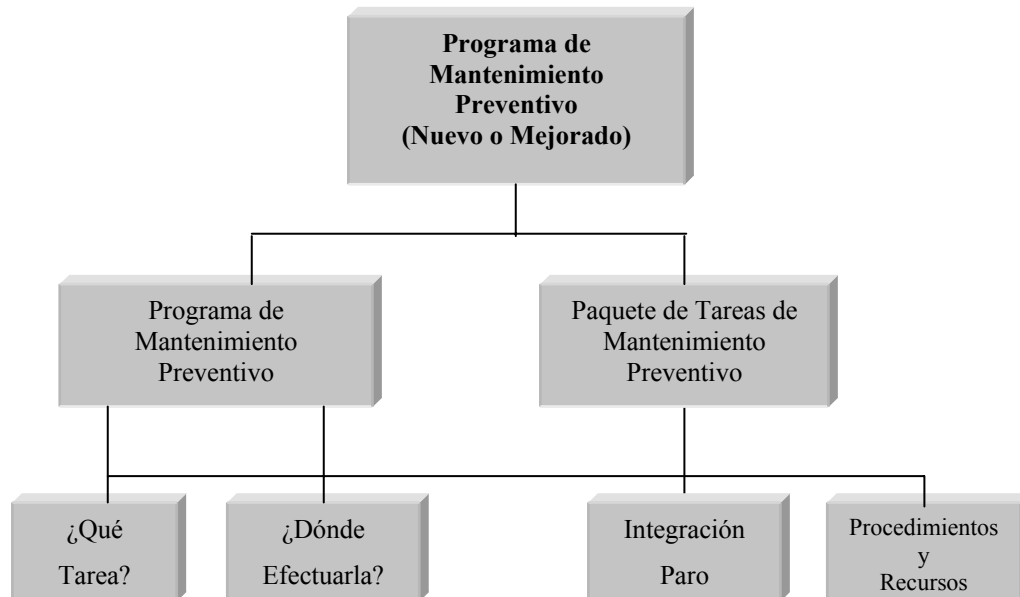


Figura 15. Desarrollo/Mejoramiento de un Programa de Mantenimiento Preventivo.

Además, una serie de preguntas deben ser respondidas antes de la implementación de cualquier programa. Entre estas preguntas tenemos las siguientes:

- a) ¿Están los nuevos procedimientos o modificaciones requeridos por los procedimientos actuales?
- b) ¿Se encuentran todos los materiales estándares (herramientas, filtros) disponibles?
- c) ¿Está solicitado cualquier mecanizado o instrumentación?
- d) ¿Hay personal disponible requerido para la ejecución del programa?
- e) ¿Hay requerimientos de inversión de capital?
- f) ¿El programa nuevo o mejorado afectará la cantidad de repuestos en reserva?
- g) ¿Cuánto tiempo tomará incorporar el programa nuevo o mejorado al sistema de información de la dirección de mantenimiento?

- h) ¿Si los paros completos deben ser planificados periódicamente, las tareas e intervalos de tareas de mantenimiento preventivo permiten tal programación?
- i) ¿Las nuevas tareas requieren algún ciclo, son un común denominador con otros intervalos de tareas existentes?

4.2.2 Elementos del programa de mantenimiento preventivo

El mal funcionamiento o falla de un equipo puede presentar una significativa oportunidad de aprendizaje en donde los conocimientos técnicos pueden ser obtenidos a partir de la comprensión de la falla reportada, análisis causa raíz, y programas de retroalimentación de acción correctiva. Sin embargo con tales programas, es prácticamente imposible establecer la acción correctiva apropiada o decisión inteligente si cualquier acción de mantenimiento preventivo es posible. Un buen sistema de reporte de falla es vital para retener o incrementar el tiempo medio entre fallas que es parte de un programa de mejoramiento de disponibilidad.

El empleo prudente de las tareas de acondicionamiento necesita de una completa tecnología de diagnóstico, que ha evolucionado con nuevas técnicas y aplicaciones. La tecnología es dedicada para el seguimiento, entendimiento, y contribución al área generalmente referida a “tecnología de mantenimiento predictivo”. Algunas de las herramientas que comprenden tecnología de mantenimiento predictivo son las siguientes:

- a. Vibración, pulso, y mediciones de energía de picos.
- b. Análisis de ruidos.
- c. Termografía.
- d. Inspección con fibras óptica.
- e. Detección de trazas de elementos químicos.

- f. Análisis de desechos.
- g. Análisis de lubricantes.
- h. Mediciones de esfuerzo/deformación/torque.
- i. Ensayos no destructivos
- j. Microprocesadores con sistema de software experto.

4.2.3 Paquete de tareas para mantenimiento preventivo

Este paquete consiste en tres elementos principales:

1. **Especificación de tareas.** La especificación de tareas proporciona de una completa definición técnica y los requerimientos específicos para la implementación por la organización de mantenimiento. Este tipo de documento que representa la transición entre el mundo real y el ideal, o detalla la medición y evaluación de los requerimientos para tareas orientadas a condición, o especifica los requerimientos críticos que deben cumplirse en trabajos mayores orientados al logro de tiempos mínimos de ejecución.
2. **Procedimiento.** Es un documento básico que guía la ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo. El documento puede ser una página de instrucción en detalles para una tarea simple o compleja, de manera de precisar como las tareas de mantenimiento preventivo van a ser logradas.
3. **Logísticas.** Las logísticas vinculan una variedad de actividades de apoyo administrativo y en producción. Las típicas consideraciones en logísticas incluyen herramientas, piezas de repuestos, soporte de proveedores, entrenamientos, documentos y planos, decisiones de fabricación y compra, ensayos de equipos, planificación, etc. Claramente, estas consideraciones interactúan estrechamente con la especificación de tareas y procedimiento, constituyendo una mayor porción de la planeación de mantenimiento.

En resumen, el programa de mantenimiento preventivo puede ser creado o mejorado a través de la implementación de las ideas dadas anteriormente. Con el soporte de tecnologías claves, que producirá información sobre “qué tareas” y “dónde hacerlas”.

4.2.4 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad es una técnica, que permite llevar los objetivos de la mayoría de las prácticas de mantenimiento preventivo para preservar el estado operacional del equipo. Esta técnica o metodología establece que consideraciones acerca de “por qué” de ciertas acciones de mantenimiento preventivo y si se están tomando, y “qué” prioridad debe ser asignada a los gastos de recursos para el mantenimiento preventivo. Casi a menos que falle, se comienza la planeación de mantenimiento con los equipos y se busca especificar, tan rápido como sea posible, aquellos componentes necesarios para mantenerlos funcionando.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad no es sólo otro enfoque para estos procesos repetitivos. El concepto básico de MCC es realmente bastante simple y fuertemente está caracterizado como una organización de ingeniería de sentido común. A continuación se describen los rasgos que definen y caracterizan al MCC, que lo diferencian de cualquier otro proceso de planificación de mantenimiento preventivo.

4.2.4.1 Preservar las funciones del sistema

A diferencia de la creencia en que el mantenimiento preventivo se ejecuta para preservar la operación del equipo, el objetivo primario de MCC es preservar la función del sistema. Aunque la preservación de equipos conduce finalmente a la preservación del sistema, ello no constituye el paso inicial en el proceso de MCC. En MCC, el resultado esperado es conocido, y el objetivo primordial es preservar la función del sistema.

Esta característica facilita la toma de decisiones sistemáticas en etapas posteriores del proceso estableciendo la relación equipo función sin asumir a priori que cada componente del equipamiento es igualmente importante, una tendencia que suele quitarle efectividad a la aplicación del mantenimiento preventivo.

4.2.4.2 Identificar modos de fallas que puedan producir fallas funcionales no deseadas

Después de la preservación de la función del sistema, el próximo tópico en la consideración de MCC es evitar pérdidas de funciones o fallas funcionales. Las fallas funcionales tienen muchas formas y pueden ocurrir en varios escenarios, todos deben ser considerados.

La clave para la identificación de fallas es identificar los modos de fallas específicos en componentes específicos que pueden potencialmente producir los paros funcionales no deseados.

4.2.4.3 Establecer priorización de modos de fallas

En la conservación de funciones del sistema, MCC provee un enfoque sistémico para decidir que prioridad debe ser asignada al presupuesto y cual debe ser la asignación de recursos. En MCC la priorización de los modos de falla es esencial, debido a que las fallas funcionales y sus relaciones con los modos de fallas son tan diversas como las funciones y componentes que afectan.

4.2.4.4 Evaluación de las tareas de mantenimiento preventivo en base a su pertinencia y efectividad

Las características descritas anteriormente ayudan al desarrollo de una ruta muy específica para el dónde y el por qué, de las tareas de mantenimiento y la prioridad que les debe ser asignada. Cada tarea potencial debe ser evaluada tanto por su pertinencia (ej.: prevención o mitigación de una falla, detectar la presencia de la falla,

o descubrir una falla oculta) como por su efectividad (ej.: justificar el gasto de recursos para hacerlo).

Generalmente, si se considera más de una tarea como aplicables y efectivas para la solución de un problema específico, hay que seleccionar la menos costosa. Si una tarea falla ya sea en pertinencia o en efectividad, se debe hacer una decisión en base a la revisión del modo de falla.

4.2.4.5 Consideraciones de Costo – Beneficio

La primera razón para la invención de MCC fue la necesidad a desarrollar una estrategia de mantenimiento preventivo que pudiera orientar adecuadamente la disponibilidad y seguridad del sistema, sin la elaboración detallada e impráctica de los análisis de costos de alta complejidad.

El éxito en la estructuración de las tareas adecuadas para mantener la condición operacional del sistema o equipo, se atribuye al uso de la ejecución y diagnóstico por monitoreo como una herramienta de mantenimiento preventivo.

Las razones para el uso de esta herramienta son: el control y reducción de costos de operación y mantenimiento, el incremento en la disponibilidad, y por ende los beneficios económicos obtenidos.

4.3- Paradas de Plantas (ver anexo A-1)

Las paradas de plantas deben ser planificadas a través de un enfoque disciplinado para asegurar un nivel de integridad continuo de la planta y los equipos mediante un proceso gerencial proactivo. Se requiere un nivel efectivo en Gerencia de Mantenimiento de manera de optimar todos los recursos, las herramientas y los equipos para completar la parada programada en forma segura, según el programa, dentro de las limitaciones presupuestarias; mientras se asegura la confiabilidad del activo para el ciclo esperado de producción. La buena práctica en los lineamientos

gerenciales permite reducir los costos, el tiempo de ejecución y la frecuencia de las paradas.

La Gerencia de Planta debe generar una estrategia con lineamientos orientados hacia mantenimiento de las unidades de procesos, determinando las necesidades de recursos humanos, recursos materiales y herramientas, estableciendo metodologías que permitan la buena ejecución de las diferentes actividades, una buena planificación y organización de todos los objetivos o necesidades que se quieren cubrir. El cumplimiento de estos lineamientos dará como resultado el manejo eficiente de tecnologías y sistemas de paradas de plantas de manera práctica y efectiva en términos de costos, y adicionalmente permitirá mejorar esta práctica.

4.4.- Optimización de Inventarios (ver anexo A-1)

La optimización de inventarios de repuestos identifica el conjunto óptimo de componentes para minimizar los costos del inventario, mientras se aumenta al máximo la disponibilidad de equipos en el sistema. El análisis de los requerimientos de partes de repuestos, basado en los datos sobre el sistema y fallas del componente, identifica el número de repuestos que deben existir en almacén, permitiendo optimizar el tiempo de reparación. El análisis de los repuestos, junto con el análisis del costo de mantenimiento, ayuda a identificar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para la mejora de confiabilidad. Lo recomendable es combinar la meta de confiabilidad y optimización de las combinaciones para desarrollar los inventarios de repuestos lo más efectivo posible.

La utilización de metodologías de Confiabilidad Operacional permite establecer estrategias más acertadas sobre el nivel de equipos y número de repuestos que deben existir en el almacén, así como los requerimientos de materiales y herramientas que deben estar disponibles en los almacenes de la instalación. De esta manera se puede establecer el nivel de “stock” de materiales y repuestos de cada sistema y/o equipo logrando un costo óptimo de inventario.

4.5.- Inspección (ver anexo A-1)

Para las actividades de inspección, el análisis de criticidad facilita y centraliza la implantación de un programa de inspección, dado que la lista jerarquizada indica donde vale la pena realizar inspecciones, y ayuda a determinar los criterios de selección de los intervalos y tipo de inspección requerida para sistemas de protección y control (presión, temperatura, nivel, velocidad, espesores, flujos, etc.), para equipos dinámicos, estáticos y estructurales.

Para la estimación de los intervalos óptimos de inspección se recomienda la utilización de modelos de optimización como el modelo Costo-Riesgo-Beneficio.

El modelo Costo-Riesgo-Beneficio permite comparar el costo asociado a una actividad de mitigación del riesgo (mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo, reemplazo, reacondicionamiento, rediseño, rehabilitación, actualización tecnológica, etc.), contra el nivel de reducción de riesgo o mejora en el desempeño debido a dicha acción. En otras palabras, el modelo permite saber “cuanto se obtiene por lo que se gasta”. Este modelo permite construir una curva que define el riesgo asociado a cada intervalo de inspección, en donde se puede identificar el mínimo de la curva, que define el intervalo o frecuencia que asume el juego óptimo de menor riesgo al menor costo.

4.6.- Predicción del tiempo promedio para reparar (TPPR)

Las predicciones pueden ser utilizadas para resaltar aquellas áreas de un sistema que exhibe una pobre mantenibilidad, justificando la necesidad de mejorar, modificar, o cambiar el diseño. Esto también permite realizar evaluaciones tempranas de si la predicción del tiempo de fuera de servicio del sistema y los requerimientos en logística, son adecuados y consistentes con los requerimientos y asignaciones para el sistema operacional.

La técnica de predicción del tiempo promedio para reparar (TPPR), que se va a desarrollar en los siguientes puntos, es un enfoque rápido, simple, preciso y efectivo para determinar un parámetro esencial a considerar en el diseño, a través de los tiempos de reparación. La utilización de los TPPR durante el proceso de diseño de un producto o proceso le permite al ingeniero definir efectivamente ahorros, logísticas y programas de mantenimiento.

4.6.1 Definición del tiempo promedio para reparar

En general, el TPPR de un sistema es un estimado promedio del tiempo requerido para ejecutar mantenimiento correctivo, el cual consiste en aislamiento de fallas y su corrección. Para los análisis propuestos, la corrección de fallas está dividida en desmontaje, intercambio, reensamblaje, alineación y actividades administrativas. El tiempo para la reparación de una unidad mantenible, generalmente consiste de un gran número de lapsos de tiempo relativamente cortos de períodos de reparación, y un número pequeño de lapsos de tiempos extensos de períodos de reparación. Lo anterior puede corresponder al caso más usual donde las unidades en fuera de servicio por falla, son reemplazadas por equipos de apoyo (“spares”) en el sitio al detectarse una falla. Los tiempo de fuera de servicio extensos ocurren donde es difícil realizar diagnóstico o donde remover una parte defectuosa es complicada debido a, por ejemplo, partes oxidadas o partes difíciles de desmantelar. El contar con una colección de datos de campo referente a tiempos de reparación, permite a los ingenieros de diseño una oportunidad de evaluar el tiempo promedio para reparar (TPPR) de sistemas corrientes (actuales), o la predicción del TPPR de un nuevo sistema según sus características con el sistema actual.

El TPPR es un parámetro útil que debe ser usado en forma temprana en la planeación y etapas de diseño de un sistema. El TPPR se utiliza en la evaluación de accesibilidad y localización de componentes del sistema; por ejemplo, un componente que falla con mucha frecuencia debe localizarse donde se puede remover y reemplazar fácilmente. La estimación de TPPR puede también dictar cambios en el

diseño de sistemas para definir el criterio de tiempo para sistemas críticos. Adicionalmente, el parámetro ayuda en el cálculo del costo del ciclo de vida de un sistema, al incluir costo del tiempo promedio consumido en una tarea de reparación.

El TPPR se definido como el promedio de tiempo necesario para solucionar problemas, remover, reparar, y reemplazar un componente fallado en el sistema. Un intervalo estimado para TPPR puede ser desarrollado desde la media de la muestra de datos, dentro de un límite inferior y superior con un límite de confianza.

4.6.2 Distribución Log-Normal

La distribución comúnmente más usada para describir la frecuencia actual de ocurrencia del tiempo para reparar en un sistema es la log-normal debido a que refleja duraciones cortas de tiempo de reparación, un extenso número de observaciones estrechamente agrupados sobre algún valor modal, y largos tiempos de reparación en las con menor frecuencia de ocurrencia. En la figura 16 se muestra la curva representativa de una distribución log-normal.

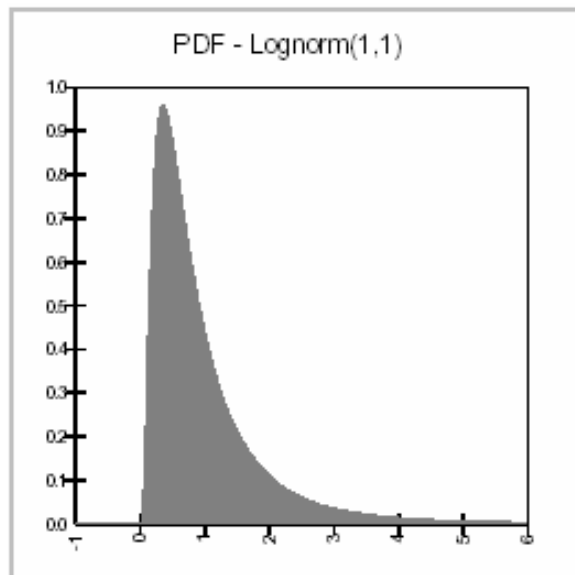


Figura 16. Distribución Log-Normal.

Ahora ilustraremos la metodología para el cálculo de TPPR para una parte sustituible, mediante el análisis de datos en el campo.

$$(1) \quad t'_i = \ln t_i$$

Utilizando métodos estadísticos, la máxima probabilidad estimada, o el mejor valor estimado de la esperanza es:

$$(2) \quad \bar{t}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t'_i$$

La varianza se estima como:

$$(3) \quad s'^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t'_i - \bar{t}')^2$$

Por consiguiente, la esperanza de la distribución log-normal se calcula de la siguiente forma:

$$(4) \quad \mu = TPPR = e^{(\bar{t}' + \frac{s'^2}{2})}$$

y la desviación estándar del tiempo para reparar es:

$$(5) \quad \sigma = TPPR \sqrt{(e^{s'^2} - 1)}$$

4.6.3 Implementación del TPPR

El diseñador debe conocer el concepto de mantenimiento global y las condiciones de operación del nuevo sistema; por ejemplo, cómo y dónde el sistema va a ser operado y cómo sus unidades serán desmontadas. Con esta base, el diseñador puede proseguir en la aproximación del procedimiento de mantenimiento del nuevo sistema, luego seleccionar un sistema existente que ha sido expuesto a condiciones operacionales similares y que posea un determinado historial de datos operacionales.

Después se evalúa la similitud entre los dos sistemas, en base a lo cual el diseñador puede determinar factores de conversión seguros para ajustar datos del sistema existente a las necesidades del nuevo sistema. Una vez que esto es hecho las predicciones del nuevo sistema son más significativas y precisas.

4.6.4 Elementos de TPPR

La predicción del TPPR de un sistema empieza a nivel de unidades reemplazables donde una unidad defectuosa es removida y reemplazada para restaurar al sistema a su condición original. Luego la predicción del TPPR del sistema se logra a través de la integración de los TPPR de las diferentes unidades mantenibles. A continuación definiremos los elementos que son usados en la predicción del TPPR de un sistema:

Aislamiento de Fallas: Es el tiempo asociado con aquellas tareas requeridas para aislar la falla del equipo.

Desmontaje: Es el tiempo asociado con el procedimiento para acceder y desmontar, para el reemplazo de un equipo o varios identificado durante el proceso de corrección de la falla.

Intercambio: Es el tiempo asociado con el levantamiento y reemplazo de un equipo defectuoso o el equipo más deficiente.

Reensamblaje: Es el tiempo asociado con el cierre del equipo después que el intercambio es ejecutado.

Alineación: Es el tiempo asociado con alinear el equipo reemplazable después que la falla haya sido corregida.

Verificación: Es el tiempo asociado con la verificación de que una falla haya sido corregida y el sistema se puede operar.

Tasa Constante de Falla: La tasa de fallas que resulta estrictamente de la aleatoriedad o oportunidad de eventos. Este tipo de fallas ocurren predominantemente en el período de vida útil de la unidad.

4.6.5 Establecer reglas y suposiciones

En la predicción, aplican ciertas reglas establecidas y suposiciones como son:

- ✓ El tiempo Promedio para Reparar (TPPR) no incluye el tiempo utilizado en las actividades administrativas necesarias para ejecutar mantenimiento, que son generalmente tiempo para llenar una petición, tiempo para conseguir herramientas, tiempo de descanso, tiempo en espera por repuestos, etc.
- ✓ Todos los equipos experimentan una tasa de falla constante.
- ✓ El mantenimiento es ejecutado en concordancia con los procedimientos establecidos y el personal apropiadamente entrenado.
- ✓ Todas las tareas son ejecutadas secuencialmente por alguna escuadrilla del personal de mantenimiento.
- ✓ La predicción depende del uso de datos de confiabilidad y mantenibilidad registrados, y la experiencia obtenida a partir de sistemas y componentes comparables bajo condiciones similares de uso y operación.

4.6.6 Nivel de predicción del sistema

A nivel del sistema, el Tiempo Promedio para Reparar (TPPR) se calcula por la suma de los productos de los TPPR de cada equipo reemplazable y sus correspondientes tasas de fallas; el resultado se divide entre la suma de todas las tasas de fallas de los equipos reemplazables.

Matemáticamente, esto se puede expresar como:

$$\mu_{SISTEMA} = TPPR_{SISTEMA}$$

$$\mu_{SISTEMA} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot TPPR_i ; \text{ donde } \lambda_i = \text{la tasa de falla de cada equipo o}$$

componente a ser reparado.

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i ;$$

y la varianza del sistema:

$$\sigma_{SIS}^2 = \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \cdot \sigma_i^2$$

En conjunto, la predicción es un proceso temprano directo y útil en la estimación del Tiempo Promedio para Reparar de sistemas. Aún con un historial de datos fijos limitados, si la predicción se utiliza en forma temprana durante la fase de diseño, el valor derivado debe ayudar a establecer una matriz de diseño preliminar para el sistema. Adicionalmente, la predicción también puede verificar requerimientos en logística y mantenibilidad en algunas fases avanzadas.

CAPÍTULO V

5.- MODELO ECONÓMICO PARA LA EVALUACIÓN DE ACTIVOS (Manual del programa ECCVA)

5.1.- Introducción al programa ECCVA

El programa ECCVA fue diseñado para evaluar activos siguiendo un modelo económico, como apoyo a la metodología presentada en el capítulo III del Manual de Procedimientos para el Diseño de Proyectos de Inversión de Capital Basado en Aspectos de Confiabilidad. Dicho modelo económico está basada en la teoría del costo del ciclo de vida, que se encuentra documentado en el Capítulo I del Marco Teórico.

El programa tiene una capacidad de evaluación máxima de veinte años de ciclo de vida, puesto que mayormente un activo es desincorporado en un tiempo igual o menor por razones como:

- ✓ Obsolescencia técnica y económica.
- ✓ Cambios en las condiciones operacionales.
- ✓ Costos elevados de operación y mantenimiento.
- ✓ Aspectos de logísticas.
- ✓ Bajos índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

El modelo económico consiste en un cálculo del costo anual equivalente, cálculo del flujo de caja, y el valor presente neto. Todos estos se encuentran afectados por el factor de descuento.

También se obtienen varias curvas entre las cuales tenemos: costo anual equivalente (CAE), flujo de caja (FC), valor presente neto (VPN) y valor presente anual (VPA). También el programa ofrece varios gráficos de barras entre los cuales están: costo del ciclo de vida por año, mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, y penalizaciones. Estos gráficos servirán de apoyo al análisis económico del activo.

A continuación se explicará la forma de manejar el programa, y el significado de cada gráfico.

5.2.- Inicio del programa

ECCVA tiene una pantalla de presentación donde se describe la potencialidad del mismo, y posee varios botones que nos permitirán acceder a varias pantallas como son: “Entrada de Datos”, “Valor Presente Neto”, “Costo Anual Equivalente”, y “Gráficas”. Ver detalles en la figura 17.

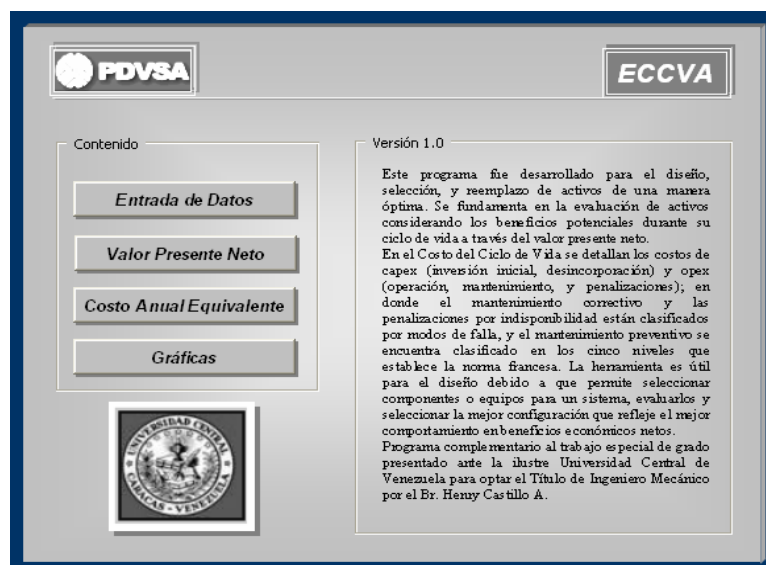


Figura 17. Presentación del Programa.

Luego para iniciar la herramienta se presiona en “Entrada de Datos” para empezar a llenar los datos correspondientes al activo en estudio.

5.2.1.- Pantalla de llenado de datos

En esta pantalla se encuentran los ítems correspondientes a Capex y Opex para la entrada de datos.

Para empezar encontraremos un primer módulo para seleccionar el activo a evaluar. Una vez seleccionada una de las cuatro opciones se coloca el nombre del mismo, ver figura 18. De esta manera cualquier usuario podrá saber a que se le hizo el estudio.

Figura 18. Módulo de “Selección del Activo”.

El siguiente módulo se denomina “Producción de la Instalación”, en esta se colocan datos de producción referidos a la instalación y a la opción elegida si es diferente al “Instalación” (sistema, subsistema, equipo). Ver detalles en la figura 19.

Figura 19. Módulo de “Producción de la Instalación”.

Se tiene un módulo para colocar los factores económicos a considerarse en el análisis, y hay un renglón para colocar el tiempo de vida útil para el activo. Ver detalles en la figura 20. En este módulo existe una casilla de activación que sirve para cargar automáticamente la cantidad de años del ciclo de vida.

FACTORES ECONÓMICOS	
Tasa de retorno promedio sobre el Capital (%)	0,00%
Tasa de Inflación promedio (%)	0,00%
Tasa de Descuento ("r" en %)	10,00%
Tiempo de Vida del activo (años)	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 20. Módulo de “Factores Económicos”.

A continuación tenemos un módulo para ingresar datos correspondientes al Capex. Este módulo es denominado “Costo Inicial de la Inversión”, y en el se encuentran dos opciones, que son: la opción A si se conoce el monto global para la inversión inicial, y la opción B si se tiene el costo detallado en varios renglones. Ver detalles en la figura 21.

COSTO INICIAL DE LA INVERSIÓN	
<input type="radio"/> A	Global
<input checked="" type="radio"/> B	Adquisición
	Instalación
	Otros
TOTAL	
	0,00

Figura 21. Módulo de “Costo Inicial de la Inversión”.

Los siguientes módulos corresponden a ingresar datos para Opex. De esta manera vamos a conseguir un módulo para “Costo de Operación”, en donde se encontrarán los renglones correspondientes a este módulo. Ver detalles en la figura 22.

COSTO POR OPERACIÓN	
Labor de Operación Anual	
Consumo de Energía Anual	
Consumo de Combustible Anual	

Figura 22. Módulo de “Costo de Operación”.

El módulo correspondiente al mantenimiento se encuentra dividido en mantenimiento preventivo y correctivo. El mantenimiento preventivo se encuentra subdividido a su vez en cinco niveles según la Norma Francesa (AFNOR 60 011). Ver detalles en la figura 23.

COSTO DE MANTENIMIENTO	
MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
Nivel I	
Mano de Obra	
Repuestos	
Almacenamiento	
Materiales	
Nivel II	
Mano de Obra	
Repuestos	
Almacenamiento	
Materiales	
Nivel III	
Mano de Obra	
Repuestos	
Almacenamiento	
Materiales	

Figura 23. Módulo correspondiente al Mantenimiento Preventivo.

En esta figura sólo se encuentran representados 3 niveles de mantenimiento. Estos niveles están definidos en el manual propuesto (anexo A-1).

Antes de describir el módulo del Mantenimiento Correctivo se tiene un módulo para describir los eventos que producen indisponibilidad, y que son solventados con

actividades correctivas. El módulo fue diseñado hasta un máximo de cinco eventos, en el que se ingresan el tiempo promedio operativo (TPO), y tiempo promedio para reparar (TPPR) asociado a cada evento. El programa usará este módulo para calcular el número de fallas anuales para cada evento, y la indisponibilidad consecuente producida al sistema. También posee una opción para identificar cada evento y describir la falla asociada a ese evento. La descripción será almacenada en una leyenda. Ver detalles en la figura 24.

TPO Y TPPR POR EVENTO (HORAS)		
<i>Identificar los Eventos</i>		
A	TPO	
	TPPR	
B	TPO	
	TPPR	
C	TPO	
	TPPR	
D	TPO	
	TPPR	
E	TPO	
	TPPR	

Figura 24. Módulo para caracterizar los eventos que producen indisponibilidad.

Para empezar con el módulo de Mantenimiento Correctivo se inicia con unas casillas para caracterizar los costos asociados a cada evento, descritos previamente, ver figura 26. Una vez llenado estos datos el programa calculará automáticamente el costo total para reparar cada evento, ver figura 25.

MANTENIMIENTO CORRECTIVO			
Por Modos de Falla:			
Eventos	#Fallas/Anual	Costo/Evento	Costo total
-		0,00	0,00
-		0,00	0,00
-		0,00	0,00
-		0,00	0,00
-		0,00	0,00

Figura 25. Módulo del Costo Total por evento para el Mantenimiento Correctivo.

<i>Costos asociados a cada evento</i>	
Modo 1	
<i>Mano de Obra</i>	
<i>Apoyo Logístico</i>	
<i>Repuestos</i>	
<i>Almacenamiento</i>	
<i>Materiales</i>	
Modo 2	
<i>Mano de Obra</i>	
<i>Apoyo Logístico</i>	
<i>Repuestos</i>	
<i>Almacenamiento</i>	
<i>Materiales</i>	

Figura 26. Módulo para llenar los costos asociados a cada evento.

En el siguiente módulo tenemos las penalizaciones por indisponibilidad asociada a los eventos anteriormente descritos, y la penalización por pérdida de eficiencia. Las penalizaciones por indisponibilidad son aquellas que resultan por el fuera de servicio de equipos, causado por algún evento o modo de falla, y que ocasiona que la instalación deje de producir total o parcialmente. Es decir, que es la producción cuantificada en dinero que se dejó de percibir por una falla; ya sea en el equipo, subsistema o sistema. Y la pérdida de eficiencia, se asocia a la disminución o caída de potencial de la capacidad del equipo, como producto del desgaste o deterioro de los componentes mecánicos y eléctricos del equipo. Esta pérdida de eficiencia se asume como un valor promedio o acumulado en el año en estudio. También hay un renglón en el que se asocia la pérdida de producción acumulada en el año asociada a la pérdida de eficiencia. Ver los detalles del módulo en la figura 27.

COSTO POR PENALIZACIÓN		
<i>Indisponibilidad por Modos de Fallas</i>		Indisponibilidad/Anual
		Horas de indisponibilidad
-		0,00%
		0,00
-		0,00%
		0,00
-		0,00%
		0,00
-		0,00%
		0,00
-		0,00%
		0,00
<i>Pérdida de Eficiencia (PE en %)</i>		0,00
<i>Pérdida de Producción Anual por caída de PE</i>		0,00

Figura 27. Módulo del “Costo por Penalizaciones”.

Por último tenemos el módulo asociado al costo de desincorporación. Este costo es considerado en el último año. Ver en la figura 28 el módulo correspondiente.

COSTO DE DESINCORPORACIÓN	
---------------------------	--

Figura 28. Módulo asociado al “Costo de Desincorporación”.

NOTA: En cada módulo existen casillas de entrada de datos en color azul, y casillas donde el programa realiza cálculo automáticamente en color gris. El programa no permite que el usuario modifique el contenido de las casillas en gris.

5.2.2.- Pantalla para el Costo Anual Equivalente (CAE)

Para el Costo Anual Equivalente el programa presenta una pantalla, la cual es manejada automáticamente por el programa. En esta hay una tabla con el CAE para cada año. Para visualizar mejor la tabla se presenta un gráfico, en el cual se

recomienda ajustar el gráfico al número de años en que se está realizando el estudio. En la figura 29 se muestra un ejemplo para un caso.

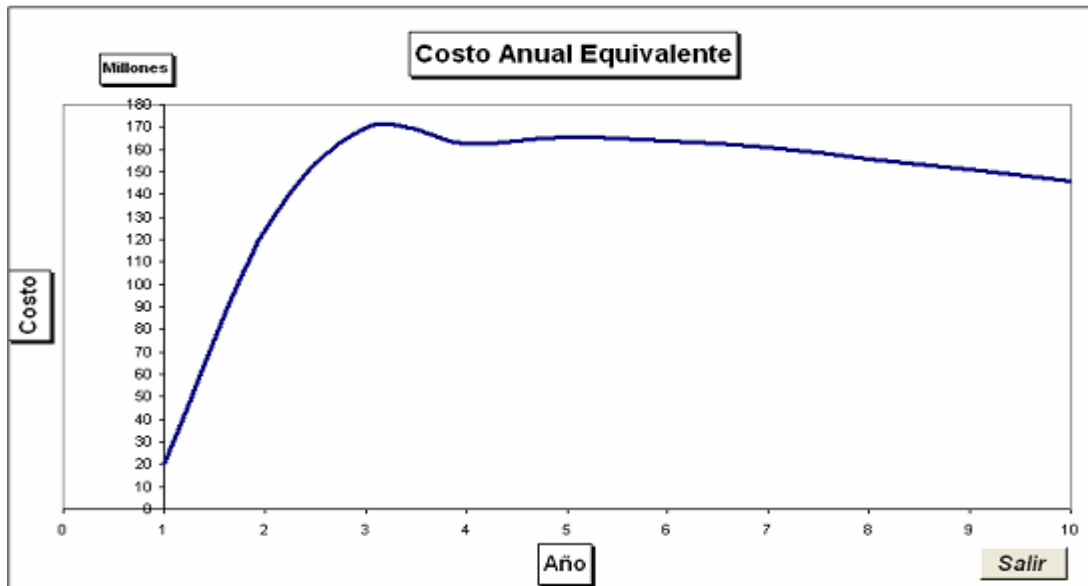


Figura 29. Gráfico del Costo Anual Equivalente.

La ecuación usada para el cálculo del CAE es la siguiente:

$$CAE_n = \sum_{i=0}^n \left(\frac{CA + CD + COM + CMM + PPE + PMF}{n} \right) \cdot \left(\frac{1+p}{1+m} \right)^i$$

Donde:

- CAE = Costo Anual Equivalente promedio hasta el año n.
- CA = Costo de Adquisición del Activo.
- CD = Costo de Desincorporación.
- COM = Costo de Operación y Mantenimiento anual para el año i.
- CMM = Costo de Mantenimiento Mayor para el año i.
- PPE = Penalización por Pérdida de Eficiencia.

- PMF = Penalización por Modo de Falla.
- p = Promedio anual de la tasa de inflación para N años.
- m = Tasa promedio de retorno sobre el capital esperada para el proyecto en N años.

5.2.3.- Pantalla para el Valor Presente Neto (VPN) y el Valor Presente Anual (VPA)

En esta parte el programa presenta el cálculo del VPA, y el VPN en una tabla. En el caso valor presente anual se calcula por año, mientras que el VPN es un valor acumulado hasta el año n . Estos cálculos son realizados para todo el ciclo de vida de forma automática por el programa. Para ayudar a visualizar mejor los resultados se presentan unas gráficas, como las que se indican en la figura 30.

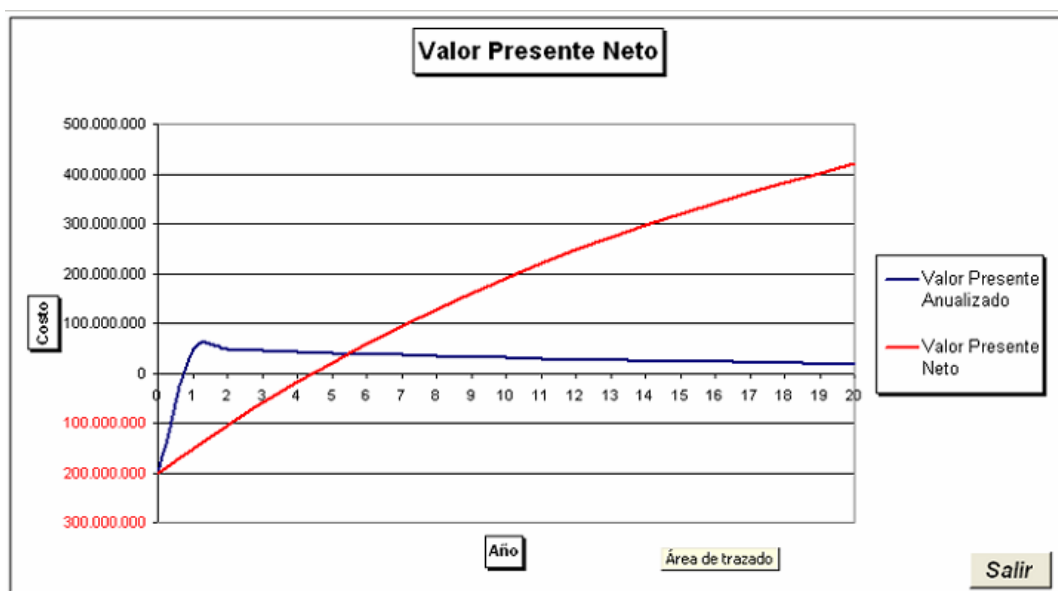


Figura 30. Gráfico del Valor Presente Neto y Valor Presente Anualizado para el activo en estudio.

Las ecuaciones usadas para el cálculo de VPN y VPA son las siguientes:

$$VPN_n = \sum_{i=0}^n (GN_i - (CA_i + CD_i + COM_i + CMM_i + PPE_i + PMF_i)) \cdot \left(\frac{1+p}{1+m} \right)^i$$

$$VPA_i = (GN_i - (CA_i + CD_i + COM_i + CMM_i + PPE_i + PMF_i)) \cdot \left(\frac{1+p}{1+m} \right)^i$$

5.2.4.- Detalle del Mantenimiento Preventivo, el Mantenimiento Correctivo, y las Penalizaciones en gráficos de barras

El programa presenta una opción en la que se detallan el mantenimiento preventivo por niveles, el mantenimiento correctivo por evento, y las penalizaciones por evento y pérdida de eficiencia, en gráficos de barras. En la figura 31 se muestra un ejemplo.

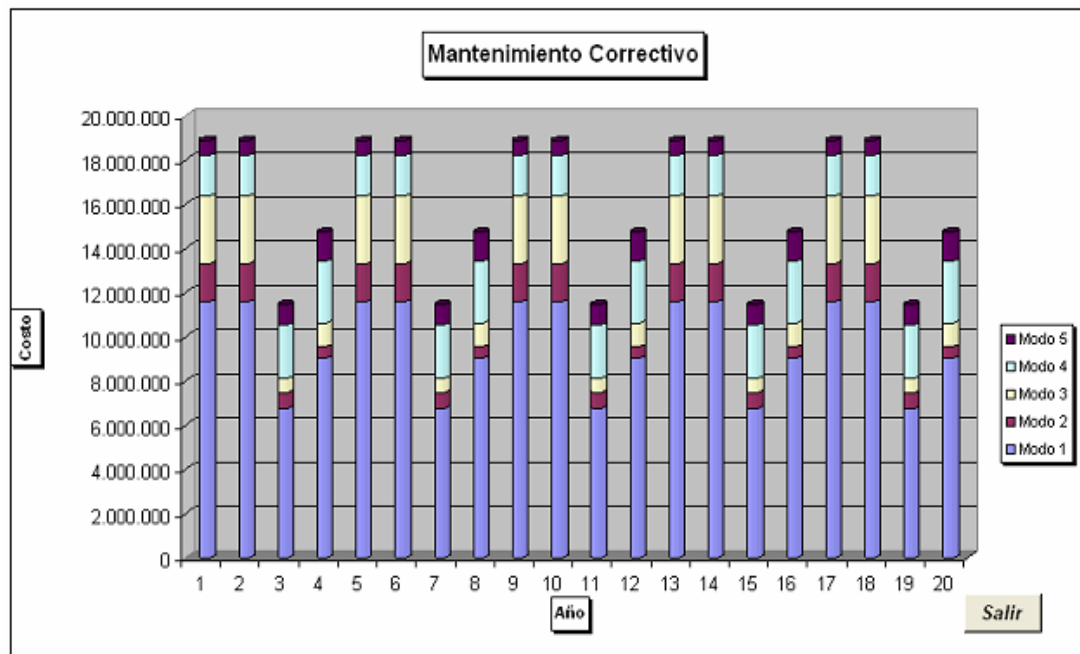


Figura 31. Gráfico del Mantenimiento Correctivo detallado por eventos.

5.3.- Llevar la data a la base de datos del programa, y almacenarla en un archivo (*.xls)

Para llevar la data a la base de datos se llena las casillas correspondientes para cada módulo, ya descritos, en el año i y se elige el año en una lista para vaciar la data en la base de datos. Para poder visualizar mejor esto ver en la figura 32 los detalles para este paso.

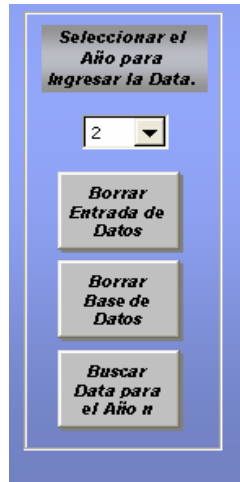


Figura 32. Lista de los años para seleccionar el año i a ingresar la data.

En la figura 32 también muestra una opción del programa para borrar la entrada de datos, otra para borrar la base de datos, y una para seleccionar la data para un año en particular.

Para almacenar la data del ciclo de vida correspondiente a un activo en un archivo, una vez que se ha vaciado la misma en la base de dato, existe una opción para guardarla con un nombre cualquiera, y en archivos de Excel (*.xls). Dicho archivo se almacenará dentro del mismo programa. En la figura 33 se observa el módulo dedicado a esta acción.

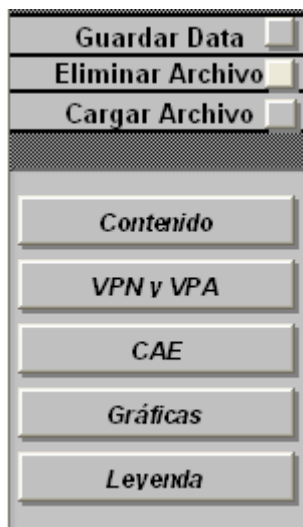


Figura 33. Módulo para cambiar de pantalla, guardar la data en archivos, y cargar archivos almacenados.

En la figura 33 también se observa los botones que permiten cambiar a otras pantallas del programa, y existen botones que permiten: guardar, cargar y eliminar archivos. Es importante indicar que si se desea cargar algún archivo, se debe ingresar el nombre correctamente, sino el programa mostrará un cuadro de diálogo en la cual se debe seleccionar la opción “Finalizar”, y seguir intentando cargar el archivo. En la figura 34 se muestra el cuadro de diálogo.

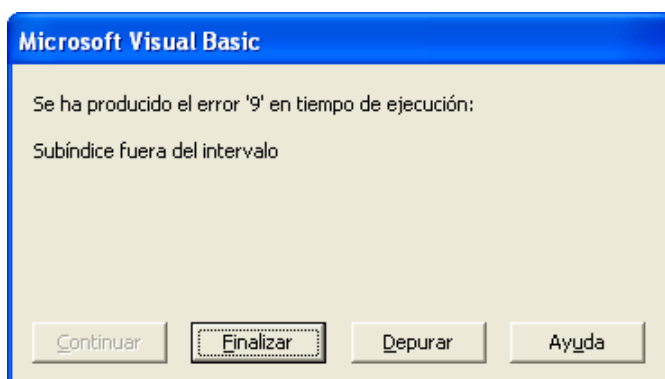


Figura 34. Cuadro de diálogo por ingresar incorrectamente el nombre del archivo.

CONCLUSIONES

- ✓ El diseño de proyectos primordialmente debe considerar aspectos de confiabilidad y mantenibilidad para cumplir con la meta de disponibilidad.
- ✓ La aplicación de la metodología de análisis del costo ciclo de vida durante el desarrollo de cualquier proyecto de inversión de capital, permite verificar si se está cumpliendo con los objetivos del negocio.
- ✓ El soporte de un análisis de sensibilidad para cada opción durante el diseño preliminar de una instalación, permite plantear varios escenarios optimistas/pesimistas y cuantificar el riesgo asociado a cada opción de diseño.
- ✓ La inclusión de aspectos de confiabilidad desde la fase de diseño permite optimar el desempeño funcional y costo del ciclo de vida de la instalación.
- ✓ La consideración de aspectos de mantenibilidad desde el diseño permite planificar el mantenimiento, la logística, recursos, organización y destrezas, requeridos por parte de la gerencia de mantenimiento.
- ✓ En la medida en que se adopten más metodologías de confiabilidad operacional desde el diseño del proyecto, se estarán cubriendo positivamente con todos los aspectos que influyen durante el ciclo de vida del mismo. El producto final será de mayor eficiencia o efectividad desde el punto de vista de beneficios económicos.
- ✓ La reestructuración de una instalación será más efectiva si se realiza un análisis en función de la confiabilidad y mantenibilidad de los componentes, configuración del sistema y redundancia.
- ✓ El análisis de reemplazo de un equipo debe realizarse a través de un modelo, que caracterice el desempeño funcional (confiabilidad) y la facilidad de mantener (mantenibilidad), asociado a sus beneficios económicos. Es decir, cuanto se obtiene por lo que se invierte en ese equipo.

RECOMENDACIONES

El manual propuesto integra un conjunto de metodologías de confiabilidad operacional, que se van aplicando en cada fase del diseño del sistema, según las consideraciones y alcances que se plantean en dicho manual. También se presenta la metodología para el diseño del sistema en base a la confiabilidad y la mantenibilidad. Para la correcta aplicación del manual se recomienda:

- ✓ Realizar un análisis Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA), para evaluar la posibilidad de emprender el proyecto.
- ✓ Definir los parámetros de confiabilidad con respecto al contexto operacional que se va a considerar en el diseño de sistemas, para poder obtener un costo de ciclo de vida óptimo.
- ✓ Para el diseño de sistemas se debe considerar los aspectos que engloban a la mantenibilidad, ya que su buena planificación mejora el índice de disponibilidad. Estos aspectos son todos aquellos que afectan a la disponibilidad, tales como: horas laboradas por el personal en el cumplimiento de mantenimiento (considerando el número total de empleados y el nivel de destreza), frecuencia de mantenimiento (dada a través del tiempo medio entre mantenimiento→ TMEM, que engloba el tiempo medio para mantenimiento no programado, y el tiempo medio para mantenimiento programado), costo del mantenimiento, factores económicos relacionados con varios elementos de apoyo (entre estos factores tenemos reparaciones y partes de repuestos, sistemas de control de alarma, transporte y factores de manejo).
- ✓ Realizar la evaluación de los aspectos de LCC correspondientes a cada fase del diseño.

La reestructuración de una instalación debe ser realizada en función de la confiabilidad, mantenibilidad, y por ende la disponibilidad del sistema. Se deben establecer escenarios que permitan obtener mejoras en el desempeño operativo del sistema, y en el desempeño económico indicando un flujo de caja anual positivo, a través de configuraciones establecidas en función del árbol de falla del mismo. Es por ello que se recomienda:

- ✓ Utilizar el software Raptor, ya que permite trabajar con diagramas de bloques, para poder representar el sistema considerando la configuración del árbol de falla.
- ✓ Se debe caracterizar adecuadamente la curva para el tiempo operativo, y la curva para los tiempos de reparación. Esto se debe hacer a través de un software que permita el cálculo de confiabilidad, mantenibilidad, y disponibilidad. La correcta caracterización de estos dos parámetros, permite cuantificar la incertidumbre asociada a la recolección de los datos de cada componente del sistema.
- ✓ Realizar un número significativo de corridas del programa, para obtener datos más significativos.
- ✓ Utilizar datos de equipos similares, para poder caracterizar el comportamiento de cada bloque a través de distribuciones probabilísticas, o utilizar un software que permita caracterizar la curva probabilística a partir de un set de data. En Intevp se cuenta con software, que a partir de un set de data, calcula la confiabilidad, mantenibilidad, y disponibilidad de los equipos.

En la metodología propuesta en el manual para optimizar el reemplazo de activos, se plantea evaluar los mismos a través de un modelo económico. Para ello se desarrolló un programa denominado **ECCVA** sustentado en el modelo económico propuesto. La efectividad y beneficios en el resultado del programa dependen de la calidad en los datos. Es por ello que se recomienda lo siguiente:

- ✓ Adiestrar al personal que usará la herramienta para su correcto manejo.
- ✓ Buscar la data correspondiente y adaptarla a las condiciones de entrada al programa.
- ✓ Corroborar en todo momento los resultados obtenidos con los datos que se están utilizando.
- ✓ Fomentar la aplicación de metodologías de análisis del costo ciclo de vida, a manera de poder tomar decisiones más acertadas en función del riesgo como por ejemplo el programa ECCVA.

BIBLIOGRAFÍA

TEXTOS

1. MATALOBOS, Ángel. 1992. **Confiabilidad en Mantenimiento**. Ediciones IESA, Caracas, Venezuela.
2. SMITH, Anthony. 1992. **Reliability Centered Maintenance**. Mc Graw Hill, New York.
3. GRANT, Ireson. 1996. **Handbook of Reliability Engineering and Management**. Mc Graw Hill, New York, U.S.A.
4. MC. Das, OGBR y O.L.F. Oey, OGBR. 1998. **Maintenance Management Guidelines**. Shell, Venezuela.
5. RAMSHAW, A.J. 1998. **Management of Facility Life Cycle Costs for Process Plants**. Shell, Venezuela.
6. LAMARRE, B. G. **Reliability and Maintainability of Electronic Systems**. Computer Science Press, U.S.A.
7. BLANCHARD B. y FABRYCKY W. 1998. **Systems Engineering and Analysis**. 3^{ra} Ed. Prentice Hall International Series, New Jersey, U.S.A.

DOCUMENTOS TÉCNICOS

1. **Aspectos Conceptuales en Confiabilidad desde el Diseño**. 2000. PDVSA, Intevep. Venezuela.
2. **Implantación de Confiabilidad en Etapa de Diseño de Proyectos**. 2000. PDVSA, Intevep. Venezuela.
3. **Introducción a la Confiabilidad Operacional**. 1999.1^{ra} Edición. PDVSA-CIED. Caracas, Venezuela.

4. **Life-Cycle Costing (Training Manual).** 1999. Copyright, The Woodhouse Partnership Ltd. U.S.A.
5. BRAVO J., YÁNEZ M. y PÉREZ C. **Estimación de la Confiabilidad de Equipos Estáticos Basada en Condición para Estaciones de Flujo.** Est. Técn. PDVSA EPM Occidente, Gerencia de Mantenimiento. Zulia, 2001.
6. GÓMEZ J., TROCONIS M. y MARVAL E. **Monitoreo Remoto de Condición (MRC) de Equipos Dinámicos de EPM Occidente.** Est. Técn. PDVSA EPM Occidente, Gerencia de Mantenimiento. Zulia, 2001.
7. HUERTA R., PINO L. **Análisis Causa Raíz (ACR) como herramienta para optimizar la gestión de mantenimiento.** Est. Técn. PDVSA EPM Occidente, Gerencia de Mantenimiento. Zulia, 2001.
8. HUERTA R. **El Análisis de Criticidad, una metodología para mejorar la Confiabilidad Operacional.** Est. Técn. PDVSA EPM Occidente, Gerencia de Mantenimiento. Zulia, 2001.
9. OMAÑA J. y TOVAR C. **Aplicación de la Filosofía de Confiabilidad Operacional (Herramienta MCC) en las Gabarras Martillos.** Est. Técn. PDVSA EPM Occidente, Gerencia de Mantenimiento. Zulia, 2001.
10. PERDOMO J. **Rediseño de la Política de Inventario de Ensamblajes Modulares y Repuestos para la Flota de Turbinas de Potencia Cooper y Dresser.** Est. Técn. PDVSA EPM Occidente, Gerencia de Mantenimiento. Zulia, 2001.
11. MATERÁN E. y TOVAR C. **Análisis Causa Raíz (ACR) como Herramienta para Optimizar los Análisis de Riesgo en el Trabajo.** Est. Técn. PDVSA EPM Occidente, Gerencia de Mantenimiento. Zulia, 2001.
12. MEDINA A., TROCONIS M. y YÁNEZ M. **Aplicación de la Metodología de Árboles de Falla en el Cálculo de Confiabilidad en Plantas de Gas (Uso del Software RAPTORS 5.0).** Est. Técn. PDVSA EPM Occidente, Gerencia de Mantenimiento. Zulia, 2001.
13. PERDOMO J., GONZÁLEZ J., BOSCAN C., y RODRÍGUEZ V. **Combining Structural Reliability Analysis (SRA), Risk Based Inspection (RBI), Root**

Cause Failure Analysis (RCFA) and Life Cycling Cost (LCC) to Assess Plant Reliability. FUNINDES, Caracas, Venezuela.

CONFERENCIA

1. MATTESON, T. **The Origin of Reliability-Centered Maintenance.** Proceedings of the Sixth International Maintenance Conference, Institute of Industrial Engineers, October, 1989.

CONSULTAS DE INTERNET

1. KENNETH, C. "Design for the Life Cycle", **Kenneth Crow DRM Associates**, 1997. Disponible: <http://www.npd-solutions.com/lifecycle.html>.
2. KENNETH, C. "Robust Product Design Through Design of Experiments", **Kenneth Crow DRM Associates**, 1998.
Disponible: <http://www.Reliability Engineering-System.com/robust.html>.
3. "Design for Reliability". Disponible: <http://www.reliability.sandia.gov>
4. Artículos de mantenimiento. Disponible: <http://www.plant-maintenance.com>
5. Programa de simulación para aplicación en la industria.
Disponible: <http://www.bqr.com>
6. Programa de simulación de confiabilidad y disponibilidad.
Disponible: <http://www.raptorplus.com>

ANEXO A

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE PROYECTOS DE INVERSIÓN DE CAPITAL BASADO EN ASPECTOS DE CONFIABILIDAD

ANEXO A-1

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN (1^{er} CASO)

CAPITULO I

DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN (1^{er} CASO)

Para la elaboración de un proyecto se siguen diferentes fases de los procesos, entre las cuales tenemos:

1^{era} Fase

- ✓ Visualización.
- ✓ Conceptualización.
- ✓ Definición (Ing. Básica).

2^{da} Fase

- ✓ Ingeniería de Detalles.
- ✓ Procura de Materiales.

3^{era} Fase

- ✓ Contratación de obras.

4^{ta} Fase

- ✓ Ejecución de obras.

5^{ta} Fase

- ✓ Arranque y Entrega.

6^{ta} Fase

- ✓ Operaciones.

En la primera fase se realiza el diseño de la instalación y se establecen las estrategias y políticas de mantenimiento considerando la optimización del ciclo de vida para obtener la mayor utilización del activo, y por ende, una mayor producción. El diseño del sistema se fundamenta en requerimientos de confiabilidad de componentes y equipos y sistemas redundantes para el cumplimiento de la confiabilidad de la instalación.

La segunda fase comprende la captura y diagnóstico, planificación y programación del mantenimiento futuro.

En la tercera fase se realizan las diferentes contrataciones necesarias para emprender el proyecto de acuerdo a las especificaciones dadas en la ingeniería de detalles.

En la cuarta fase se ejecutan todas las actividades que fueron previamente planificadas según un programa de ejecución.

Por último en la quinta y sexta fase se arranca y opera la instalación en donde se generarán los ingresos por venta unitaria de la producción.

1^{era} Fase

En esta fase se deben incluir los aspectos y lineamientos de confiabilidad para obtener mayor oportunidad de creación de valor y reducción de costos.

Para esto se deben aplicar herramientas de confiabilidad operacional, las mejores prácticas en la industria, y técnicas de manera de generar el menor costo del ciclo de vida y lograr la mayor utilización del activo para obtener los mayores beneficios económicos.

A continuación se dan las acciones y lineamientos que se recomiendan practicar en cada etapa de diseño de proyectos.

FASE DE VISUALIZACIÓN

En esta fase se desarrollan los análisis del ambiente externo e interno de la corporación o análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) como parte de los ciclos de planificación, y relacionarlos con el proyecto a ser desarrollado.

Esta fase debe concretar los siguientes objetivos:

- Establecer los objetivos y propósitos del proyecto con apoyo de un estimado de costos clase 5.
- Verificar la alineación de los objetivos del proyecto con las estrategias corporativas.
- Definir el Alcance del proyecto a través de la capacidad de producción de la instalación para el cumplimiento con las necesidades del mercado.
- Establecer la meta de disponibilidad mínima para cumplir con la producción propuesta como meta en un período de tiempo determinado.
- Establecer la meta de confiabilidad deseada según lineamientos de la gerencia, y la planificación de la frecuencia de paros mayores.
- Establecer factores del Costo del Ciclo de Vida como parámetros importantes a cumplir.

Acciones a tomar considerando aspectos de confiabilidad:

- Identificar y acordar los parámetros financieros del análisis de costo del ciclo de vida (LCC) a realizarse en las siguientes fases del proyecto.
- Elaborar el alcance preliminar del proyecto. Para lograr esto se debe establecer la máxima utilización del activo a través de los escenarios optimista y pesimista, donde se tome en cuenta costo de adquisición e instalación, costo del mantenimiento y operación, costos por penalización, y la incorporación de

redundancia adecuada, en el diseño, para el apoyo de la continuidad operativa de los subsistemas. Considerando también la probabilidad de ocurrencia de los diferentes modos de falla que se puedan presentar para el cálculo de la confiabilidad del sistema. De esta manera se puede determinar la capacidad productiva, vida útil, plan de mantenimiento, etc. En el siguiente punto se describe como se procede para el cálculo de la confiabilidad.

- Estimar el Tiempo Promedio Operativo de la instalación (confiabilidad), que se logra al acordar los Tiempos Promedios Operativos (TPO) para los subsistemas, en función de los Tiempos Promedios Operativos (TPO) de cada componente y/o equipo que forma parte de éstos subsistemas. Este objetivo se logra con la evaluación de este parámetro en instalaciones similares, o con datos dados por los proveedores con equipos similares. Una vez estimado el Tiempo Promedio Operativo de la instalación, se procede a estimar el Tiempo Promedio Fuera de Servicio (TPFS), fijando la disponibilidad trazada como objetivo, previamente definida para el cumplimiento del alcance preliminar del proyecto. De esta manera se puede determinar el alcance preliminar del proyecto.
- Realizar una selección preliminar de los procesos y tecnologías asociadas a través de bancos de datos de procesos e instalaciones, el cual debe venir soportado por información interna y externa a la corporación. Para lograr esto se recomienda utilizar el Análisis de Criticidad como herramienta de la confiabilidad, para establecer los subsistemas de mayor impacto y poder dirigir los recursos convenientemente, de manera de cubrir las necesidades presentes. La ejecución de proyectos y la evaluación de renovaciones en los procesos, sistemas o equipos de una instalación, se pueden optimar a través de esta herramienta.
- Determinar la viabilidad del proyecto.
- Se deben establecer varios diseños preliminares.

- Realizar un estudio de sensibilidad a través de un análisis Costo-Riesgo-Beneficio (ACRB), considerando escenario optimista/pesimista y el escenario más probable para cada opción. De esta manera se selecciona o descarta opciones consideradas.
- El diseño ó los diseños deben tener planificada una cierta flexibilidad, en donde se consideren cambios a futuro en las especificaciones del producto y aspectos que involucren la integridad de la instalación.

Entre los alcances que se quieren lograr en esta fase tenemos los siguientes:

- ✓ Declaración clara de las intenciones a reducir costos del ciclo de vida.
- ✓ Confirmación de disponibilidad de datos y cifras del costo del capital.
- ✓ Desarrollo de sistemas y opciones de procedimientos.
- ✓ Requerimientos básicos ingenieriles y funcionales.
- ✓ Identificación de los mayores controladores de costos.
- ✓ Puntualizar política de paros (mantenimiento mayor).
- ✓ Establecer pautas en requerimientos de material basado en suposiciones del tiempo de vida y previsión de frecuencias de inspección.
- ✓ Prever mantenimiento y estrategias de inspección.
- ✓ Definición de la filosofía de ahorro.
- ✓ Análisis de Modo y Efectos de Fallas (AMEF), Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), Inspección Basada en Riesgo (RBI), y Análisis Costo Riesgo Beneficio (ACRB), basándose en información de plantas y servicios similares.

- ✓ Estudios de Peligros y Operabilidad (HAZOP), y Estudios de Peligros y Efectos en los Procesos de Gerencia (HEMP).
- ✓ Establecimiento de estrategias realizadas según los lineamientos de Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA).
- ✓ Estrategia en consumo de energía.
- ✓ Optimización del Impacto en el Ambiente.
- ✓ Política de desincorporación de activos.
- ✓ Aspectos de LCC a ser emprendidos en las próximas fases.

La metodología del Costo del Ciclo de Vida va a ser implementada en cada una de las fases de desarrollo del proyecto, para garantizar el cumplimiento de los objetivos trazados en la Fase de Visualización, a través de la evaluación del costo del ciclo de vida del proyecto de acuerdo a su evolución en las diferentes etapas del mismo.

Para continuar con el desarrollo de esta fase se va a estructurar la forma de implementar la metodología del Costo del Ciclo de Vida.

Implementación del Análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCC)

El Análisis del Costo del Ciclo de Vida es una metodología importante para realizar la evaluación económica del Proyecto durante su desarrollo, y así poder influenciar y mejorar la calidad de las decisiones. Esta implementación se realiza a lo largo de las diferentes etapas del proyecto, en donde cambia desde las consideraciones conceptuales iniciales hasta examinar en más detalle la toma de decisiones. El mejor impacto que se puede obtener a través del enfoque del LCC se halla en la fase de visualización y en la fase conceptual. A continuación se desarrollaran cada una de las fases del proyecto desde el punto de vista de LCC.

En la fase de visualización se estudia la posibilidad de desarrollar el proyecto a través de uno o varios escenarios; considerando las oportunidades para invertir estudiado bajo un ambiente económico, político y social que influyen en las fortalezas y debilidades de la empresa. En esta fase se desarrollan las consideraciones conceptuales necesarias, y se generan nuevas ideas a ser exploradas. Se debe tomar las consideraciones referentes al ciclo de vida total de los activos para ser incluido en el análisis, y elaboración del diseño o diseños preliminares del proyecto.

Aunque en esta fase no se van a realizar estudios de LCC con profundidad, sin embargo se deben identificar activos con mayor impacto potencial en el costo del ciclo de vida del proyecto. En esta fase se van a establecer varios diseños preliminares, en donde el diseño de éstos preliminares van a ser influenciados desde el punto de vista del LCC. De manera que, es importante describir la forma de realizar la preparación del diseño, aspecto que abordaremos a continuación.

Preparación del Diseño

En este punto se preparan las bases del diseño (BOD) para el desarrollo de las diferentes opciones a plantear. Abarca la exploración o estudio de ideas y el diseño básico, de manera de proveer instrucciones con suficientes detalles a los grupos técnicos, para llevar a cabo el trabajo de diseño a unas bases comunes. Las opciones de sistemas, procedimientos y configuraciones deben ser fomentadas, desarrolladas y evaluadas desde el desarrollo de la tormenta de ideas.

Esto también abarca los requerimientos en pautas y funciones para elementos y equipos. La mejor decisión a elegirse en el proyecto será la que conduzca a optimar los costos del ciclo de vida, de manera que al realizar un balance entre los ingresos y egresos (valor presente neto), resulten en beneficios económicos esperados, satisfaciendo los objetivos trazados en el inicio del proyecto.

En la Preparación del Diseño se proveerá un firme basamento a través del LCC, y que será desarrollado en las fases subsiguientes del proyecto. Es importante

identificar los principales controladores de costos para tenerlos en cuenta en el análisis del costo del ciclo de vida. Si no es posible dirigirlos en esta fase por falta de información, se recomienda enumerarlos para una evaluación futura. Cuando los aspectos del ciclo de vida no se reconocen e identifican en las bases del diseño (BOD), puede ocasionar retrasos o aun peor, penalizaciones financieras durante la Fase Operacional.

Todas las premisas o pautas que fueron enumeradas durante el desarrollo de esta fase que tuvieron algún inconveniente, deben ser resueltas para poder continuar con el desarrollo de las fases subsiguientes.

Los aspectos en LCC a ser dirigidos en esta fase se van a supervisar a través de la siguiente lista de control.

Lista de Control de LCC para la Preparación de las Bases del Diseño (BOD)

Consideraciones Principales

- ¿Está dirigido algún aspecto de LCC antes de la exploración o estudio de las ideas?
- ¿Se realizó alguna declaración con la intención de reducir el costo del ciclo de vida?
- ¿Se definieron las políticas de paro programado?
- ¿Se definió el tiempo de vida de la planta o instalación a través de las propuestas de los diferentes diseños preliminares?
- ¿La disponibilidad requerida, es definida a través de los tiempos promedios operativos y tiempos fuera de servicio esperado en los subsistemas y sistemas que constituyen la instalación?

- ¿Se identificaron los mayores controladores de costos que impactan en el ciclo de vida?
- ¿Los requerimientos de materiales se basan en el tiempo de vida útil y frecuencias de inspección?
- ¿Se consideran los costos del ciclo de vida del proyecto (como por ejemplo: costo de mantenimiento, operación, penalizaciones, etc.), en la selección de opciones de diseño?
- ¿Se consideran las pautas y requerimientos específicos para equipos y componentes mecánicos para su selección y adquisición?, como por ejemplo:
 - Impacto de tecnología en la “etapa principal” (Beneficios contra Riesgos).
 - Requerimientos funcionales.
 - Requerimientos ingenieriles básicos.
 - Códigos y estándares a ser aplicados.
 - Simplicidad de diseño del equipo.
 - Asegurar una evaluación correcta para el uso de paquete de equipos y elementos.
 - Descripción de la instrumentación y controles automáticos.
 - Tipos de motor eléctrico.
 - Requerimientos de confiabilidad para cumplir con meta de disponibilidad (TPO, redundancia, etc.).
 - Uso de aire contra agua para los subsistemas de enfriamiento – incluir costos de cambios de limpieza y reacondicionamiento.

- Requerimientos de eficiencia.
 - Criterio basado en el punto de trabajo para la selección de bombas.
 - Política de estandarización.
 - Política de ahorro.
 - Manuales de operación y mantenimiento.
- ¿Se enumeran requerimientos para mantenibilidad, y la capacidad operativa de la instalación?
 - ¿Se tiene como objetivo la minimización de la duración de los paros y planificación de los recursos necesarios para el desarrollo de las actividades?
 - ¿Se consideran requerimientos mínimos para la adquisición de un paquete de equipos?

Es importante tener en cuenta los aspectos relacionados con los elementos del paquete de equipos, como son los estándares, accesos, estandarización, repuestos, entrenamiento, manuales de operación y mantenimiento, etc.

- ¿Se procura una estrategia de adquisición en donde se incluya los requerimientos para el empleo de proveedores locales, contratistas, etc.?
- ¿Se enumeran los aspectos de LCC a ser fomentados en el Diseño Básico?
- ¿Tomando en cuenta la decisión hecha, se confirma la validez de las cifras de costo del capital?
- ¿Se realiza la optimización del impacto ambiental?
- ¿Se estima alguna expansión futura para la instalación, de manera, de suplir una posible necesidad mayor en la demanda del cliente?

Consideraciones de Apoyo

- ¿Se desarrollaron en lo posible estrategias de mantenimiento e inspección?
- ¿Se realizó una evaluación de los aspectos del costo de mantenimiento y actividades de inspección para propuestas de Opex?
- ¿Se evaluó la capacidad interna de la empresa, la necesidad de negociar con proveedores y requerir los servicios de contratistas locales, para asignar los recursos necesarios en donde se requiera?
- ¿Se puntualizaron los requerimientos de mantenibilidad y capacidad operativa para la instalación? Esto se puede conseguir considerando los siguientes aspectos:
 - Metodología para mantenimiento e inspección en línea, que apoyará el diseño.
 - Comparación entre ensayos y calibración en forma automática y manual.
 - Requerimientos para el levantamiento o desmontaje.
 - Accesibilidad (adecuar al mínimo costo).
 - Planificación de los paros.

Para ayudar al líder del Proyecto en la identificación de aspectos importantes en LCC en el seguimiento económico del proyecto durante la fase de visualización, se utilizará una lista de control en donde se listan los mayores aspectos a ser considerados en esta fase. Esta lista de control es la siguiente:

Lista de Control para la Fase de Visualización

Consideraciones Principales

- ✓ ¿Se considera la aplicación de Técnicas de Construcción Novedosas (Utilización del ACRB)?
- ✓ ¿Se realizaron las posibles configuraciones tomando en cuenta el costo del ciclo de vida?
- ✓ ¿Existe disponibilidad de asunciones para equipos y el sistema total?
- ✓ ¿La selección de equipos se realizó a través del análisis Costo-Riesgo-Beneficio (ACRB)?
- ✓ ¿Pueden las nuevas tecnologías ser aplicadas en el proyecto evaluado según un análisis Costo-Riesgo-Beneficio (ACRB)?
- ✓ ¿El desarrollo de aspectos de ingeniería (condiciones operacionales, etc.) para el diseño son identificados y estudiados?
- ✓ ¿Se prevee la suficiente infraestructura, tanto dentro y fuera de la instalación?
- ✓ ¿Se consideran los costos asociados con el proyecto durante su vida útil (como por ejemplo: costos de mantenimiento, costos de operación, penalización, etc.), para la selección de las opciones establecidas?
- ✓ ¿Se hacen consideraciones concernientes a una eventual demolición?
- ✓ ¿Se enumeran aspectos de LCC a ser fomentados y dirigidos en la Base del Diseño (BOD)?

Consideraciones de Apoyo

- ✓ ¿Se tiene la disponibilidad conveniente de contratistas para la labor de actividades de mantenimiento especial a equipos?
- ✓ ¿Se tiene disponibilidad de personal calificado?
- ✓ ¿Se discutieron los posibles requerimientos para el entrenamiento?
- ✓ ¿Se tomó previsión para problemas de logística?

Los resultados que se derivan del reporte de esta fase son:

- ✓ Cifras del costo del capital.
- ✓ Factibilidad de nuevas tecnologías.
- ✓ Opciones de procedimientos.
- ✓ Diferentes configuraciones o varios diseños preliminares.
- ✓ Datos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de equipos básicos.
- ✓ Disponibilidad de Infraestructura y técnicas para la construcción.
- ✓ Política de demolición.

FASE DE CONCEPTUALIZACIÓN

El propósito de esta fase es la selección de la(s) mejor(es) opciones, y la mejora en la precisión de los estimados de costos y tiempo de implantación para reducir la incertidumbre, cuantificar los riesgos asociados y determinar el valor esperado para la(s) opción(es) seleccionada(s).

En esta fase se deben cumplir los siguientes objetivos:

- Organización para la fase de planificación del proyecto.

- ❑ Desarrollar varios diseños del sistema de forma más específica.
- ❑ Seleccionar la(s) opción(es) preferida(s) y solicitar los fondos para ejecutar las actividades que permitan obtener un estimado de costo Clase 4.

Entre los alcances que se desean conseguir en esta fase tenemos:

- ✓ Reconfirmación de disponibilidad de datos y cifras del costo del capital.
- ✓ Decisión sobre la elección de sistemas.
- ✓ Programas y metodología para la puesta en marcha y paros programados.
- ✓ Consideraciones de diseño de equipos.
- ✓ Normalización de equipos o componentes.
- ✓ Estrategias para minimizar los controladores de costos principales.
- ✓ Estrategias para el uso de paquetes de equipos.
- ✓ Pautas para la mantenibilidad.
- ✓ Pautas para la confiabilidad.
- ✓ Análisis de Modo y Efectos de Fallas (AMEF), Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), Inspección Basada en Riesgo (IBR), y Análisis Costo-Riesgo-Beneficio (ACRB).
- ✓ Estudios de Peligros y Operabilidad (HAZOP), Estudios de Peligros y Efectos en los Procesos de Gerencia (HEMP).
- ✓ Establecer estrategias para cumplir con los lineamientos de Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA).
- ✓ Selección de materiales (confirmación).

- ✓ Pautas relacionadas con la desincorporación de activos.

Para llevar a cabo el desarrollo de esta fase se debe puntualizar acerca de la disponibilidad de recursos de la empresa y objetivos de la corporación. Para realizar esto es importante apoyarse en el análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA). También es recomendable tomar decisiones en función de un balance entre la inversión inicial y los gastos por operación, mantenimiento, penalizaciones y desincorporación de activos; cuyas cifras de costos (costos Clase II) se pueden obtener a partir de un diseño mejor elaborado y más concreto con los lineamientos trazados en la Fase de Visualización.

El balance económico entre el Capex y el Opex por obtener al final de esta fase, se puede ubicar en los tres escenarios más probables, que son:

- 1) **Alta inversión al principio (diseño sofisticado) y gastos un poco elevados para la operación y mantenimiento.** El diseño sofisticado de una instalación, por lo general, implica dificultades para mantener los subsistemas que la conforman, debido a la dificultad de llevar a cabo alguna tarea de mantenimiento, traduciéndose en mayores tiempos para reparar, y por lo tanto, mayor tiempo fuera de servicio de la instalación afectando la disponibilidad requerida. Luego, un diseño sofisticado implica la adquisición de equipos costosos, por la tecnología y la alta confiabilidad (diseño, materiales y manufactura), aumentando los costos de inversión inicial, y afectando los costos de repuestos, costo de mantenimiento por hora y costo de operación por hora. El balance del costo del ciclo de vida obtenido no cumplirá con las metas propuestas y el flujo de caja probablemente no resulte el más satisfactorio.
- 2) **Mínima inversión en la primera etapa (diseño económico) y altos costos de mantenimientos y operación.** El diseño de un sistema que no se desarrolla en base a aspectos de confiabilidad (como por ejemplo, confiabilidad de los componentes de cada subsistema, redundancia en los subsistemas que lo requieran y, estudios de eslabones débiles), y aspectos de mantenibilidad (accesibilidad,

disponibilidad de los recursos, capacitación del personal, herramientas adecuadas y facilidad a acceder, etc.), resulta en un diseño pobre que implica un bajo costo inicial o de inversión, pero esa decisión repercute durante el funcionamiento de la empresa al obtenerse altos costos de mantenimiento y operación, y cuyo desempeño deficiente de la instalación puede ser castigado por penalizaciones. El balance del costo del ciclo de vida y flujo de caja anual resultante será desfavorable.

- 3) **Balance o estudio del costo del ciclo de vida para la elaboración del diseño, permite gastos un poco elevados en la inversión inicial, instalación, diseño, etc. (capex); pero más conservadores y mejor planificados en operación y mantenimiento (opex) para lograr una mayor tasa de retorno (negocio rentable).** El diseño debe satisfacer la confiabilidad deseada en la instalación, definida por los tiempos promedios operativos; la mantenibilidad se debe justificar a través de programas y estrategias de mantenimiento que permita mantener un nivel de confiabilidad del sistema deseado, y consideración de los aspectos que influyen en el buen desempeño del personal, en donde su planificación se deriva del diseño inicial y de las políticas de desarrollo del personal. Todo esto debe conllevar al cumplimiento de la disponibilidad, y a minimizar el costo del ciclo de vida con un flujo de caja positivo, para el cumplimiento de las metas que fueron trazadas en la fase de visualización.

El paso siguiente para el desarrollo de esta fase es la descripción de la metodología a seguir para implementar LCC en esta fase, y poder evaluar el proyecto.

Aspectos del Costo del Ciclo de Vida a considerar para el Diseño Básico

En el Diseño Básico, las Bases del Diseño son ampliadas con requerimientos ingenieriles y datos para la orientación de la Consultora de Ingeniería. El grupo de opciones generado en la fase de visualización es analizado después que las decisiones son tomadas.

El resultado que se espera es el desarrollo del Paquete de Diseño Básico (BDP), que junto con las Bases del Diseño (BOD), son herramientas poderosas para especialistas que guían la Consultora de Ingeniería, en preparación al Diseño Básico y Paquete de Ingeniería (BDEP) o una Especificación de Proyecto (PS). De aquí en adelante la fomentación de actividades en la fase de definición e implementación es llevada a cabo por la Consultora de Ingeniería. Se deben identificar todos los controladores y modificarlos para llegar a la óptima solución en LCC. Esto significa que en el Diseño Básico deben ser cubiertos la mayor parte de los aspectos de LCC.

Una importante decisión a ser hecha en esta fase es a elegir los diseños básicos de equipos. En donde el enfoque para tomar la decisión suministre beneficios seguros, que se logra mientras se generen más opciones en la definición y desarrollo de procesos, obteniéndose mejores soluciones sobre la base del LCC.

Para cumplir con los lineamientos exigidos por la metodología LCC, que se acaba de delimitar, y cumplir con los alcances establecidos para obtener el Diseño Básico, se describirá el esquema estructural a seguir para garantizar el cumplimiento de lo establecido. Este esquema es el siguiente:

1. Pasos para la elaboración de un Diseño Confiable al menor costo posible

A continuación se va a presentar un esquema bajo la cual se estructurará la metodología concerniente para la aplicación de Confiabilidad en esta fase:

- 1.1 Diseñar las configuraciones para cumplir metas de Confiabilidad.
- 1.2 Diseño del Sistema más óptimo que minimice el número de fallas y su impacto.

2. Metodología a seguir para considerar Mantenibilidad en el diseño

- 2.1 Principios de Diseños.
- 2.2 Estandarizar, Documentar, y Etiquetar.

- 2.3 Accesibilidad.
- 2.4 Protección y organización del personal.
- 2.5 Logística.
- 2.6 Establecer estrategias y políticas de mantenimiento en función del diseño anterior.
- 2.7 Realizar estrategias en función de evitar eventos anormales que produzcan indisponibilidad.
- 2.8 Consideraciones de factores que influyen el desempeño del personal en el diseño.
- 2.9 Puntualizar las estrategias que permitan el desarrollo del recurso humano que participara en el mantenimiento y operación de la instalación.

3. Generación del documento “Principios de Confiabilidad”.

DESARROLLO DEL ESQUEMA PRESENTADO

1. Pasos para la elaboración de un Diseño Confiable al menor costo posible

1.1 Diseñar las configuraciones para cumplir metas de Confiabilidad

La confiabilidad debe diseñarse y debe construirse en las posibles fases más tempranas de desarrollo en instalaciones. Cuando este diagrama se adopta, es la decisión más económica de obtener el mayor rendimiento de una instalación para la mayor productividad.

Objetivos que se quiere con esta metodología:

- ❑ Asegurar que los productos se encuentran dentro de los objetivos propuestos en la fase de visualización del proyecto.

- ❑ Identificar los mecanismos de fallas potenciales durante el diseño de la instalación a través del Análisis de Árbol de Falla.
- ❑ Perfeccionar los beneficios de alternativas del diseño a través de la optimización de confiabilidad.
- ❑ Encontrar la mejor asignación de confiabilidad para cumplir con los objetivos de confiabilidad del sistema completo de la instalación.
- ❑ Predecir a priori la confiabilidad de la instalación al hacer los cambios.

Alcances:

- El análisis de árbol de falla y Análisis de Modos y Efectos de Fallas.
- La estimación de confiabilidad.
- El estudio de intercambio, optimización de confiabilidad, y análisis del Costo-Riesgo-Beneficio.
- Identificación de problemas de seguridad.
- Cumplimiento de la meta de confiabilidad propuesta y realizar la asignación óptima.

1.1.1 Asignación de Confiabilidad

La asignación de confiabilidad involucra los objetivos de confiabilidad de escena para componentes o subsistemas para lograr un objetivo de confiabilidad del sistema. La asignación de confiabilidad debe ocurrir en las fases iniciales del diseño o priori a las actualizaciones mayores del sistema. El método más simple por asignar la confiabilidad es distribuir el objetivo uniformemente entre todos los subsistemas. Mientras la asignación uniforme es fácil de calcular, generalmente no es la mejor manera de asignar un objetivo de confiabilidad. La asignación más "óptima" de

confiabilidad tendría en cuenta el costo o la dificultad relativa de mejorar la confiabilidad de subsistemas diferentes o componentes.

La asignación de confiabilidad normalmente empieza de una base de la experiencia en el pasado, y se realiza primero a un nivel bastante general. Sin embargo, la asignación de confiabilidad se debe realizar a un cierto nivel de detalle, que sea apropiado para las primeras fases de diseño, de manera de poder guiar el trabajo del diseño más tarde. No es eficaz desarrollar un diseño detallado, y tener que rediseñar y reasignar la confiabilidad si la asignación inicial no es logable.

Objetivos:

- ❑ Proporcionar que el desempeño de los subsistemas se acoplen a los objetivos del sistema de la instalación.
- ❑ Ahorrar gastos señalando las áreas eficaces para las mejoras del diseño.
- ❑ Evitar la consideración de subsistemas con redundancia, dónde las ganancias de confiabilidad adicionales no pueden mejorar la confiabilidad del sistema significativamente.
- ❑ Proporcionar una herramienta de dirección de diseño útil.

Lineamientos:

- Establecer meta de confiabilidad propuesta en diferentes configuraciones.
- Establecer parámetros de asignación óptima.
- Evaluar las diferentes configuraciones de diseños contra las metas de confiabilidad.

1.1.2 Optimización de Confiabilidad

El proceso normalmente empieza con un modelo de confiabilidad básico que representa el sistema actual. En base a este modelo de fondo, el impacto de la confiabilidad los diferentes diseños propuestos puede estimarse, como el cambio en el costo del ciclo de vida. Se debe realizar un análisis de optimización para este problema, mientras se encuentra la mejor combinación de cambios de diseños que cumplan o exceden las metas de la actuación al costo más bajo.

Objetivos:

- ❑ Mejorar la comprensión funcional del sistema para comprender la confiabilidad del mismo, y detectar áreas de problema de confiabilidad.
- ❑ Ahorrar dinero identificando la mejor combinación eficaz de modificaciones al menor costo.
- ❑ Evitar gastos de tiempo y dinero en modificaciones que poseen un impacto insignificante.
- ❑ Proporcionar una herramienta de dirección de diseño excelente.

Lineamientos:

- Desarrollar un modelo básico para representar a priori la configuración y las modificaciones del sistema.
- Estimar los efectos de actualizaciones individuales o modificaciones.
- Encontrar el juego óptimo de actualizaciones o modificaciones que consideren las limitaciones del presupuesto.

1.1.3 Predicción y Modelaje de Confiabilidad (evaluación de las opciones)

La predicción de confiabilidad involucra estimación de la confiabilidad de equipos o priori de los equipos o instalaciones a su construcción o modificación. La predicción de confiabilidad exitosa generalmente requiere un modelo de confiabilidad del sistema en desarrollo. El nivel de detalle del modelo dependerá del nivel de detalle del diseño disponible en el momento. Los datos exigidos para cuantificar al modelo se obtienen de las bases de datos de instalaciones similares de PDVSA, el mantenimiento aplicado en dichas instalaciones, de los proveedores de equipos y materiales, o experiencia de especialistas de diseño y/o ingenieros con experiencia en el campo. La predicción de confiabilidad combina los procedimientos de análisis rigurosos, con el apoyo de un modelo desarrollado para la estimación aproximadamente realista de la actuación de la instalación.

Objetivos:

- ❑ Proporcionar una indicación temprana de la probabilidad de éxito que un diseño cumpla con las metas de confiabilidad.
- ❑ Identificar los puntos o las áreas de problema de confiabilidad potenciales en un nuevo diseño o modificaciones del diseño.
- ❑ Identificar áreas dónde se necesitan datos adicionales.
- ❑ Identificar componentes que necesitan modelar su comportamiento en el tiempo, para tomar una decisión de reemplazo en el diseño.

Lineamientos:

- ✓ Desarrollar un modelo de confiabilidad para simular el comportamiento de la instalación durante su vida útil (considerada en el diseño).
- ✓ Aplicar el Análisis de Árbol de Falla y Análisis de Modos y Efectos de Fallas como base para el modelo de confiabilidad.

- ✓ Utilizar base de datos de confiabilidad y experiencia de los especialistas.
- ✓ Utilizar algún Software para evaluar el modelo, como por ejemplo el Raptor, para determinar la probabilidad de falla (Pf) de sistemas, subsistemas y componentes de cada uno de los diferentes diseños hasta el momento propuestos. Para lo cual se requiere de utilizar los tiempos promedios operativos (TPO) y los tiempos fuera de servicio (TFS), los cuales se asumen como los tiempos promedios para reparar, que están propuestos según las metas a cumplir.
- ✓ Realizar una optimización de confiabilidad, y
- ✓ Realizar un análisis del Costo-Riesgo-Beneficio para cada una de las opciones presentadas.

1.2 Diseño del Sistema más óptimo que minimice el número de fallas y su impacto

En esta fase se debe diseñar el sistema para un mínimo de fallas, previendo la tolerancia de las mismas, considerando sistemas de detección y aislamientos más confiables y de fácil restauración.

El equipo que conforma la primera fase que comprende la visualización, ingeniería conceptual y definición (ingeniería básica) debe desarrollar este proyecto en conjunto con especialistas en confiabilidad para poder garantizar la inclusión de aspectos, metodologías y las mejores prácticas de confiabilidad.

El diseño se debe regir tomando en cuenta la disponibilidad de recursos con que cuenta la empresa inicialmente, la capacidad de producción requerida, los niveles de seguridad y el nivel de mantenimiento según la disponibilidad que se requiere para que la instalación tenga mayor continuidad operacional. A continuación se presentan una serie de pasos a seguir:

1.2.1 Anulación de fallas

1.2.1.1 Se debe diseñar para minimizar las fallas y su impacto. La metodología a seguir es la del principio de Anulación de Fallas, que permiten detectar las causas básicas generadoras de posibles fallas. Para poder desarrollar más eficientemente esta metodología se recomienda reuniones con encargados y operadores de planta vinculados a la instalación que se quiere emprender, para identificar el análisis de modos y efectos de fallas.

La información suministrada por estos expertos o empleados de alta experiencia comprobada será vital para la enumeración, y luego jerarquización de las posibles fallas.

Para empezar se debe realizar una correcta identificación, agrupación y estimación del impacto de los problemas recurrentes, para poder dirigir los recursos de análisis y solución. Esto se puede lograr a través del uso de herramientas como el Análisis de Criticidad (AC).

Una vez determinada la estructura de criticidad, de acuerdo al impacto de estos problemas recurrentes, es necesario utilizar herramientas de análisis que permitan encontrar las causas latentes de cada una de las desviaciones del proceso, como puede ser el Análisis Causa Raíz (ACR). A continuación se va a presentar las etapas para aplicar la metodología, estas son:

- a) Identificar cuales son los problemas que se deben analizar.
- b) Iniciar el Árbol de Lógica.
- c) Bajar en el Árbol de Lógica.

La metodología estructurada de la resolución de problemas está basada en técnicas clásicas de análisis. Hay tres principios fundamentales: Orden, determinismo y capacidad de descubrir.

Orden es un hecho que hay en la naturaleza y en todos los sistemas desarrollados por el hombre. Ya que hay orden en todo, la clave es encontrar el patrón de cómo ocurrió el problema.

Determinismo está directamente relacionado con orden. Por ejemplo, se sabe que las máquinas generalmente responden de cierta forma cuando están sujetas a estímulos, cargas, y tensiones específicas. Las personas también se comportan dentro de un rango relativamente pequeño de posibilidades cuando están sujetas a diferentes estímulos. Ciertos estímulos generalmente provocan alguna reacción predecible. Ya que este es el caso, generalmente se puede determinar qué causó los desvíos a través de un estudio de patrones de comportamiento.

Capacidad de Descubrir es simplemente una extensión del determinismo. Haciendo la pregunta de “¿Cómo?” puede ocurrir un evento, se hacen hipótesis y se verifican posibilidades para encontrar la respuesta. Este proceso nos lleva a preguntas adicionales que atraviesan la jerarquía de descubrimientos que eventualmente nos llevan a las causas raíces.

A continuación se describe el alcance de cada una de las etapas que integran la metodología de resolución de problemas:

a) Cuales son los problemas que se deben analizar

Los problemas o fallas sujetos a la aplicación de esta metodología están asociados a los denominados problemas crónicos, los cuales se definen como rutinarios en su naturaleza, parecen ocurrir una y otra vez y por las mismas razones aparentes. El problema es que las causas reales del problema nunca han sido analizadas y corregidas.

El primer paso es generar una lista de los posibles problemas crónicos en base a la experiencia de los operadores y empleados, y a la documentación existente en instalaciones similares. Determine si el problema tendrá un impacto pequeño o

grande si se soluciona. Además, determine si la resolución del problema requerirá un esfuerzo grande o pequeño.

De esta forma se puede representar el impacto y el esfuerzo utilizando una escala de uno, tres y cinco puntos, siendo uno un impacto bajo y fácil de resolver, y cinco representando un impacto alto y relativamente difícil de resolver.

Utilizando esta escala para mostrar impacto y esfuerzo, es fácil ver donde concentrar los esfuerzos de análisis.

Una vez generada una lista de problemas, es necesario priorizar la lista a través del desarrollo de una matriz de prioridades de tres por tres.

Al asignar Impacto y Esfuerzo a los problemas en la matriz, la técnica correcta es la de asignar el impacto primero y después el esfuerzo para resolverlo. El uso de la matriz de prioridades mejorará significativamente la capacidad para eliminar aquellos problemas crónicos que impiden el logro de los niveles deseados de éxito.

b) El Árbol de Lógica

El Árbol de Lógica determina las causas específicas de los problemas, para que las personas responsables de tomar las acciones correctivas necesarias para la resolución del problema, sepan precisamente qué es lo que necesitan arreglar.

Definir apropiadamente los problemas a través de la estructura del Árbol de Lógica. La definición del problema es crítica, ya que cuando se define apropiadamente un problema crónico o recurrente, la solución es evidente, o el camino hacia la solución llega a ser mucho más obvio.

c) Bajando en el Árbol de Lógica

Una vez que el analista ha desarrollado una caja superior completa y tiene una idea de cuál de los modos del problema puede ocurrir con mayor frecuencia, es hora de comenzar a bajar en el árbol de lógica, realizando preguntas y recolectando datos

de verificación. En cada nivel, se encuentran posibilidades múltiples que explican una causa de un nivel superior. La clave es determinar cuál de las posibilidades está probablemente generando la causa del nivel superior. El proceso comienza a través de la experiencia del personal que participa en el análisis. Es importante considerar las experiencias obtenidas en instalaciones similares, en la se les aplicó un Análisis Causa-Raíz (ACR), y se identificaron sus debilidades.

Una clave para lograr que el árbol de lógica funcione, es perseguir solamente dos de las alternativas en cada nivel. Estas alternativas tienen que ser tan amplias que cubran todas las posibilidades. Esta técnica reduce los parámetros de búsqueda a través de un mapeo de cuáles de las causas posibles se debería seguir.

Cuando se baja en el Árbol de Lógica, a veces es difícil saber hasta qué punto llevar el análisis. En realidad, se puede bajar en el árbol una cantidad infinita de niveles siempre haciendo la pregunta de ¿cómo?, sin embargo, esto no es solamente innecesario, sino poco práctico. El punto donde el analista debe parar es en la causa raíz organizacional que, si queda resuelta, eliminará la ocurrencia del problema.

Por supuesto, cuando la causa o las causas están descubiertas, hay un peligro de intentar realizar las correcciones sin evaluar las consecuencias de lo que uno está por hacer. En este punto, uno debe tomar precauciones extremas ya que:

- ✓ Puede ser que hemos llegado a una respuesta equivocada.
- ✓ Puede ser que tengamos bien las causas pero mal las soluciones.
- ✓ Podríamos estar estableciendo un precedente para el resto de la instalación que puede no estar dentro de los mejores intereses de la empresa.

La meta final del análisis es llegar a la causa raíz en términos de porque un modo particular del problema está ocurriendo. Cuando se alcanza este nivel, el analista debe tomar las acciones necesarias para arreglar el problema, y rediseñar.

1.2.1.2 En función de la información generada a través del consenso del grupo de trabajo se procederá a la selección, y nivel permisible de funcionamiento de cada componente que formará parte del sistema. Este punto es importante debido a que la confiabilidad del sistema depende de la confiabilidad de cada uno de sus componentes, y porque se establece el margen de funcionamiento de manera de no forzar a los equipos.

1.2.1.3 Subsiguiente a este paso se debe verificar la compatibilidad de los componentes seleccionados a partir de la siguiente metodología:

1.2.1.3.1 Análisis de esfuerzos.

1.2.1.3.2 Análisis en condiciones extremas (variabilidad).

1.2.1.3.3 Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF).

1.2.1.3.4 Selección de Sistemas de Soporte Robustos.

1.2.1.3.5 Selección de Materiales.

1.2.1.4 Por último se debe controlar la fase de diseño a través de un Control de Programa/Procesos inadecuados considerando los siguientes aspectos:

1.2.1.4.1 Utilización de Manuales de estándares de diseño.

1.2.1.4.2 Programa de revisión de diseño para asegurar la adecuación del diseño a los requerimientos y especificaciones.

1.2.1.4.3 Establecer especificaciones pertinentes de tal manera que impulse la incorporación de las características necesarias a los diseños para poder obtener la confiabilidad deseada.

1.2.1.4.4 Hacer un Análisis de Reporte de Fallas y Acciones Correctivas para poder desarrollar un plan de mantenimiento centrado en prevención.

1.2.1.4.5 Aplicar Técnicas de incremento de valor aplicables al tipo de diseño (selección de tecnologías, simplificación de procesos, clase de calidad de planta, minimización de desperdicio, diseño a capacidad, constructibilidad) para maximizar desde el punto de vista técnico/económico el valor de la(s) opción(es) seleccionada(s).

1.2.2 Diseño Tolerante a Fallas

En este punto lo que se busca es diseñar para obtener la mayor disponibilidad de la instalación. Para lograr este objetivo se debe minimizar el impacto de la falla, a un punto en que la instalación pueda tolerar un mínimo para que pueda seguir operando, y obtener la mayor continuidad de la misma.

Para lograr esto se va a explicar una técnica que consiste en la siguiente metodología:

1.2.2.1 Criterios de Rendimiento

1.2.2.1.1 Comprensión Completa del funcionamiento/operación para estimar el nivel de confiabilidad que puede alcanzar el sistema. Esto se debe lograr a través de la interacción de especialistas y los ingenieros que participan en el proyecto.

1.2.2.1.2 Establecer un nivel de funcionamiento mínimo donde el sistema pueda tolerar y ser capaz de realizar sus funciones. Para ello se debe definir cuales son los componentes/funciones críticos y definir los no críticos a través de un análisis de criticidad.

1.2.2.2 Configuración/Arquitectura

1.2.2.2.1 Se debe diseñar el sistema de tal manera que dada una falla no se propague a otros componentes confinándola.

1.2.2.2.2 Se debe procurar que el sistema no decaiga bruscamente sino gradualmente (carga compartida).

1.2.2.2.3 Aplicar la técnica de la redundancia, de manera óptima, para apoyar la eliminación de puntos sencillos de falla.

1.2.2.3 Condiciones de Operación

Se debe considerar la siguiente técnica:

La Jerarquización de Funciones, permite clasificar las funciones de los componentes por orden de importancia.

1.2.3 Detección / Aislamientos de Fallas

En este punto se busca aumentar la mantenibilidad a través de una técnica que permita detectar, diagnosticar y reparar en el menor tiempo posible la falla, y por ende, mejorar la disponibilidad del sistema. La técnica utilizada es la de Diagnóstico Rápido de Fallas.

1.2.3.1 Implementar el Diagnóstico Rápido de Fallas como método para aumentar la capacidad de recuperación operacional del sistema. Una vez que se conozca la función del equipo el método consiste en tener identificado los diferentes modos de falla que se pueden presentar en el equipo en estudio, a partir de un análisis de modo y efecto de fallas (AMEF), un análisis causa raíz (ACR) para conocer el origen de las fallas. De esta manera se tiene una especie de receta que va permitir diagnosticar de una manera más ágil.

1.2.4 Restauración después de la Falla

El objetivo de esta sección es minimizar el tiempo de reparación, y por ende, mejorar la mantenibilidad. Esto se logra a través de la siguiente técnica de diseño.

1.2.4.1 Facilidad de Reparación y Mantenimiento. A continuación se dan los siguientes lineamientos para lograr este punto:

1.2.4.1.1 Incorporar Mantenimiento en línea con la finalidad de reparar o reemplazar el activo.

1.2.4.1.2 Prever la mayor accesibilidad posible al activo.

1.2.4.1.3 El diseño debe prever una alta capacidad de Remoción y Reemplazo de manera de reducir el tiempo fuera de servicio.

1.2.4.1.4 Prever que los módulos / componentes sean reemplazados con los mínimos ajustes y evitando así excesiva intervención humana.

2. Metodología a seguir para considerar Mantenibilidad en el Diseño

Mantenibilidad puede definirse como la facilidad en tiempo y recursos de reparar el equipo o restaurarlo a una condición operacional especificada. Otra manera de definir mantenibilidad de equipo cualitativamente, es un diseño en característica que imparte a una máquina una habilidad inherente a ser mantenida con reducción de personal por horas y niveles de habilidad moderados, menos herramientas y equipo de apoyo, y reduce los riesgos que afectan la seguridad.

Mantenibilidad está a menudo confundida con el mantenimiento. El mantenimiento es una serie de acciones específicas tomadas para restaurar o mantener un equipo a un estado operacional completo. Estas acciones pueden incluir el servicio, mientras se solucionan problemas, la inspección, ajuste, el levantamiento y reemplazo, o reparación en sitio de componentes o sistemas mecánicos y eléctricos de un equipo en general. El mantenimiento preventivo se refiere a las acciones tomadas para retener una máquina a un nivel especificado de desempeño. Incluye el servicio rutinario y reemplazo de partes que son probables a fallar durante el próximo ciclo operacional. El mantenimiento correctivo representa acciones tomadas para restaurar un equipo a un estado operacional, después de que ocurrió una falla.

La mantenibilidad es un aspecto importante del ciclo de vida de cualquier sistema, ya que, en ella se establecen las logísticas para que las instalaciones tengan

mayor capacidad de ser mantenibles a lo largo de su ciclo de vida, incluso mejorando su vida útil. Es por ello que este aspecto debe ser adoptado desde el diseño del proyecto, consiguiéndose de esta manera que se optimice su aplicación en el mantenimiento.

Relación de Confiabilidad en el diseño para mejorar Mantenibilidad

Entre los principios a ser considerados en las etapas del diseño tenemos: Minimizar mantenimiento en esta etapa, e involucrar el personal de mantenimiento desde ese momento.

La mantenibilidad y la confiabilidad se encuentran muy relacionadas, por el hecho de que el funcionamiento exitoso de un sistema depende del nivel de confiabilidad intrínseco, y cuya capacidad para mantener va a ser mayor. En la medida en que el sistema es más confiable se requerirá menos mantenimiento. Por lo tanto es importante considerar la confiabilidad teniendo en cuenta algunos puntos como son: diseño del sistema más confiable a un óptimo costo (establecer diferentes configuraciones), considerar el tipo de instalación, minimizar el número de fallas y su impacto, y asegurar mecanismos de verificación de los productos de los proveedores, etc. La mayoría de estos aspectos fueron tratados anteriormente, en la primera parte. El mantenimiento se planea y se ajusta a partir de la confiabilidad como resultado del diseño, para mantener al sistema a un nivel de confiabilidad deseado.

De esta manera el mantenimiento es considerado desde las etapas del diseño obteniendo una planificación que cubra con las expectativas trazadas para mantenibilidad.

2.1 Principios de Diseños

El diseño puede ser muy sofisticado y elegante pero si es difícil de mantener terminará en la basura, además de los altos costos de mantenimiento que implica y los costos de penalización por indisponibilidad del sistema.

Se debe considerar un diseño modular en el que se divide el sistema en módulos físicos y funcionales que pueden arreglarse para facilitar un mejor diseño y mantenimiento. Los módulos fácilmente reemplazables con una organización lógica reducen el tiempo de reparación, solucionando problemas de mantenimiento, entrenamiento, y diseños. También se debe considerar la facilidad de conexión entre los módulos o subsistemas y la capacidad operativa entre los mismos.

La ingeniería de diseño se debe realizar con miras en el futuro, si el diseño es sustentable, y planificando los posibles arreglos razonables.

2.2 Estandarizar, Documentar y Etiquetar

La Estandarización permite mejorar la mantenibilidad reduciendo variaciones de diseño e instalaciones para el personal de mantenimiento. La estandarización de componentes reduce el inventario ayudando a mejorar también la confiabilidad.

La estandarización exitosa requiere el uso de las técnicas de diseño de confiabilidad y registrar los archivos de mantenimiento adecuados para analizar y poder determinar cuales pueden estandarizarse.

En muchos casos los sistemas están conformados por una variedad de equipos del mismo o diferente fabricante. La configuración o distribución más adecuada para mejorar mantenibilidad es determinada por el diseño.

La Documentación es una disciplina que debe ser adoptada desde el diseño y seguir implementándose en los sistemas de mantenimiento. Su debida aplicación permite el mejoramiento de prácticas de operación, desempeño de la instalación, mantenimiento, etc. Por lo tanto, tiene diferentes funciones desde el diseño, operación y mantenimiento durante la vida útil del activo.

Para la debida documentación se debe considerar un buen nivel de organización, diagramas, estilos, formatos, símbolos, accesibilidad, legibilidad, utilidad, pertinencia y comprensibilidad, de manera que proporcione información

fácilmente entendible, para facilitar el buen desenvolvimiento de las actividades del técnico de equipo. La accesibilidad y la sencillez de elaboración son dos aspectos importantes, ya que permiten obtener la información más rápidamente, y su debida comprensión para tomar la acción correcta al problema presentado.

En la planta los componentes del sistema deben ser fácilmente identificables. Para ello la Etiquetación debe ser consistente, estandarizada, limpia y accesible. La debida identificación del sistema proporciona la capacidad de rastrear la instalación eléctrica, fuentes de poder, e identificación de componentes sin el uso de diagramas permitiendo la solución de problemas con mayor eficacia y seguridad. La identificación apropiada también es una consideración de seguridad porque ayudan a enfocar mayor atención en los equipos de alto riesgo al tenerlos ubicados.

2.3 Accesibilidad

Accesibilidad significa tener suficiente área de trabajo y acceso para realizar el mantenimiento seguro y eficazmente. El área de trabajo adecuado no sólo se necesita para reparar o mantener el sistema sino también para solucionar los problemas. Debe hacerse consideraciones para abrir puertas, el levantamiento de tableros, desmantelamientos de partes o módulos, posiciones de la herramienta y/o espacio para realizar el trabajo, duración del acceso y exposición potencial a condiciones inseguras durante la intervención. Si el acceso es difícil, se tomaran vías o maneras de poder acceder al sitio, en donde pueden ocurrir resultados indeseables.

La accesibilidad del componente dentro de una parte del equipo también debe ser considerada. Los componentes de baja confiabilidad deben ser los más accesibles. Los componentes deben ser reemplazables con la menor cantidad de manipulación. La consideración no sólo debe hacerse a cómo un componente se removerá y reemplazará en un equipo o sistema, sino cómo el componente será manipulado una vez que está fuera del equipo o sistema.

La accesibilidad física de instalaciones debe ser considerada. Ésta debe ser un equilibrio entre funcionalidad, costo y confiabilidad. Luego la seguridad debe ser una consideración primaria. Una de las causas principales de accidentes en las plantas es el área prevista para ella y su distribución.

Algunos equipos que por su naturaleza o requisitos de distribución se localizan en las áreas pobremente accesibles afectando el índice de mantenibilidad para el subsistema al que pertenecen. Las respuestas en algunos casos son plataformas de accesos que agregan costos al diseño del proyecto, pero por otro lado se considerarían para el mantenimiento. Un acercamiento es observar la frecuencia de acceso, si esta resulta alta entonces se debe considerar plataformas de acceso.

2.4 Protección y organización del personal

Cualquier mantenimiento debe hacerse con seguridad. Ninguna acción de mantenimiento debe exigirle a una persona que realice un acto inseguro, en donde se puedan presentar riesgos mecánicos y eléctricos.

Los sistemas que son difíciles para trabajar pueden generar prácticas de trabajo inseguras. Mientras más acciones se tomen para poder realizar una actividad de mantenimiento, mayor es su dificultad.

Los factores humanos, otra área abandonada, consideran las limitaciones físicas humanas o donde los errores humanos pueden ocurrir debido al arreglo, orden, color, identificación, u otros factores que son contrarios a la expectativa o acción humana. Algunos de estos factores son basados en las culturas, ya que diferentes culturas reaccionarán distintamente al mismo estímulo, otros a la mala organización y a la falta de interés en mejorar los aspectos que influyen en la calidad del desenvolvimiento por parte del personal.

Otro factor es la consistencia. La consistencia hace que el trabajo de una persona de mantenimiento sea más fácil y más seguro, en donde la motivación y por parte del personal de mantenimiento es muy importante.

La moral puede considerarse como una de las más importantes en el factor humano. El mantenimiento realizado con la moral alta proporcionará mantenimiento de calidad superior y de manera consistente, mantenimiento en menor tiempo, y los mejores registros de seguridad.

2.5 Logística

La logística es la habilidad de tener disponible, en el tiempo necesitado, los recursos y partes requeridas para hacer la reparación.

Las herramientas y entrenamientos son fundamentales. La herramienta apropiada para el trabajo es clave para el mantenimiento seguro y eficaz.

Los sistemas se pueden diseñar complejos y sofisticados, pero el mantenimiento probablemente puede resultar difícil para el inexperto. Es más difícil trabajar sin algún formulario de entrenamiento formal. Deben hacerse consideración en requisitos de entrenamiento en el desarrollo de un proyecto. Pero el entrenamiento no es el único elemento a considerar para la especialización o establecer una logística, hace falta una serie de elementos como el conocimiento, la capacidad, la experiencia y la aplicación.

Si se va a instalar un equipo, se debe abastecer los repuestos y materiales necesarios o recomendados, sino se tendrá que hacer arreglos para el equipo. Para ello se debe prever la disponibilidad de repuestos localmente, regionalmente, o si puede ser fabricada en los talleres.

La disponibilidad de recursos para el mantenimiento es una clave para la buena mantenibilidad. La planeación basada en recursos verdaderamente necesarios, y sus

costos o limitaciones de obtención y almacenamiento, pueden mejorar significativamente la mantenibilidad del sistema.

La información y el acceso a recursos especializados también deben ser considerados. También hay que tener cuidado con los recursos prometidos por los proveedores, debido a que estos pueden tener el hábito de desaparecer después de que se ha hecho la compra del equipo o se termina el contrato.

2.6. Establecer estrategias y políticas de Mantenimiento en función del diseño anterior

2.6.1 Técnicas para desarrollar las Estrategias de Mantenimiento

2.6.1.1 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para determinar programas de mantenimiento

En esta sección se recomienda utilizar el Análisis de Criticidad como punto de partida para establecer de una manera más eficiente la priorización de los programas y planes de mantenimiento de tipo: predictivo, preventivo y correctivo. Inclusive permitirá establecer la prioridad para la organización y ejecución de trabajo.

Luego la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), propone un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional, a partir del análisis de las siguientes preguntas básicas:

- 1) ¿Cuál es la función del activo?
- 2) ¿De qué manera pueden fallar?
- 3) ¿Qué origina la falla?
- 4) ¿Qué pasa cuando falla?
- 5) ¿Importa si falla?

6) ¿Se puede hacer algo para prevenir la falla?

7) ¿Qué pasa si no podemos prevenir la falla?

En la práctica, el personal de mantenimiento no puede contestar las anteriores preguntas básicas del MCC por sí mismo. Esto es porque muchas de las respuestas sólo pueden ser proporcionadas por un “Equipo Natural de Trabajo”, conformado por el operador, mantenedor, programador, personal de seguridad, especialistas y un facilitador.

A continuación se presenta los pasos a seguir para el desarrollo de esta metodología:

- Definir Contexto Operacional.
- Definición de Funciones.
- Determinar Fallas Funcionales.
- Identificar Modos de Fallas.
- Determinar Efectos de Fallas.
- Aplicación de la Hoja de Decisión.

Acciones de Mantenimiento

Luego de analizar las funciones, fallas funcionales, modos de falla y sus consecuencias, el siguiente paso consiste en seleccionar la actividad de mantenimiento.

MCC categoriza los efectos de acuerdo a sus consecuencias en: fallas ocultas, seguridad y/o ambiente, operacionales y no operacionales.

Para establecer las acciones de mantenimiento requeridas, se utiliza el árbol de decisiones, donde dependiendo del tipo de consecuencia que ocasiona cada falla, según la clasificación antes mencionada, se deberá ejecutar una acción: predictiva, preventiva, detectiva, un rediseño, o simplemente dejar fallar.

2.6.1.2 Técnicas Predictivas

- **Monitoreo Remoto de Condición (MRC) para Equipos Dinámicos**

El Monitoreo Remoto de Condición (MRC) de Equipos Dinámicos es una técnica que permite detectar y advertir oportunamente condiciones de mal funcionamiento reduciendo el número de fallas funcionales y de este modo reducir los costos por reparación y pérdidas por producción diferida. También se desea orientar las inspecciones en campo en función al comportamiento de los equipos determinado por un programa de Mantenimiento Predictivo, cuya condición real amerite un traslado al sitio de trabajo y no en función de programas de inspección con frecuencias rígidas en el tiempo, que es la condición actual.

La importancia de focalizar las acciones de inspección en función de la condición real es un arma poderosa, en cuanto a que está asociada a los costos de mantenimiento y el riesgo en el impacto del negocio. La inspección realizada a través de un programa, involucra costos innecesarios cuando se inspeccionan equipos que no lo requieran, e involucra alto riesgo cuando no se inspeccionan los equipos en el instante en que se encuentran en un estado crítico.

A continuación se describirá la metodología a usar para implementar la técnica:

- **Selección de los Equipos Dinámicos.** Se debe seleccionar los equipos dinámicos que al fallar representen mayor impacto en pérdidas a la instalación. Su selección se puede hacer a través de un Análisis de Criticidad.
- **Identificación de Variables.** Ubicar las diferentes variables (presión, temperatura, vibración, etc.) disponibles en la instalación. Verificando o

comprobando que cada parámetro en cuestión, tenga su respectiva identificación de Puntos de Datos o TAG. Esto se puede facilitar haciendo uso de la conexión del sistema con la hoja de cálculo Excel.

- **Inventario y selección de variables.** Una vez contabilizadas las variables disponibles, analizar cuales son las de mayor interés para efectuar el monitoreo de la condición de los equipos.
- **Confiabilidad del dato.** Analizar si el valor de cada variable corresponde a su valor esperado tanto en condición normal como fuera de especificación.
- **Uso de las aplicaciones.** Uso de las diferentes aplicaciones del sistema, tales como despliegues, alarmas, visualización de multiestados y cálculos entre otros.

Despliegues → Son las diferentes pantallas en el computador que presentan la lista de variables o parámetros operacionales que se desean monitorear. El diseño de los despliegues se puede basar en la hoja de toma de parámetros operacionales usadas en la mayoría de las planta por el operador.

Alarmas → Es una aplicación diseñada para el envío de mensajes vía correo electrónico, en aquellos casos que cualquier variable presente desviaciones no acordes con su condición normal de operación.

Multiestados → Es una herramienta que permite visualizar la condición de cada variable respecto a su nivel de alarma y paro.

Aplicaciones de Cálculos:

Datalink → Esta aplicación permite desde Excel importar data proveniente del PI, para efectuar cálculos tales como, horas de operación, porcentaje de utilización, números de arranques, etc.

Módulo de Cálculo → Esta aplicación diseñada previamente bajo el nombre de Módulo de Mantenimiento, permite:

1. Efectuar bajo el empleo de ecuaciones Matemáticas; pronósticos de la fecha cuando se alcanzará el valor de paro de una variable.
2. Determinar la correlación o dependencia existente entre dos variables para efectos de análisis.

▪ **Evaluación de resultados.**

Funcionamiento de la técnica:

El sistema consta de un Concentrador de Información Operacional de Campo (CIOOC) como dispositivo principal, el cual integra la información a través de sistemas de colección, mantiene en línea la historia de los dos últimos años de las variables de proceso, y provee herramientas que permiten analizar dicha información y visualizar el comportamiento de los procesos en cualquier momento, obteniendo un buen control de las operaciones de las instalaciones. La información es colectada a través de sistemas como SCADA, DCS, Sistemas de Laboratorio, Entradas Manuales de Datos, Bases de Datos Relacionales, etc. e integrados en una base de datos como un Servidor de Información de Planta (PI).

Por medio de computadoras personales conectadas a la red, permite a los usuarios manejar desde sus oficinas un cuadro preciso, actualizado y en tiempo real, de los diferentes procesos de producción. Adicionalmente permite llevar y documentar estadísticas sobre cualquier área de interés de una instalación.

▪ **Estimación de Confiabilidad de Equipos Estáticos Basada en Condición**

Es una técnica altamente recomendable para equipos estáticos, que presentan patrones de “baja frecuencia de fallas” y por ende no se tiene un “historial de fallas” que permita algún tipo de análisis estadístico.

Esta técnica se apoya en la Teoría Esfuerzo – Resistencia para el cálculo de la Confiabilidad basado en la data de condición. Tiene como premisa el hecho de que

las fallas son el resultado de una situación donde la carga aplicada excede la resistencia. La carga es un parámetro relevante que caracteriza y describe numéricamente la condición del equipo, siendo esta el valor que se monitorea. La resistencia es el valor límite permisible de la condición.

En la mayoría de los casos ni la carga ni la resistencia son valores fijos, tienen un grado de incertidumbre asociado, y por lo tanto son valores estadísticamente distribuidos. Por ende, el cálculo de la confiabilidad está en función del valor medio de cada distribución y de sus respectivas desviaciones estándar.

$$\text{Confiabilidad} = \Phi \left(\frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \right)$$

Donde μ_r y μ_s son las medias de las distribuciones de la resistencia o criterio límite y el esfuerzo o condición monitoreada respectivamente, y σ_r y σ_s las respectivas desviaciones estándar.

El operador “ Φ ”, indica que con el resultado obtenido de la ecuación entre paréntesis, debe buscarse el valor de probabilidad correspondiente en una tabla de la distribución normal.

A continuación se desarrollará la metodología para la aplicación de esta técnica:

- 1) Definir un Parámetro Relevante de Condición (PRC), parámetro cuyo valor numérico caracteriza y cuantifica la condición de un equipo o componente en cualquier instante de su vida operativa, que en este caso sería el espesor de pared “E”.
- 2) Realizar una inspección en marcha a la instalación, a través de la técnica de ultrasonido en puntos críticos preseleccionados por los expertos en Inspección de Equipos Estáticos, y la inspección visual externa de todos los equipos que conforman la instalación.

- 3) Determinar la velocidad de corrosión a través de la data obtenida y con data de alguna inspección realizada anteriormente.
- 4) Modelar la profundidad del daño para cada defecto a través del tiempo empleando el método de Simulación de Monte Carlo, con la ayuda del software Mathcad, para generar “n” posibles valores de profundidad de pérdida de espesor, propagando la incertidumbre de las variables (d_o y R_c). Cada anomalía genera “n” rectas que forman una distribución probabilística, e indican los posibles caminos de corrosión en el transcurso del tiempo.
- 5) Determinar los espesores requeridos por sistema y por punto crítico seleccionado, esto con la finalidad de determinar los valores límites (d_{lim}) de cada punto, a través de los niveles máximos de presión por sistema y mediante la aplicación de las normas internacionales ASME B31.G, ASME B31.4 y ASME B31.8.
- 6) Estimar la confiabilidad y la probabilidad de falla, en donde todos los valores menores a d_{lim} son confiables, y por encima de éste, valores con probable aparición de falla.

2.6.1.3 Optimización de Inventarios a través de la metodología Costo-Riesgo-Beneficio (ACRB)

La optimización de inventarios de repuestos identifica el juego óptimo de componentes para minimizar los costos del inventario, mientras se aumenta al máximo la disponibilidad de equipos en el sistema. El análisis los repuestos requeridos identifican las partes correctas (y número de partes) para optimizar el tiempo de reparación, basado en los datos sobre el sistema y fallas del componente. El análisis de los repuestos, junto con el análisis del costo de mantenimiento, ayuda a identificar la logística y las estrategias de mantenimiento más correctas para la mejora de confiabilidad. Lo recomendable es combinar la meta de confiabilidad y

optimización de las combinaciones para desarrollar los inventarios de repuestos lo más efectivo posible.

Utilizar metodologías de Confiabilidad Operacional que permite establecer estrategias más acertadas sobre el nivel de equipos, componentes y repuestos que deben existir en el almacén, así como los requerimientos en materiales y herramientas que deben estar disponibles en los almacenes de la instalación. De esta manera se puede establecer el “stock” de materiales y repuestos de cada sistema y/o equipo logrando un costo óptimo de inventario.

Objetivos:

- ❑ Reducir el costo de adquirir y mantener un inventario de repuestos adecuado.
- ❑ Establecer una adecuada política en los inventarios para mantener la confiabilidad, mejorar la mantenibilidad, y por ende la disponibilidad del equipo.
- ❑ Reducir la probabilidad de tener repuestos de poco uso, y
- ❑ Evitar en gran medida el almacenamiento de repuestos innecesarios.

Lineamientos:

- Analizar confiabilidad de equipos basada en los archivos de mantenimiento.
- Identificar fallas importantes que contribuyen a aumentar tiempo fuera de servicio, indisponibilidad, y costo.
- Realizar un Análisis de Criticidad (AC) en los sistemas para establecer la priorización de equipos, materiales y repuestos, que deben existir en el almacén central.
- Utilizar las técnicas de Optimización Costo-Riesgo-Beneficio para modelar y analizar distintos escenarios, con el fin de determinar el número óptimo de

repuestos que se deben disponer, para cubrir con los requerimientos de mantenimiento preventivo y correctivo, y conocer la viabilidad económica de adquirir nuevos equipos.

Metodología para la aplicación del Modelo Costo-Riesgo-Beneficio en la Optimización de Inventarios

La metodología se enfoca en la sumatoria punto a punto de una curva de comportamiento del costo de la política de inventario en intervalos de tiempo y los costos del riesgo asociados a cada uno de estos intervalos vs. el número de repuestos, expresando esta relación de comportamiento en unidades monetarias en una última representación gráfica que refleja el impacto global en el negocio, permitiendo visualizar el punto o intervalo mas bajo a nivel de costo, así como el punto o número óptimo de repuestos requeridos para cumplir con los requerimientos de mantenimiento preventivo y correctivo.

Para caracterizar el modelo se definirán cada una de las curvas como sigue:

- La curva del nivel de riesgo calculada debido a la indisponibilidad del repuesto.
- La curva de los costos del inventario, en la cual se simulan los costos de diferentes niveles de almacenamiento de repuestos así como los costos de mismos para cada una de las cantidades propuestas.
- 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 inventario. El “mínimo” de esta curva, representa el “mínimo impacto posible en el negocio” y está ubicado sobre el valor que puede traducirse como el número óptimo de repuestos que se deben disponer para la realización de la actividad de mantenimiento. Un desplazamiento hacia la izquierda de este punto implicaría “asumir mucho riesgo en términos de dinero” por indisponibilidad y un desplazamiento hacia la derecha del mismo implicaría “gastar demasiado dinero” por adquisición de repuestos en exceso.

La dificultad para el uso del modelo, se centra en la estimación o simulación 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 por indisponibilidad de repuesto.

Pero es importante el uso de modelos de decisión basado en riesgo, donde se pueden citar los softwares APT Spare y el Crystal Ball, para tener un espectro más completo para el apoyo de las decisiones estratégicas en la política de inventarios. Estos modelos se especifican a continuación:

- **APT-SPARE:** Establece estrategias de repuestos y materiales, niveles mínimos y máximos de inventarios, cuantificación de ordenes, comparación de suplidores y opciones de inventario pero bajo la premisa de que sean de baja rotación.
- **CRYSTAL BALL:** Permite el manejo de modelos de decisión que permite reconocer, cuantificar y propagar la incertidumbre que se asocia a las variables del proceso y que afectan el control de gestión de inventarios, permitiendo la caracterización probabilística de las mismas.

2.6.1.4 Determinación de la Frecuencia Óptima de Inspección a través de la metodología del Costo-Riesgo-Beneficio (ACRB)

Para las actividades de inspección el estudio de criticidad facilita y centraliza la implantación de un programa de inspección, dado que la lista jerarquizada indica donde vale la pena realizar inspecciones, y ayuda en los criterios de selección de los intervalos y tipo de inspección requerida para sistemas de protección y control (presión, temperatura, nivel, velocidad, espesores, flujos, etc.), así como para equipos dinámicos, estáticos y estructurales.

Para la estimación de los intervalos óptimos de inspección se recomienda la utilización de modelos de optimización como el modelo Costo-Riesgo-Beneficio.

El modelo Costo-Riesgo-Beneficio permite comparar el costo asociado a una actividad de mitigación del riesgo (mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo, reemplazo, reacondicionamiento, rediseño, rehabilitación, actualización tecnológica, etc.), 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-Beneficio 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 CRB 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.

A continuación se describen tres curvas que varían en el tiempo:

- La curva del nivel de riesgo ($\text{riesgo} = \text{probabilidad de falla} \times \text{consecuencia}$) asociado a las frecuencias de inspección.
- 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 mitigación; un desplazamiento hacia la derecha de este punto implicaría “asumir mucho riesgo” y un desplazamiento hacia la izquierda del mismo implicaría “gastar demasiado dinero”.

2.6.1.5 Paradas Programadas (Overhauls)

Las paradas de plantas eficientes involucran un enfoque disciplinado para asegurar un nivel de integridad continuo de las plantas y los equipos a través de un proceso gerencial proactivo. Un nivel efectivo de Gerencia de Mantenimiento se logra cuando el equipo de mantenimiento es exitoso en optimar todos los recursos, las herramientas y los equipos para completar la parada programada en forma segura, según el programa, dentro de las limitaciones presupuestarias, mientras se asegura la confiabilidad del activo para el ciclo esperado de producción. Con la buena práctica de la Gerencia se reducen los costos, el tiempo de ejecución y la frecuencia de las Paradas.

La Gerencia de Planta debe generar una estrategia con lineamientos orientados hacia mantenimiento de las unidades de procesos, recursos humanos, recursos en materiales y herramientas, metodología que permitan la buena ejecución de las diferentes actividades, organización y una buena planificación de todos los objetivos o necesidades que se quieren cubrir. El cumplimiento de estos lineamientos dará como resultado el manejo eficiente de tecnologías y sistemas de Paradas de Plantas de manera práctica y efectiva en términos de costos, y adicionalmente permitirá mejorar esta práctica de la siguiente manera:

- ✓ La operación confiable del equipo después de completar de manera segura un alcance definido de trabajo, a tiempo y dentro del presupuesto.
- ✓ Adecuar los recursos, donde sean requeridos, para maximizar los beneficios de la identificación temprana del alcance y el esfuerzo de planificación.
- ✓ Identificación y eliminación de las barreras de desempeño laboral y la poca calidad de los materiales, las herramientas y de los servicios contratados.
- ✓ Planificadores adiestrados en la operación de software funcional de planificación y en la utilización de un programa de trabajo práctico capaz de

reaccionar ante condiciones cambiantes, suministrando información precisa y oportuna a los gerentes y supervisores.

- ✓ Minimizar las pérdidas de tiempo y re-trabajos debido a políticas, procedimientos e instrucciones de campo confusas.
- ✓ Un Proceso de Cierre de la Parada que sirva como punto de partida para el análisis del mejoramiento continuo y la lista inicial de trabajo para la siguiente parada.
- ✓ Un Proceso Gerencial de Paradas consistente que mejore con el tiempo, de manera de buscar un cambio a la excelencia.

2.6.1.6 Costo de Mantenimiento

La última medida de la confiabilidad del equipo es el costo para mantenerlo. El Costo de Mantenimiento típicamente incluye el costo de labor y los repuestos necesarios para realizar las reparaciones. En muchos casos, es también razonable asignar un costo al tiempo fuera de servicio (penalizaciones). Entre esos costos se consideran costos por pérdida de producción, los empleados asociados en la reparación, etc. Lo recomendable es estimar el costo de mantenimiento por equipo e identificar los modos de falla que contribuyen a los mayores costos de mantenimiento.

Objetivos:

- ❑ Determinar los costos para mantener y operar los equipos.
- ❑ Identificar modos de fallas que contribuyen a altos costos de mantenimiento.
- ❑ Identificar oportunidades de reducir el costo, y
- ❑ Desarrollar un análisis de costos y beneficios, donde los beneficios se cuantifican por disponibilidad del equipo, y los costos se cuantifican por:

inventario de los repuestos, frecuencia de mantenimiento (definida por el tiempo medio entre fallas), y el costo de reparación por hora con el tiempo promedio para reparar.

Lineamientos:

- Desarrollar un modelo de confiabilidad directamente de los archivos de mantenimiento.
- Desarrollar un modelo de costo de mantenimiento con la base de los datos de mantenimiento almacenados, y
- Analizar estrategias de mantenimiento contra las sensibilidades del costo.

2.6.1.7 Análisis de Datos de Fallas

Se debe analizar los datos de fallas de campo para poder caracterizar bien el comportamiento del equipo después de que se ha puesto en servicio. Hay dos tipos de análisis que se realiza típicamente:

El Análisis estadístico. Este tipo de análisis busca caracterizar la actuación de una población de equipos similares. Para caracterizar una población de equipos se puede hacer a través de indicadores como el tiempo medio entre fallas (TMEF), tiempo medio para reparar (TMPR), disponibilidad, y costos de mantenimiento. También se puede buscar la sensibilidad de estos valores a los modos de fallas específicos y para las fuentes primarias de incertidumbre en estos valores.

El Análisis de equipo. Este análisis proporciona el mismo tipo de resultados como el análisis estadístico, pero en este caso se calcula los resultados para cada equipo individual. Se puede ver entonces qué equipo está realizando el mejor desempeño, y cual esta realizando el peor. Para un equipo seleccionado podemos encontrar los modos de fallas más frecuentes que están ocurriendo, y podemos buscar las tendencias o efectos.

Objetivos:

- ❑ Estudiar el comportamiento de un grupo de equipos similares.
- ❑ Identificar las diferencias de comportamiento entre los equipos similares.
- ❑ Identificar a los contribuyentes importantes al tiempo medio entre fallas (TMEF), disponibilidad, tiempo fuera de servicio (TFS), costo de mantenimiento, y
- ❑ Proporcionar información cuantitativa a los proveedores de equipos acerca de la actuación del mismo.

2.6.2 Desarrollo de las Actividades de Mantenimiento

En función de las técnicas anteriormente descritas se van a desarrollar las actividades de mantenimiento en los siguientes renglones:

- ✓ Mantenimiento Preventivo.
- ✓ Mantenimiento Correctivo.
- ✓ Mantenimiento Predictivo.

2.6.2.1 Mantenimiento Preventivo


Preventivo - Programado

2.6.2.1.1 Tomar en cuenta el resultado del Análisis Causa Raíz realizado previamente en la sección 1.2.1, para mitigar las fallas, de manera de poder establecer estrategias de mantenimiento vinculado a solventar los problemas que fueron definidos, pero que no fueron eliminados a través de un rediseño. Luego crear la lista de tareas de mantenimiento necesarias en la instalación antes de que se inicie la Ingeniería de Detalles.


2.6.2.1.2 Incluir las acciones de mantenimiento obtenidas a partir del MCC realizado a principio de esta sección.

2.6.2.1.3 Establecer las actividades de mantenimiento programado óptimo según la clasificación de mantenimiento por niveles, en base a la asignación de grados progresivos de complejidad a las operaciones de mantenimiento.


La Norma Francesa (AFNOR 60 011) clasifica en 5 niveles a las operaciones de Mantenimiento. Estos niveles son:

1^{er} Nivel  El mantenimiento de primer nivel corresponde a actividades que se realizan sobre los equipos en su ubicación de funcionamiento. Las operaciones de mantenimiento de primer nivel suelen ser intervenciones sencillas de bajo nivel de experticia, como ajustes sencillos previstos por el fabricante, tales como:


- ✚ Lubricación menor.
- ✚ Cambio de componentes de acceso directo.
- ✚ Restitución de protecciones de seguridad.
- ✚ Limpieza del equipo.

2^{do} Nivel  El mantenimiento de segundo nivel corresponde a las operaciones de mantenimiento correctivo, ejecutadas sobre el equipo en su ubicación de funcionamiento. Los trabajos pueden ser sencillos o complejos dependiendo del tipo de equipo. Las actividades en este nivel se limitan a la sustitución preventiva de elementos simples directamente accesibles, tales como:


- ✚ Cambios de correas.
- ✚ Corrección de desajustes mecánicos.
- ✚ Sustitución de módulos menores de acceso directo.

3^{er} Nivel  Al mantenimiento de tercer nivel corresponden trabajos de mantenimiento preventivo en sitio para la identificación y diagnóstico de averías y reparación por cambio de componentes de sustitución directa, tales como:

- ✚ Detección instrumental de fallas.
- ✚ Reparación por cambio de componentes.

4^{to} Nivel  El mantenimiento de cuarto nivel corresponde a trabajos de mantenimiento correctivo realizados en taller, sobre equipos retirados de producción en operaciones de mantenimiento de segundo nivel. Este tipo de mantenimiento implica la existencia de un cierto grado de modularización en equipos pesados o la utilización de equipos livianos trasladables al taller para su reparación. El componente o pieza retirada del equipo se repara y se incorpora al inventario de accesorios o componentes en almacén. Entre estos trabajos mayores de mantenimiento preventivo y correctivo realizados en taller tenemos:

- ✚ Reparación por cambio de componentes mayores inaccesibles en forma directa.

5^{to} Nivel  Por lo general, este mantenimiento se realiza por contratación en donde se requieren maquinaria especializada de alto costo y baja utilización para trabajos de renovación (Overhaul), o reconstrucción de componentes mayores de un equipo. Este mantenimiento se hace por contratación siempre que se requiera mano de obra especializada durante períodos de tiempo relativamente cortos, y donde el trabajo resulta más económico que hacerlo con personal de la empresa.

Preventivo – Condicional

Basado en las técnicas para inspección y diagnósticos. Las actividades que se describen en esta sección, se obtendrán a partir del Análisis Costo-Riesgo-Beneficio para optimizar las inspecciones, y de los sistemas o métodos de diagnósticos en equipos y subsistemas.

2.6.2.2 Mantenimiento Correctivo o Curativo

En el mantenimiento correctivo o curativo se establecen el conjunto de actividades o tareas que se realizan sobre los equipos fallados, para restablecerlos a condición operativa. La ocurrencia de fallas es un hecho inevitable, aunque controlable dentro de limitaciones que se establecen durante el diseño y la construcción de los equipos o sistemas de equipos.

En todo sistema de mantenimiento organizado se trata que la tasa de fallas se mantenga tan baja como sea económica o técnicamente conveniente.

En sistema de equipos complejos es muy importante la planeación de las actividades de reparación mediante la elaboración de esquemas lógicos de detección de fallas, la utilización de facilidades de diagnóstico instrumental y mediante técnicas de detección analítica, técnicas de aislamiento de fallas, y técnicas de restitución del equipo.

2.6.2.3 Mantenimiento Predictivo

En este renglón de mantenimiento lo prioritario es desarrollar un sistema de archivos de mantenimiento predictivo de equipos (dinámicos y estáticos), de manera de enfocar la atención en modos de fallas importantes que llevan a la indisponibilidad del equipo, y el tiempo fuera de servicio. Se deben emplear sensores para supervisar indicadores importantes de actuación de equipo. Los datos del sensor en tiempo real se combinan con la información del mantenimiento de equipo, para mantener constantemente al día las predicciones de fallas de equipos, e identificar las causas de fracaso con mayor probabilidad.

Objetivos:

- ❑ Se busca reducir el tiempo fuera de servicio del equipo a través del análisis predictivo.

- ❑ Mejorar el almacenamiento de datos de mantenimiento de equipo para mantener una base cuantitativa y poder establecer mejores estrategias de mantenimiento, minimizar costos de los inventarios de repuestos, y un buen entendimiento entre los costos de mantenimiento y oportunidades para reducir esos costos.

Lineamientos:

- Prever sensores para obtener notificación temprana de muchas fallas de equipos que reducen el tiempo fuera de servicio, la disponibilidad, y la productividad asociada.
- Almacenar las actividades de mantenimiento y el análisis de los Modos y Efectos de Fallas (AMEF) para entender bien la actuación de los equipos y sus costos asociados, así como identificar las áreas de problema mayores de confiabilidad.
- Optimizar los inventarios en función del análisis anteriormente realizado para asegurar un tiempo fuera de servicio más bajo a un costo más bajo.
- Crear un Sistema de Dirección de Mantenimiento Informático que permita la recolección de los diferentes AMEF, tiempos de reparación, e información de la inspección.
- Establecer las estrategias de mantenimiento preventivas.

2.6.2.4 Determinar el intervalo óptimo para paradas de plantas, en función de la confiabilidad de la instalación, los beneficios del paro, los recursos disponibles, el costo y riesgo para realizar las actividades planificadas. Las paradas de plantas deben guiarse por los lineamientos gerenciales. Para la determinación del intervalo óptimo de paradas de plantas se puede realizar con el análisis Costo-Riesgo-Beneficio (ACRB).

2.6.2.5 Estudiar mediante el método ACBR la frecuencia óptima de inspección.

2.6.3 Utilizar modelos de decisión basados en riesgos donde se cuantifique la incertidumbre a través de la “Simulación Monte Carlo”.

2.6.4 Realizar un análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCC) para determinar la viabilidad económica del proyecto en función de los recursos disponibles para emprenderlo, los requerimientos de producción, costos para mantenerlo y seguridad previamente definidos en la etapa de visualización, la vida útil y su posible extensión.

2.6.5 Establecer una política de mantenimiento no planificado para gerenciar posibles fallas parciales durante los períodos de producción, donde se pondere los beneficios y costos de emprender una acción de mantenimiento, para mitigar los riesgos asociados a esas fallas parciales, y poder mantener la continuidad operacional.

2.6.6 Utilizar la técnica de los modelos basados en Riesgos para poder obtener mayor información acerca de la posibilidad, y probabilidad de algún tipo de falla, y poder disminuir la incertidumbre.

2.6.7 Realizar una Evaluación de Sitio y de Riesgo Ambiental (ESDRA).

2.6.8 Determinar los mecanismos de degradación que pueden afectar la integridad de los equipos.

2.6.9 Realizar un análisis preliminar de peligrosidad (APP).

2.6.10 Realizar simulaciones para predecir el valor de disponibilidad a través de un modelo analítico que permita evaluar las opciones generadas. De esta manera se puede dimensionar la instalación en la que se toma en cuenta mantenimiento, probabilidad de falla y capacidad efectiva (% de disponibilidad x capacidad procesamiento).

2.7. Realizar estrategias en función de evitar eventos anormales, que produzcan indisponibilidad

El objetivo de esta sección es la detección temprana de eventos anormales que pueden ser defectos del diseño del sistema o influenciado a las características del ambiente.

2.7.1 Dichos defectos se pueden interpretar como exigencias de los sistemas o advertencias de fallos. A continuación se dan los tipos de defectos anormales:

- ❑ Condición que excedan el límite de operación segura.
- ❑ Incrementos anticipados de carga, eventos transitorios y condiciones inexplicables, inesperadas o variaciones del sistema.
- ❑ Reducción en la capacidad del sistema de emergencia.

2.7.2 Los eventos anormales vienen asociados a un conjunto de diversos motivos (ajenos y no ajenos), que se engloban en el ambiente que impera o gobierna las etapas en desarrollo del sistema, y que representa la base bajo la cual se crea. Entre ellos se pueden considerar los siguientes aspectos:

- ❑ Calidad del diseño.
- ❑ Políticas de mantenimiento.
- ❑ Conocimiento del personal de mantenimiento y
- ❑ Adecuados sistemas de detección.

2.7.3 Entre las posibles respuestas a estos eventos anormales tenemos:

- ❑ Transferencia de información crítica y almacenamiento (registro de datos de operación y mantenimiento) para un análisis de los datos obtenidos en sitio.

- ❑ Monitoreo continuo.
- ❑ Control de la producción del sistema para tener un mejor manejo de dichos eventos.
- ❑ Inversión en capacidad de respuesta contra riesgo de pérdidas de producción.
- ❑ Revisión y de ser necesario rediseño de los sistemas de seguridad, tomando en cuenta errores de tipo I, y de tipo II.

2.8 Consideraciones de factores que influyen el desempeño del personal en el Diseño

La complejidad en los diseños de sistemas o instalaciones requiere de un incremento en los conocimientos y técnicas necesarias para el personal de mantenimiento. Afortunadamente se han hecho avances significativos en el campo de la ingeniería de mantenibilidad, tales como la aplicación de sensores/diagnósticos y el reemplazo de módulos de componentes.

El costo de mantener un equipo es una función directa de la frecuencia de mantenimiento e intervalo de reparación para el equipo, y los componentes mayores, el tiempo y labor requerida para completar las acciones de mantenimiento no programadas, y el tiempo y labor requerida para completar las tareas de mantenimiento rutinarias. Éstos costos controlan los esfuerzos centrándolos normalmente en optimizar el mantenimiento programado, mientras el personal de mantenimiento, mejora el control de los inventarios de los repuestos, el uso de apoyo de mantenimiento por contrato, y difiriendo el mantenimiento no esencial. Los equipos diseñados para optimar el mantenimiento pueden influir en todos estos esfuerzos positivamente.

La mayoría de los esfuerzos para disminuir la frecuencia y severidad de lesiones a empleados ha enfatizado la mejora en entrenamiento, y procedimientos de

trabajo para el personal, mejorar el ambiente de trabajo y seguridad, y equipo de control medioambiental, mejorando equipo de protección del personal, mejorar diseño de equipo de control y despliegue, y los problemas organizacionales. Es importante que la empresa considere el diseño de equipos teniendo presente los costos de mantenimiento, la facilidad de mantener, y la seguridad para realizar las actividades pertinentes.

2.8.1 Factores Humanos

La ingeniería de factores humanos puede aplicarse a los sistemas de diseño para minimizar el tiempo, y el esfuerzo que exige realizar el mantenimiento preventivo periódico, así como el mantenimiento no programado. También pueden desarrollarse las técnicas de observación de campo para determinar el nivel de esfuerzo exigido para mantener los sistemas existentes e identificar las oportunidades para la mejora del sistema.

Objetivos:

- ❑ Maximizar la eficacia en el desenvolvimiento de las tareas mayores y reducción del tiempo medio para reparar (TMPR).
- ❑ Mejorar la actuación del sistema y su confiabilidad.
- ❑ Mejorar la utilización de herramientas de procesos.
- ❑ Disminuir errores operacionales.
- ❑ Disminuir la tensión en técnicos de mantenimiento.
- ❑ Reducir la fatiga e incidencia de trauma acumulativo.
- ❑ Reducir tiempos y costos en mantenimiento.
- ❑ Desconfiar en los manuales de mantenimiento.

- ❑ Mejorar la gestión SHA a través del uso de alguna herramienta que mejore la Confiabilidad Operacional.

Lineamientos:

- Analizar el diseño existente y apoyar nuevos diseños.
- Considerar en el diseño el acceso para el mantenimiento.
- Proveer el Hardware necesario para facilitar la interacción entre la información y el personal.
- Diseñar un software para ayudar a las interacciones del diagnóstico.
- Diseñar el proceso de trabajo y la herramienta del proceso.
- Evaluar el diseño de procedimientos de montaje y desmontaje.
- Analizar las tareas de mantenimiento y costos.
- Diseñar la lista de control para hacer un seguimiento de las actividades a realizar.
- Diseñar y rediseñar las opciones para mejorar su efectividad.

2.8.2 Principios de Diseño para Mantenibilidad basado en Factores Humanos

Estos tópicos son los siguientes:

- ❑ Considerar la visibilidad en el diseño, para todas las tareas de mantenimiento que requieren la inspección visual, servicio, el ajuste, alineación, la reparación en sitio, o remoción y reemplazo de componentes. Además, considerar la fácil accesibilidad de los puntos de mantenimiento para el mantenedor.

- ❑ El diseño debe considerar la frecuencia de reemplazo de los equipos y elementos mecánicos del mismo para considerar la accesibilidad en actividades de mantenimiento.
- ❑ Utilizar técnicas de detección de fallas, aislamiento de fallas, y restauración del equipo después de la falla.
- ❑ Anotar y anunciar (etiquetar) las actividades de mantenimiento a realizar en los equipos, para evitar la omisión de alguna tarea. La etiquetación es importante en los componentes ya que agiliza las actividades de inspección y mantenimiento. Es importante indicar la dirección de flujo y dirección de giro, y proporcionar otra información que permita tomar una decisión para la realización de una actividad.
- ❑ Diseñar cada interfaz para poder instalar sólo la parte del reemplazo o componente correctamente, usando únicos modelos de cerrojo, pasador guía, u otras características.
- ❑ Diseñar cada interfaz para que se puedan instalar aceptablemente los componentes alternativos sin alguna modificación.
- ❑ Asegurar la reducción suficiente de dispositivos de todos los sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos, y neumáticos para resistir cargas excesivas inesperadas sin fallas, y disminuir el número de fallas. De esta manera se evita la complejidad en los sistemas.
- ❑ Diseñar todos los sistemas y subsistemas para fallar a un modo seguro o a un estado en que el componente o falla del subsistema no produzca un daño adicional o lesión al personal.
- ❑ Diseñar en lo posible todas las tareas de mantenimiento, de manera de, eliminar la necesidad de uso de herramientas especiales.

- ❑ La modularización de componentes reduce el trabajo de suposición de mantenimiento, que a su vez reduce el tiempo fuera de servicio de mantenimiento.
- ❑ Reducir la carga de mantenimiento por mantenedor eliminando o reduciendo la oportunidad para que se presente un error humano.
- ❑ Puesto que los operadores de equipo a veces causan la falla y el daño del equipo, diseñe el equipo para que se pueda operar con sistemas de seguridad, diseñando los sistemas de control operacional para efectuar alguna acción sobre la falla, dispositivos de seguridad de carga excesiva, y otras características preventivas.
- ❑ No diseñar tareas de mantenimiento que obliguen al personal alzar o maniobrar los componentes pesados.
- ❑ Para minimizar el tiempo de reparación, se debe diseñar tareas de reparaciones, alineaciones, y ajustes que no necesiten destruir o quitar los componentes.
- ❑ No localizar los puntos de inspección visual a más de 36 in (91.44 centímetro) desde el punto de ubicación del mantenedor, mientras realiza la inspección. No ubicar los puntos de inspección visual detrás de los componentes, bajo las tapas de protección, o en otros puntos que exigen trabajo localizarlos.

La lista siguiente contiene los problemas de diseño en equipos que son dirigidos para incorporar mantenibilidad en el diseño. Estos son:

- ❑ Problemas de accesibilidad, incapacidad de personal de mantenimiento para acceder al lugar de la falla o a componentes sospechosos para inspeccionar, remover y reemplazarlos. Estos problemas resultan de:
 - ✓ Tamaño inadecuado de la apertura de acceso.

- ✓ Diseño pobre de componentes en un compartimiento, haciendo necesario el levantamiento y reemplazo de partes no afectadas para acceder a las unidades defectuosas.
 - ✓ Incapacidad para acceder a los tornillos de ajustes o conectores, para usar las herramientas requeridas.
 - ✓ Componentes instalados en cavidades interiores inaccesibles.
 - ✓ Ubicación de broches (sujetadores) e interfaces mecánicas dónde no pueden ser localizados físicamente a menos que la máquina sea parcialmente o completamente desmontada.
- ❑ Diseño inadecuado para el mantenimiento rutinario, como la incapacidad de remover y reemplazar rápidamente partes de la carcasa, lubricación rutinaria, y ejecución de inspecciones visuales y físicas.
 - ❑ Capacidad inadecuada de aislamiento de falla, como dificultad en determinar la causa precisa y situación de un fracaso, que alcanza los componentes para hacer las inspecciones visuales y realizar revisiones, limitación de la capacidad de diagnóstico de fallas, ausencia de índices de fallas efectivos.
 - ❑ Incremento de la frecuencia de mantenimiento como resultado del diseño pobre y deficiente colocación de componentes, sujetándolos a daños.
 - ❑ Complejidad del equipo como resultado de un mal diseño, como por ejemplo el apilamiento de componentes en los compartimientos, sin estimación para la necesidad a mantener o reemplazar elementos individuales difíciles de remover y reemplazar.
 - ❑ Alta cantidad de componentes de reemplazos de alta frecuencia como resultado de un diseño deficiente.

2.8.3 Análisis de Riesgos en el Trabajo (ART)

El Análisis de Riesgos en el Trabajo (ART), es una herramienta eficaz para evitar la ocurrencia de accidentes e incidentes, cuando es utilizada según lo establecido en la normativa 98-12 “Elaboración y Evaluación en Campo de los Análisis de Riesgo en el Trabajo”, y se aplica con rigurosidad el Alerta SHA.

A continuación se describe la metodología de Métodos para Resolver Problemas, cuya mayor potencialidad de aplicación está en los problemas rutinarios.

La metodología estructurada de la resolución de problemas está basada en técnicas clásicas de análisis, que consta de tres principios. Estos son: Orden, determinismo y capacidad de descubrir.

- Orden: La clave es encontrar el patrón de cómo ocurrió el problema.
- Determinismo: Está directamente relacionado con orden. Ciertos estímulos generalmente provocan alguna reacción predecible. Siendo este el caso, generalmente se puede determinar qué causó las desviaciones, a través de un estudio de patrones de comportamiento.
- Capacidad de Descubrir: Es simplemente una extensión del determinismo. Haciendo la pregunta de “¿Cómo puede ocurrir el evento?”, se hacen hipótesis y se verifican posibilidades para encontrar la respuesta. Este proceso lleva a preguntas adicionales que atraviesan la jerarquía de descubrimientos que normalmente permiten encontrar las causas raíces.

Esta metodología está fundamentada en el Análisis Causa Raíz (ACR) Directo (realizado por operadores, supervisores, entre otros), y con la utilización del Árbol de Lógica para definir los problemas apropiadamente. Una vez definidos las causas raíces de los problemas se procede a tomar las medidas correctivas y preventivas.

Con la aplicación de esta metodología se busca el mejoramiento de la gestión de mantenimiento e identificar diversos aspectos a ser considerados en el mejoramiento de la gestión de Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA) en los diferentes ámbitos de PDVSA.

Lineamientos:

- Aplicar los lineamientos establecidos en el alerta SHA para revisar y actualizar el ART en la actividad de mantenimiento que se requiere. Las revisiones se pueden hacer a través de la aplicación del árbol lógico de la metodología Causa Raíz.
- Desarrollar planes y estrategias para fomentar y masificar la revisión continua de los ART utilizando la metodología de ACR.

2.9 Puntualizar las estrategias que permitan el desarrollo del recurso humano que participara en el mantenimiento y operación de la instalación

Un buen estudio de criticidad permite potenciar el adiestramiento y desarrollo de habilidades en el personal, dado que se puede diseñar un plan de formación técnica, artesanal y de crecimiento personal, basados en las necesidades reales de la instalación, tomando en cuenta primero las tareas más críticas o de mayor impacto, que es donde se encuentran las mejores oportunidades iniciales de mejora y de agregar el máximo valor.

2.10 Ventajas de Mejorar Mantenibilidad

El propósito de la ingeniería de mantenibilidad es aumentar la eficacia y seguridad para reducir el costo de mantenimiento de equipos y reducir las penalizaciones por indisponibilidad. Para lograr esto, es evidente que los logros de reducciones del costo significantes en el mantenimiento empiecen con mejoras en el diseño de equipos. Aunque la ingeniería de mantenibilidad no eliminará la necesidad para el servicio y reparación en equipos, proporciona las siguientes ventajas:

- ❑ Reducción del tiempo exigido para completar el mantenimiento programado y el mantenimiento no programado.
- ❑ Minimización de la frecuencia de mantenimiento no programado mejorando la accesibilidad para la inspección y reparación.
- ❑ Reducción de errores de mantenimiento e instalaciones incorrectas.
- ❑ Reducción de lesiones relacionadas al mantenimiento.
- ❑ Minimización de requisitos de entrenamientos al personal de mantenimiento.
- ❑ Mejora del desempeño de solucionadores de problemas.

3. Generación del documento “Principios de Confiabilidad

Este documento debe ser actualizado para cada cambio aprobado y debe estructurarse con el cumplimiento de las siguientes acciones o tareas:

- ✓ Definición de los sistemas y subsistemas de la instalación.
- ✓ Entorno operacional de la instalación y subsistemas.
- ✓ Funciones primarias y secundarias (aplicación de principios de Ingeniería de Valor) y analizar los modos y efectos de falla, y sus consecuencias.
- ✓ Cálculo de la disponibilidad inherente y operacional de equipos y sistemas, tomando como base un registro histórico de paros y arranques, documentado con las causas de paro.
- ✓ Confiabilidad de servicios (electricidad, aire de suministro, combustible, etc.)
- ✓ Costo de Ciclo de Vida de la Instalación (LCC).

- ✓ Costo de penalización por impacto en la producción, calidad, seguridad y ambiente por fallas catastróficas de la instalación.
- ✓ Incidencia de la instalación en el brillo/ imagen de la empresa.

Lineamientos de confiabilidad a seguir:

- Definir el alcance del proyecto en la medida en que el mismo avanza. Definiendo modelos de confiabilidad más completos que servirán de soporte al diseño, y a partir del cual se desarrollan estrategias de paradas y de mantenimiento en etapas más avanzadas del proyecto. Estos modelos deben generar estrategias para poder optimizar el uso de herramientas de confiabilidad.
- Realizar diagramas de ubicación de equipos para ir teniendo una mejor idea de la disposición en la instalación, y poder ir optimizando su distribución. Este ejercicio debe ser realizado antes de realizar un análisis de Estudio de Peligros y Operabilidad (HAZOP). Es importante analizar la mantenibilidad.
- Elaborar los alcances con el mismo equipo de trabajo, y siguiendo la misma metodología para obtener el mismo nivel de detalles. Hay que mantener el nivel de consistencia en la elaboración de los alcances para así tener una menor incertidumbre en el trabajo de evaluación, y lograr la mayor confiabilidad posible.

A continuación se presenta una lista de control para cubrir los aspectos de LCC a aplicarse en esta fase.

Lista de Control para la Fase de Conceptualización

Consideraciones Principales

- ¿Son dirigidos y resueltos cualquier aspecto o tópico de LCC antes de la Bases del Diseño (BOD)?

- ¿Se realizan análisis de sistemas, se establecen opciones de equipos y se toman las decisiones pertinentes?
- ¿Se planifica programas de la puesta en marcha y paro de planta?
- ¿Se realiza una evaluación de equipos y designación de datos requeridos para el desempeño?
- ¿Se toma en cuenta el impacto de nuevas tecnologías en la selección de materiales y el desempeño en la fase operacional?
- ¿Se puntualizan los requerimientos funcionales o aspectos de selección de equipos (depende del enfoque de selección)?
- ¿Las consideraciones para el diseño de equipos están provistas de aspectos en base a confiabilidad y mantenibilidad e instrucciones a los Consultores de Ingeniería, en donde se enfaticen aspectos de LCC?
- ¿Se puntualiza los mínimos requerimientos para paquetes de equipos o elementos ha instalar?
- ¿Se acuerdan las pautas para la confiabilidad de equipos basándose en la disponibilidad requerida?
- ¿Se provee las instrucciones sobre estandarización de equipos, incluyendo aspectos significativos dentro de los paquetes de equipos? (Puede tener un impacto significativo en requerimientos de entrenamiento).
- ¿Se define la política de inventario de repuestos?
- ¿Se toma en cuenta la capacidad para inspección y mantenimiento de la organización para mejorar el tiempo de duración de los paros programados?
- ¿Se diseñan programas de mantenimiento programado para evitar paros indeseables (Mantenimiento Preventivo)?

- ¿Se consideran los requerimientos ergonómicos en el diseño de la mantenibilidad?
- ¿Se establece una visión a futuro para los métodos de inspección y mantenimiento, de manera de evitar decisiones sub-optimadas o sobre-estimadas a tomar?
- ¿Se tiene previsto la consideración de implementar técnicas de captura y transferencia electrónica de datos y gráficos a bases de datos, como método para controlar o monitorear los procesos en la instalación, capacidad del equipo, y establecer el mantenimiento basado en la condición real?
- ¿Se cuenta con una lista preliminar de proveedores de confianza?
- ¿Se identificaron las pautas sobre adquisición o procuración de equipos y materiales basándose en LCC?
- ¿Dependiendo de las decisiones tomadas sobre la base del diseño y mantenimiento resultante, se confirmó la validez de las cifras del costo del capital?
- ¿Se realiza una previsión de los medios, recursos e infraestructura para una futura expansión de la instalación?

Consideraciones de Apoyo

- ¿Se Definieron los requerimientos para la dotación y entrenamientos del personal?
- ¿Se realizaron consideraciones para aprovechar los equipos existentes o usados?

FASE DE DEFINICIÓN

Esta Fase tiene por finalidad desarrollar en detalle el alcance y los planes de ejecución de la opción seleccionada durante la fase de Conceptualización, de manera de obtener el financiamiento requerido para ejecutar el proyecto, preparar la documentación que sirva de base para la ingeniería de detalle, la contratación de la ejecución del proyecto y confirmar si el valor esperado del proyecto cumple con los objetivos del negocio.

Objetivos principales que se deben satisfacer:

- Desarrollar el paquete de definición del proyecto.
- Preparar el paquete para autorización del proyecto a través de una estimación de costo Clase 3.
- Establecer el proceso de contratación y el documento de solicitud de ofertas (DSO) a través de un estimado de costo clase 2.

Los alcances que se quieren obtener en esta fase son:

- ✓ Reconfirmación de cifras de costos de capital.
- ✓ Hacer la selección de las opciones de equipos basado en un modelo económico en LCC (ver Capítulo III del Manual).
- ✓ Requerir confiabilidad de equipo.
- ✓ Requerir la eficiencia mecánica de los equipos.
- ✓ Estrategia de mantenimiento e inspección, incluyendo accesibilidad de equipos.
- ✓ Estrategia para la mejora de la disponibilidad.

- ✓ Análisis de Modo y Efectos de Fallas (AMEF), Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), Inspección Basada en Riesgo (IBR), y Análisis Costo Riesgo Beneficio (ACRB) con apoyo en registros obtenidos en plantas similares.
- ✓ Selección de materiales a través de un enfoque que considere la vida útil y frecuencia de inspección.
- ✓ Estandarización de equipos y componentes.
- ✓ Estrategia para la adquisición y uso de paquetes de equipos.
- ✓ Requerimientos para el almacenamiento electrónico y la transferencia de datos y diagramas de equipos en bases de datos.

Aspectos basados en LCC a considerar

En esta fase se utiliza la anteriormente preparada, Bases de Diseño y Paquete de Diseño Básico, las cuales son usadas para llegar a un Diseño Básico y Paquete de Ingeniería (BDEP) o una Especificación de Proyecto (PS). En caso de que se requiera hacer algún cambio global en la forma del contrato se especifica en esta fase. El trabajo para preparar la BDEP o PS es normalmente llevado a cabo por un consultor de ingeniería. Basado en las decisiones tomadas en las fases más tempranas del proyecto, las opciones de equipos son analizadas y seleccionadas. Se deben definir los requerimientos exactos y las expectativas esperadas por parte de los proveedores de equipos para llegar a tener ofertas de equipos comparables.

Acciones de Confiabilidad

- Definir la funcionalidad del proyecto. Una vez seleccionada una opción (en la fase de Conceptualización), se requiere que las definiciones funcionales de todos los sistemas y equipos sean documentadas formalmente en la medida que los

diagramas de tuberías e instrumentación (DIT) sean preparados. Para esto, se debe generar un documento que contenga la siguiente información:

- ✓ Diseño conceptual del sistema.
 - ✓ Lista de funciones primarias y activos asociados (relacionar la funcionalidad de los equipos).
 - ✓ Estudio de disponibilidad de equipos.
 - ✓ Especificación de equipos y tuberías.
 - ✓ Definición funcional de la instrumentación.
 - ✓ Estrategias en sistemas de control operacional basada en los requerimientos para el programa de mantenimiento predictivo.
- Descripción de proceso. Definir las guías de diseño en conjunto al criterio de respaldo de equipos (“spares”) y/o componentes definido previamente (ver Fase de Conceptualización). Esta acción es quizás la de mayor importancia en la aplicación de confiabilidad durante toda la fase de diseño y está estrechamente relacionada con las estrategias de mantenimiento. En esta acción se debe definir el balance entre un diseño robusto y/o diseño sofisticado, un diseño poco robusto de baja inversión y un diseño óptimo basado en confiabilidad. El criterio de respaldo de equipos se define a través del número de componentes, equipos o sistemas redundantes, justificando su aplicación sustentada por la mejora en confiabilidad en los subsistemas, y por ende, en los sistemas de la instalación. La escogencia del diseño debe estar sustentado en el potencial desempeño del mismo definido por los beneficios económicos (valor presente neto), y respaldado por la confiabilidad del mismo.

- Realizar un estudio de potenciales mecanismos de degradación que se pueden activar en la instalación. Los datos de entrada requeridos son los siguientes:
 - ✓ Descripción del proceso
 - ✓ Características de la alimentación y productos a generar.
 - ✓ Diagrama de líneas e instrumentación (P&ID's) y diagrama de flujo de proceso (PFD's).
 - ✓ Balances de masas con las características de las corrientes.
 - ✓ Especificaciones de materiales de cada equipo.

La información de salida de este estudio será la siguiente:

- ✓ Definición de estrategias para mitigar los posibles problemas asociados a estos mecanismos.
 - ✓ Mapa de construcción de materiales.
 - ✓ Posibles mecanismos de degradación y puntos de control para mitigar el impacto de fallas catastróficas.
-
- Concretar en un documento el paquete de las estrategias de mantenimiento a partir de las preestablecidas en la Conceptualización. Se debe generar una política de mantenimiento adecuado buscando minimizar los costos. En este caso, los costos de mantenimiento requerido para alcanzar un cierto nivel de confiabilidad (y por lo tanto seguridad y producción a largo plazo) están asociados a los diferentes modos de falla, el costo por reparar cada evento, y el número de fallas anuales que se puedan presentar. Las estrategias de mantenimiento deben seguir un único lineamiento en función de acciones proactivas, en el cual se desarrolla un programa de mantenimiento preventivo robusto, de manera que permita mitigar gran parte de las fallas potenciales y disminuir el número de eventos que

afecten la disponibilidad del sistema, con el objetivo de minimizar los costos por mantenimiento correctivo. El programa de mantenimiento preventivo debe apoyarse con un programa de mantenimiento predictivo para establecer las actividades y la frecuencia de ejecución en función de la condición en tiempo real de los equipos y/o componentes. El programa de mantenimiento predictivo permite tomar acciones proactivas en frecuencia de ejecución más pertinentes, permitiendo una mejor planificación de la logística (materiales, inventario de repuestos y personal de mantenimiento) y, por ende, minimizando los costos del plan de mantenimiento.

- Realizar Análisis Cuantitativo de Riesgo (ACR) a fin de cuantificar el riesgo de una falla (en los modos de falla es importante incluir fallas humanas) en la instalación basado en la identificación de modos de falla, el cálculo de sus probabilidades y las consecuencias (penalizaciones y costos en mantenimiento correctivo) de una falla.
- Determinar la necesidad de un Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS) y el correspondiente Nivel de Integridad de Seguridad (SIL) de la instalación. Esta acción va orientada a cumplir la meta corporativa de un nivel de riesgo permisible que define el nivel de seguridad de la instalación.
- Actualizar y completar el documento “Principios de Confiabilidad” iniciado en la fase de Conceptualización. El documento se completará con las siguientes acciones o tareas:
 - ✓ Diagrama de decisión y estructurar el plan de mantenimiento sobre la base de tareas predictivas, detectivas y preventivas.
 - ✓ Nivel de Integridad de seguridad del Sistema (SIL).
 - ✓ Nivel de Integridad de seguridad de la Instalación (SIL).
 - ✓ Redundancia del sistema de control, seguridad y de emergencia.

- ✓ Tareas y procedimientos requeridos para extender la vida útil de los equipos.
 - ✓ Tareas y procedimientos para medir la eficiencia operacional de equipos/sistemas.
-
- Realizar un estudio de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) en conjunto al análisis HAZOP. El resultado de este estudio llevará a una recopilación de los modos de falla que podrán esperarse cuando la instalación esté operando. La combinación de ambos estudios, es decir, HAZOP y MCC es lo que se conoce como HAZROP. La combinación de ambos estudios es de mayor efectividad y de mayor eficiencia que realizar los estudios separados.
 - Realizar un análisis de variabilidad o análisis del caso más desfavorable (Monte Carlo, simulación de proceso, etc.). Esto es para verificar si el diseño de la planta puede satisfacer las necesidades del futuro cliente tomando en cuenta las variaciones de las bases que de una u otra forma pudieran afectar el desempeño futuro de la instalación (ambiente, producto de entrada, condiciones del mercado, funcionamiento de las unidades y componentes de la instalación, etc.).
 - Puntualizar para la futura instalación, el nivel de confiabilidad requerido por sistemas, unidades o equipos que la componen definido en la Conceptualización. Esta información es importante para la etapa de ingeniería de detalle ya que permitirá incorporar al equipo o al sistema las características necesarias que permitan lograr el nivel de confiabilidad esperado.
 - Establecer los criterios de inspección y determinar la frecuencia de inspección necesaria para equipos estáticos y rotativos con base a los materiales del equipo y el servicio.

Lineamientos de Confiabilidad

- Antes de comenzar el análisis HAZROP, es necesario tener bien definido el proceso y sus especificaciones. El tiempo “ganado” o ahorrado por un arranque temprano de la actividad HAZROP podría perderse si el proceso y sus especificaciones no están bien definidos.
- Durante el proceso de ejecución de HAZROP es necesario revisar las plantillas genéricas del Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF). En ocasiones se ha sugerido la realización de esta revisión como una actividad separada a fin de apresurar el objetivo del análisis HAZOP. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que se puede perder el beneficio del trabajo de equipo y las oportunidades de mejoras, el cual redundaría en una pérdida de eficiencia en las actividades de HAZOP y de MCC.
- Una vez realizado el HAZROP, se recomienda realizar inmediatamente el Análisis de asignación de Tareas de Mantenimiento dirigidas a eliminar la ocurrencia de fallas en los equipos, sistemas o instalaciones, aprovechando que los integrantes tienen fresca la información. Si se demora en comenzar este paso, la ejecución del análisis será sustancialmente más lento.
- Al identificar estrategias de mantenimiento, es conveniente prever una política de mantenimiento no programado a fin de manejar fallas parciales de la instalación durante periodos de producción programada.
- Las recomendaciones de diseño y las estrategias de mantenimiento deben ser resumidas y presentadas al grupo de diseño (quienes elaborarán la ingeniería de detalle).
- Al identificar las estrategias de mantenimiento y definir las guías de diseño se deben considerar los siguientes aspectos:

- ✓ La instalación debe ser tolerante al menos a las fallas más críticas que se puedan presentar, es decir la instalación debe seguir en operación a pesar de la falla de ciertos equipos o situaciones inesperadas. Si esto no es posible, entonces debe buscarse minimizar en lo posible el tiempo fuera de servicio, particularmente en aquellos equipos o componentes que realicen funciones primarias o de alta criticidad.
- ✓ Minimizar las causas de falla que puedan afectar la confiabilidad de la instalación, particularmente en aquellos equipos considerados como críticos.
- ✓ La instalación debe ser diseñada de manera tal que una falla en un equipo o sistema sea fácilmente detectada/aislada y reparable en corto tiempo. Así la instalación podrá estar en plena operación. Esta consideración lleva a incrementar la disponibilidad de la instalación y se logra considerando la accesibilidad, detección y aislamiento rápido de falla, mantenimiento en línea, facilidad de remoción y reemplazo y reparación con mínimos ajustes.

Estas recomendaciones y tareas evitarán que al final de la ingeniería de detalle, el diseño final sea total o parcialmente sometido a revisión por razones de mantenibilidad, el cual puede llevar a realizar rediseño antes de la fase de construcción. Este rediseño puede llegar a ser costoso en labor y tiempo.

Lista de Control LCC para Fase de Definición (PS o BDEP)

Consideraciones Principales

- ✓ ¿La confiabilidad acordada para los equipos permite cumplir con los objetivos de disponibilidad fijada para el sistema?
- ✓ ¿Se definió la estrategia de mantenimiento e inspección a aplicarse en la fase operacional?

- ✓ ¿Se tomó la previsión de recursos para acortar la duración de las paradas programadas?
- ✓ ¿El criterio para la selección de materiales está en función del tiempo de vida y las frecuencias de inspección establecidas como objetivo?
- ✓ ¿Está previsto la estandarización de equipos y componentes?
- ✓ ¿Se estudio el nivel de inventario de repuestos contra la disponibilidad requerida, y los riesgos económicos asociados?
- ✓ ¿Se desarrolló el mantenimiento programado de equipos y se estimaron los costos involucrados?
- ✓ ¿Se puntualizaron los requerimientos para considerar aspectos de mantenibilidad de unidades o equipos, especialmente paquete equipos?
- ✓ ¿Se tomó la previsión para el uso de herramientas especiales e instrumentación de monitoreo requerida, con un estimado de los costos envueltos?
- ✓ ¿Se enumeraron los aspectos de LCC específicos para seleccionar y adquirir equipos e identificar los controladores de costo (equipos de mayor impacto en los costos del ciclo de vida)?
- ✓ ¿Se tomó la previsión para la adquisición del hardware y software necesarios, para el almacenamiento (registro), en una base de datos electrónica, de la información de mantenimiento y problemas operacionales en la instalación?
- ✓ ¿Se definieron los requerimientos de diseño para transferir datos de campo de los equipos a las bases de datos electrónicas?

- ✓ ¿La selección de equipos se realizó según la conveniencia para facilidad de monitoreo, de manera de poder establecer estrategias de inspección y programa de mantenimiento predictivo acordes con las metas planteadas?

Consideraciones de Apoyo

- ✓ ¿Se identificaron los requerimientos para entrenamiento del personal?
- ✓ ¿La evaluación de las ofertas de equipos principales y los controladores de costos se realiza a través de un criterio basado en LCC?
- ✓ ¿Las ofertas de los proveedores precalificados se evalúan a través una matriz basada en el costo del ciclo de vida, valor presente neto y la confiabilidad del equipo?

FASE DE IMPLEMENTACIÓN

En esta fase se desarrolla la ingeniería de detalle, procura y construcción a lo largo de lineamientos dados a través de pautas e instrucciones provistas en las etapas previas del proyecto. En esta fase también aplica el enfoque de LCC. Los documentos detallados y diagramas producidos en esta etapa por el consultor de ingeniería, deberían adelantarse a una procuración y construcción, para lo cual los costos del ciclo de vida durante la fase operacional son minimizados. Después de la recaudación y evaluación de ofertas, se seleccionan los equipos. Con tal que, las condiciones para optimizar LCC hayan sido creadas en las fases previas, las restantes actividades a ser direccionadas por el consultor de ingeniería durante la ingeniería y adquisición en general serán de menor naturaleza, y mayor detalle.

Los alcances a ser cubiertos en esta fase son:

- ✓ Seguir con los lineamientos establecidos en los objetivos globales del proyecto para permanecer dentro de los límites del capex establecidos.

- ✓ Revisión final de la accesibilidad e información por parte del proveedor para construir algún componente del equipo (capacidad para realizar mantenimiento mayor).
- ✓ Adquisición basada en criterio de LCC establecido.
- ✓ Adquisición de los manuales de operación y mantenimiento, en formato electrónico.
- ✓ Puntualizar la necesidad de entrenamientos al personal.
- ✓ Accesibilidad a la documentación y datos de los proveedores.
- ✓ Evidencia que la estrategia basada en LCC establecida en la Fase de Definición haya sido aplicada.

A continuación se presenta una lista de control sobre relaciones de asunto para esta fase.

Lista de Control LCC para Fase de Implementación

Ver también lista de control para Fase de Definición.

Consideraciones Principales

- ✓ ¿Se prevee el fácil acceso y la recuperación de la información guardada electrónicamente, documentación y gráficos o diagramas a través de una base de datos?
- ✓ ¿Se realizó un chequeo final en accesibilidad a las unidades y/o equipos?
- ✓ ¿Se realizó un chequeo final en los requerimientos de mantenibilidad y la capacidad operativa a través revisiones?
- ✓ ¿Se especificaron las actividades de mantenimiento, en caso que no se identificaron en las etapas previas?

- ✓ ¿Se discutió acerca de la efectividad de los medios móviles para permitir el acceso en aquellas zonas con dificultad para ello?
- ✓ ¿Se aplicaron los procedimientos de calidad en la seguridad?
- ✓ ¿Se estableció el mantenimiento e inspección programados en línea?
- ✓ ¿Se realizó un estudio de la necesidad de almacenamiento de materiales, herramientas y repuestos de alta frecuencia de utilidad?
- ✓ ¿Se hizo la previsión para adquirir los manuales de operación?
- ✓ ¿Se hizo la previsión para adquirir manuales de mantenimiento e instrucciones?
- ✓ ¿Se estudiaron los requerimientos de entrenamiento del personal?

Consideraciones de Apoyo

- ✓ ¿Se calificaron los proveedores conservando el criterio en LCC?
- ✓ ¿La evaluación de ofertas se basó en el LCC, VPN y confiabilidad necesaria para cumplir con los requerimientos de disponibilidad en los equipos?
- ✓ ¿La adquisición o procuración de equipos se realiza sobre la base del LCC?

FASE DE OPERACIÓN

En esta fase la instalación es puesta en marcha para ponerla a producir y generar los ingresos al negocio, y por ende, ganancia. Esta etapa comprende la más larga de todas (20 o más años) en el ciclo total de vida del proyecto. En esta etapa se reflejan todas las estrategias tomadas en el diseño para optimar la rentabilidad de la instalación; buscando siempre costos mínimos posibles de operación y mantenimiento según lo permita el diseño y la aplicación de las mejores prácticas, al mejor balance entre capex y opex.

Durante la fase de operación la instalación es utilizada para maximizar el retorno sobre la inversión, dentro de técnicas, el mejor desempeño en las actividades de operación y mantenimiento, y a la mayor seguridad posible. Durante esta fase los métodos del negocio para mejoramiento de las instalaciones se llevan a cabo para superar el diseño o limitaciones del equipo, para mejorar rentabilidad y atender a circunstancias cambiantes tales como demanda del mercado, competencia y legislación.

El análisis del LCC debe ser aplicado cuando se realizan cualquier cambio significativo. Esto podría aplicarse igualmente a decisiones sobre procesos de negocios y cambios organizacionales.

Los alcances a obtener en esta fase son los siguientes:

- Identificación de principales controladores de costos e ingresos.
- Estrategias de inspección y mantenimiento.
- Política de paros.
- Desarrollo de procedimientos de operación y mantenimiento.
- Política de estandarización.
- Pautas para mantenibilidad.
- Pautas para capacitación del personal.
- Priorización de uso del tiempo del personal.
- Mejoramiento del desempeño económico de equipos.
- Balance del uso de procedimientos y métodos de mejora contra capex para diseñar fuera de problemas.

- Concertar esfuerzos para registrar las mejoras obtenidas por configuraciones de subsistemas, y las pérdidas de eficiencia e ingresos en base de datos electrónicas.
- Optimización de un programa que minimice los problemas recurrentes de alto riesgo contra los costos en las acciones de mantenimiento para mitigarlo a largo plazo.
- Determinación de la obsolescencia de equipos.
- Comparación entre el desempeño de los equipos existentes y equipos nuevos candidatos a reemplazarlos.
- Maximización del balance entre obtener la mayor producción de la instalación contra la reducción de la vida útil del equipo por deterioro.

A continuación se presenta una lista de control sobre aspectos en LCC para el seguimiento de esta fase.

Lista de Control para la Fase de Operación

Debido a que la fase operacional también cubre las fases anteriores del proyecto, las listas de control previas deberían también ser exploradas para darle relevancia. Ahora mostraremos algunas áreas claves.

- ✓ ¿Los procedimientos del Proyecto incluyendo la declaración que los proyectos deben ser aprobados y diseñados basándose en el LCC están cumpliendo con este aspecto?
- ✓ ¿Se identifican los mayores controladores de costos e ingresos?
- ✓ ¿Se establecen las estrategias de inspección y mantenimiento?
- ✓ ¿Se puntualizaron los requerimientos de mantenibilidad y capacidad operativa de la instalación?

- ✓ ¿Se definieron las políticas de paros programados?
- ✓ ¿Se desarrollaron procedimientos o métodos de puesta en marcha?
- ✓ ¿Se estableció la política de estandarización?
- ✓ ¿Se describieron las pautas para el entrenamiento del personal?
- ✓ ¿Se realizó la aprobación para empresas de ingenierías contractuales y proveedores?
- ✓ ¿Se definió el tiempo de vida de los equipos y la instalación?
- ✓ ¿Se dispone de la cifra de costo del capital?
- ✓ ¿Se tomaron en cuenta la capacidad en los sistemas computacionales existentes en la empresa?
- ✓ ¿Se cuenta con una base de datos de costos para equipos, áreas de los mayores problemas que se presentan en una instalación, y desempeño de los mismos?
- ✓ ¿Los procedimientos y actividades desarrollados en esta fase se rigen según los lineamientos de la política de Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA) y lineamientos gerenciales de dirección futura?
- ✓ ¿Se consideran aspectos relacionados con el ambiente externo que envuelve al negocio, tales como: futura legislación, presiones competitivas, demanda del mercado, etc.?

FASE DE DESINCORPORACIÓN

Cuando una instalación ha alcanzado su vida útil o vida comercial, esto normalmente será esencial para tomar medidas para recuperar el sitio a un estado aceptable por las autoridades, la empresa y los empleados.

Se debe realizar una evaluación durante la fase del proyecto (Preparación del Diseño y Diseño Básico) del cumplimiento de los lineamientos exigidos por SHA que afectara a la fase de desincorporación. Realizar las debidas provisiones financieras y legales necesarias para cubrir pasivos futuros. El análisis de LCC puede ser aplicado para considerar opciones que permitan reducir futuras responsabilidades y costos contra capex inicial. La consideración de la fase de desincorporación durante el diseño del proyecto puede ayudar a conseguir la aprobación del proyecto por las autoridades locales, tan bien, como la buena percepción pública de su estructura.

Entre los alcances que se buscan en esta fase son:

- ✓ Política de desincorporación.
- ✓ Edición del mantenimiento y operación.

FASE DE ADQUISICIÓN

La adquisición basada en LCC proporciona un potencial incremento de la rentabilidad tanto para vendedor como cliente, pero esta es un área donde LCC es menos aplicado. Se requiere dar mayor información al proveedor sobre la necesidad en funcionalidad del equipo, y cómo los beneficios incrementarían para el cliente.

Los objetivos de esta fase basados en LCC son:

- ✓ Evaluación de las soluciones ofrecidas por el proveedor basado en el valor agregado.
- ✓ Perspectiva, evaluación del proveedor, y selección de la mejor solución ofertada.
- ✓ Perspectiva y habilitación por parte del cliente al proveedor, a ofrecer una solución basada en su rango de opciones que darán el valor más alto.

Por lo general, el enfoque es en la propuesta de evaluación. Se requiere más esfuerzo para mejorar las relaciones de retroalimentación entre el cliente y los

proveedores, de manera de poder incrementar valor en los equipos ofertados. La comunicación entre ambos es vital para lograr el mejor resultado en LCC.

Los aspectos a considerar para la adquisición de equipos en esta fase son los siguientes:

- ✓ Consumo de energía.
- ✓ Capacidad operativa o de producción.
- ✓ Configuración.
- ✓ Características de diseño que impacta la generación de ingresos y/o opex (frecuencia de fallas).
- ✓ Mantenibilidad y costos.
- ✓ Confiabilidad y disponibilidad.
- ✓ Eficiencia.
- ✓ Características de la implementación tales como: tiempo, facilidad, costos, etc.
- ✓ Costos de repuestos.
- ✓ Niveles de experticia que requiere el personal.
- ✓ Requerimientos de entrenamiento para la operación.
- ✓ Costo global de propiedad.

La siguiente lista de control permite evaluar el cumplimiento de los aspectos relacionados con LCC.

Lista de Control LCC para Fase de Adquisición

- ✓ ¿Se cuenta con alguna técnica de integración y evaluación comercial?

- ✓ ¿Si no se cuenta con alguna técnica se desarrolló alguna técnica para realizar las evaluaciones comerciales a los equipos?
- ✓ ¿Se enfocaron los controladores de costos y los elementos concernientes para la evaluación comercial?
- ✓ ¿Se cuenta con una base de datos sobre el costo del ciclo de vida para asistir la evaluación de procesos?
- ✓ ¿Los proveedores dan suficiente tiempo e información para evaluar sus ofertas?

Es importante tener en cuenta capacidades y planes de producción.

El criterio de evaluación se debe fundamentar en el tiempo de vida y tomar en cuenta el balance de los costos de operación y mantenimiento contra la inversión.

Entre los parámetros de costos es importante considerar consumo de energía, penalizaciones por tiempo fuera de servicio y penalizaciones por pérdida de eficiencia.

- ✓ ¿Se prevee la capacidad de apoyo por parte del proveedor?
- ✓ ¿Se considera la previa experiencia del proveedor y el consultor de ingeniería?
- ✓ ¿La calificación del proveedor se realiza a través del criterio de LCC?
- ✓ ¿Se establecieron los requerimientos de entrenamiento para el personal?
- ✓ ¿Se establecieron los requerimientos en repuestos, frecuencias de utilización y sus respectivos costos?
- ✓ ¿Se tiene prevista la estandarización de repuestos dentro de los límites del mismo proveedor?

Evaluación y Mejoramientos (Reformas)

En cada etapa de los procesos la persona responsable por la aplicación de LCC revisará su actual ejecución para identificar la fortaleza y debilidades del proceso. Los ahorros obtenidos en LCC por revisiones de opciones junto con el impacto capex, deberían ser registrados para fomentar una mayor evidencia en beneficios. Esto apoyará ambos proyectos futuros y generará evidencia para mostrar a los clientes que tenemos las técnicas profesionales para apoyar el costo del ciclo de vida.

ANEXO A-2

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA LA REESTRUCTURACIÓN DE UNA INSTALACIÓN (2^{do} Caso)

CAPÍTULO II

REESTRUCTURACIÓN DE INSTALACIONES (2^{do} Caso)

En este capítulo se presenta un procedimiento propuesto para reestructurar una instalación, considerando los índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad para caracterizar la actuación del activo. Esta metodología se diseñó con el objetivo de optimizar el desempeño de una instalación a través de la optimización de los subsistemas que la conforman. Esto se logra al maximizar la utilización del activo aumentando su disponibilidad, la cual se conseguirá a través de un análisis de la configuración del sistema, tomando en cuenta parámetros de diseños para confiabilidad y mantenibilidad, como son: redundancia, confiabilidad de elementos de los subsistemas, efectividad en el mantenimiento, costos de mantenimientos, facilidad para el mantenimiento, disponibilidad de recursos, etc. Y de esta manera cumplir con la meta de disponibilidad requerida para el sistema.

Lineamientos en confiabilidad:

1. Seleccionar la instalación con que se va a trabajar.
2. Ubicar los planos de proceso de la instalación e identificar los sistemas reales en dichos planos.
3. Realizar el árbol de fallas de los sistemas tomando en cuenta los siguientes niveles:
 - N0: Evento tope.
 - N1: Sistemas seleccionados.
 - N2: Subsistemas.
 - N3: Componentes.
 - N4: Causas.

4. Investigar en el historial de fallas de la instalación seleccionada lo siguiente:
 - Recolectar todas las fallas que produjeron indisponibilidad en el sistema.
 - Identificar el sistema al cual pertenece cada falla.
 - Identificar el subsistema al cual pertenece cada falla.
 - Identificar el componente al que pertenece cada falla.
 - Asignar según el tipo y sistema un código a cada falla.
5. Determinar la duración de cada falla en horas (TMEF).
6. Determinar el tiempo operativo para cada componente que forma parte de los subsistemas.
7. Identificar el costo asociado para reparar cada falla. Para que el estudio sea más completo o detallado es recomendable identificar los modos de fallas, obtener el tiempo operativo de cada componente por modo de falla, el tiempo fuera de servicio por modo de falla, y el costo por reparar cada modo de falla.
8. Evaluar la instalación con los datos del tiempo operativo, los tiempos para reparar, y los costos de reparación conseguidos previamente. Para ello estos datos se introducen en un software que permita caracterizar la misma en cuanto a: probabilidad de falla, disponibilidad del sistema, indisponibilidad total, frecuencia de mantenimiento, tiempo medio para mantenimiento correctivo, costos de mantenimiento, número de fallas del sistema para el tiempo a evaluar, etc. Este software debe trabajar con distribuciones probabilísticas, de manera de considerar la incertidumbre asociada a los diversos factores que afectan el desempeño de los equipos, las actividades operacionales, y las actividades de mantenimiento.
9. Una vez que se tiene la evaluación de la instalación, se tomarán los subsistemas de mayor impacto (riesgos) en la instalación, desde el punto de vista de mayor

número de fallas, indisponibilidad, costos de operación, costo de mantenimiento y penalizaciones. Para lograr esto, se recomienda aplicar la metodología de criticidad para priorizar los subsistemas y tomar los de mayor impacto, de manera que se representen los de mayor impacto para la instalación.

10. Luego de haber elegido los subsistemas con que se van a trabajar, procedemos a establecer las configuraciones que sean posibles y se evalúa su confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y costos de mantenimiento para cada una de las opciones generadas. Las opciones generadas deben cumplir en todo momento con su función dentro del sistema, sin cambiar las condiciones operacionales, pero considerando el mejoramiento de la actuación de los equipos o dispositivos a través de su confiabilidad. Para reestructurar la instalación se puede realizar principalmente a través de tres escenarios. En el primer, escenario se puede plantear una mejora de la instalación a través de redundancia en los subsistemas con mayores problemas. En el segundo escenario, se puede plantear una mejora de la instalación mejorando la confiabilidad de los equipos con mayor probabilidad de fallas. Y en el tercer escenario, se puede realizar una mejora en el sistema a través de una combinación de los dos escenarios anteriores.
11. Una vez generadas las diferentes opciones posibles, se procederá a elegir la opción que mejor se desempeñe según los criterios de evaluación ya establecidos (índices de desempeño), y la que represente los mayores beneficios en el valor presente neto al menor costo del ciclo de vida. Para lograr esto, se probará la opción seleccionada simulando su comportamiento, y cuantificando los beneficios económicos aportados al sistema total en su ciclo de vida o para el período de estudio.
12. Dar las recomendaciones para el mejoramiento del sistema según la opción seleccionada, y tomando en cuenta los recursos disponibles para plantear la mejor logística.

En la figura 35 se muestra un diagrama que sintetiza la metodología propuesta para la reestructuración de instalaciones.

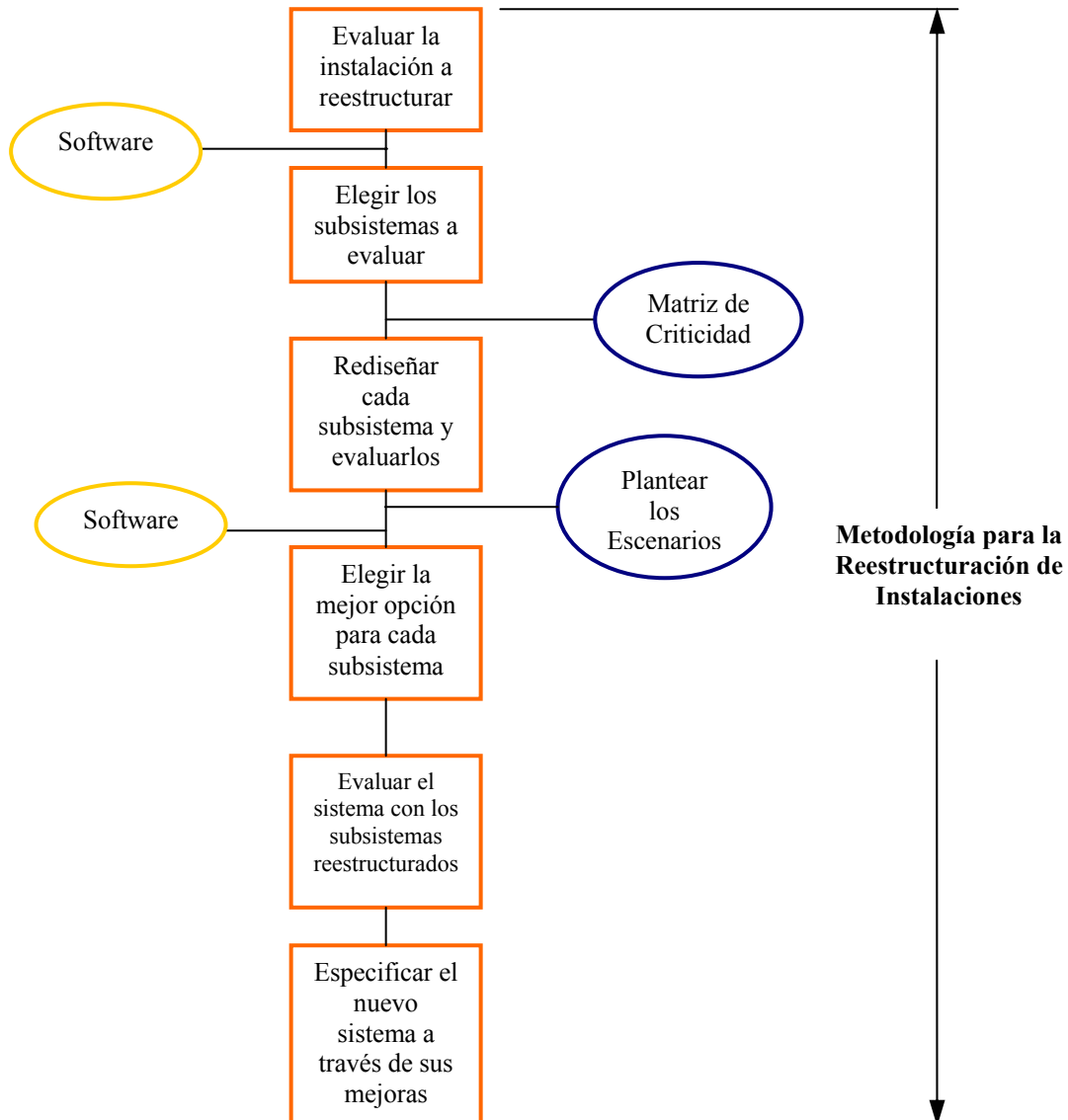


Fig. 35.- Metodología para la reestructuración de instalaciones.

Parámetros para caracterizar los subsistemas:**Disponibilidad Operacional**

$$A_o = \frac{\text{Tiempo de Servicio del Sistema}}{\text{Tiempo Total}}$$

Tiempo medio de indisponibilidad

$$TMFS = \frac{\text{Tiempo Fuera de Servicio del Sistema}}{\# \text{ de Eventos para el Fuera de Servicio}} \quad \text{ó} \quad MDT = 1 - A_o$$

Tiempo medio entre eventos para el fuera de servicio

$$TMEE = \frac{\text{Tiempo de Servicio del Sistema}}{\# \text{ de Eventos para el Fuera de Servicio}}$$

Función de Confiabilidad

$R(t) = e^{-t/M} = e^{-\lambda \cdot t}$, donde M es el tiempo medio entre falla (TMEF) y λ es la tasa de falla.

$$\lambda = \frac{\# \text{ de Fallas}}{\text{Horas totales de operación}}$$

Tiempo medio entre mantenimientos

$$TMEM = \frac{\text{Tiempo de Servicio del Sistema}}{\# \text{ de Tareas de Mantenimiento}}$$

Tiempo medio para mantenimiento correctivo

$$\overline{Mct} = \frac{\text{Tiempo Total para Reparar}}{\# \text{ de Reparaciones}}$$

ANEXO A-3

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE REEMPLAZOS (PARCIALES/TOTALES) DE EQUIPOS (3^{er} CASO)

CAPITULO III

OPTIMIZACIÓN DE REEMPLAZOS (PARCIALES/TOTALES) DE EQUIPOS (3^{er} CASO)

En el siguiente capítulo se muestra una propuesta de procedimientos que permite optimizar la selección y reemplazo de equipos en instalaciones. Este procedimiento es fundamentado en las bases teóricas de Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad y Costo del Ciclo de Vida que se describió en los capítulos previos de este trabajo. En la figura 36 se muestra un diagrama de proceso que describe el procedimiento propuesto.

El diagrama que se muestra en esta figura describe el fundamento del capítulo, cuyas bases se sustentan en aspectos de desempeño del equipo; definidos como los bajos costos de operación y la facilidad de mantener (mantenibilidad), caracterizada por los bajos costos relativos de mantenimiento correctivo, y los beneficios económicos obtenidos, calculados a través del valor presente neto (VPN) a lo largo de su ciclo de vida, que son inherentes al buen desempeño en el servicio (producción) como resultado de su confiabilidad.

El objetivo principal es mejorar el proceso de selección y reemplazos de equipos, con la finalidad de mejorar la disponibilidad de la instalación, y evitar redundancia excesiva. Este procedimiento se desarrolló de manera general para que sea aplicado en todas las instalaciones existentes del área de producción y refinación, de manera de mejorar el desempeño de estas instalaciones al complementar la metodología descrita en el capítulo II. El capítulo I cubre las necesidades para el desarrollo de instalaciones nuevas donde se describen los procedimientos para obtener un diseño confiable, de cualquier instalación, y un ciclo de vida más rentable para el negocio.

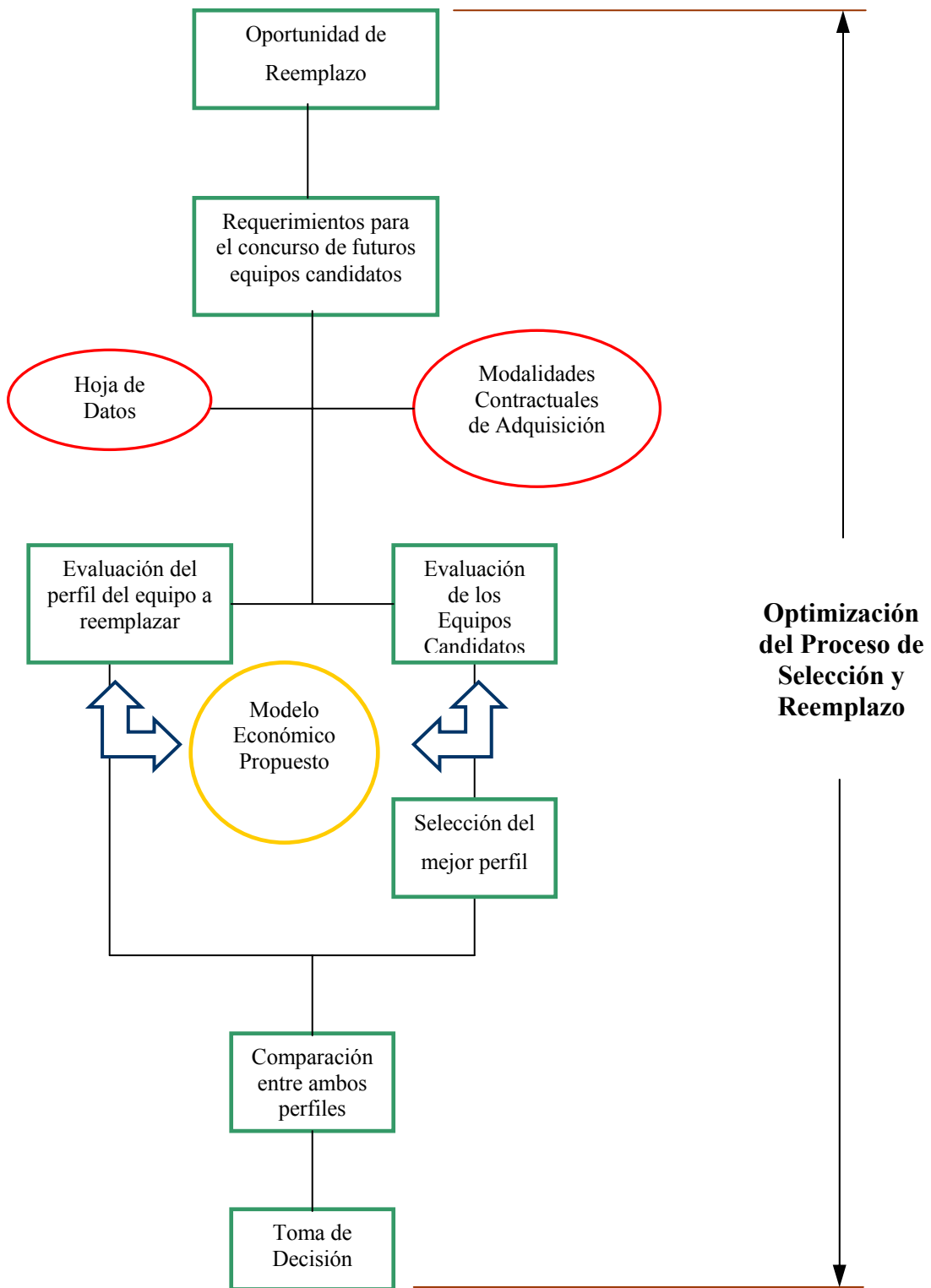


Fig. 36.- Metodología para la optimización de selección/reemplazo de equipos.

1. Evaluar las oportunidades de reemplazo según las siguientes premisas:

- ✓ Obsolescencia técnica y económica.
- ✓ Cambios en las condiciones operacionales.
- ✓ Costos elevados de operación y mantenimiento.
- ✓ Aspectos de logísticas.
- ✓ Bajos índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

2. Selección de las alternativas de equipos a adquirir para elegir el sustituto del equipo a reemplazar.**2.1 Modalidades Contractuales de Adquisición**

- Al adquirir un equipo o sistema de equipos deberán tenerse en cuenta ciertas disposiciones contractuales que garanticen que el equipo que se adquiere conforma las especificaciones y condiciones de posesión deseadas, a un costo inicial razonable. Las disposiciones contractuales más frecuentes son como sigue:
- Se debe tomar en cuenta la confiabilidad del equipo o sistema de equipos expresada como tiempo promedio operativo (TPO), esperado para el sistema o para sus partes.
- El tiempo promedio para la reparación (TPPR) demostrado por el fabricante sobre la base de experiencia previa con equipos similares, o con los recursos del comprador bajo las condiciones contractuales fijadas de mutuo acuerdo con el vendedor.
- La disponibilidad del equipo o sistema de equipos, especificada bajo las condiciones de funcionamiento, y consecuente con las especificaciones del TMEF y el TPPR dadas por el fabricante.

- Las condiciones de mantenimiento claramente establecidas de mutuo acuerdo entre vendedor y comprador.
- La documentación suplida con el bien adquirido, incluyendo:
 - ✓ Especificaciones básicas de conjunto y de componentes.
 - ✓ Planos básicos y de detalle.
 - ✓ Manuales de operación, y manuales de mantenimiento.
- La documentación es completa si permite la operación, mantenimiento y si fuera necesario la construcción de cualquier parte del equipo (Mantenimiento Mayor).
- Listas de repuestos básicos indispensables en planta, tiempo de entrega bajo pedido y el lapso de tiempo durante el cual se garantiza la entrega de repuestos.
- El adiestramiento del personal del comprador por parte del vendedor. El vendedor deberá establecer el perfil del personal técnico que el propietario deberá contratar, y el entrenamiento que recibirán por parte del vendedor.
- El nivel de asesoramiento y capacidad de intervención que el comprador puede esperar del vendedor, en caso de ser requerida su intervención.
- Las condiciones de servicio o producción esperadas del bien. Establecidas mediante contrato de satisfacción de condiciones contra indemnización mutua (al fabricante o vendedor por exceder los valores previstos, al comprador por no cumplir los valores esperados). Deberá establecerse en detalle cual será el método o modelo de verificación de cada condición de servicio que se especifique.
- Establecer comités de verificación. Con el fin de validar la calidad y cumplimiento de las especificaciones suelen establecerse comités de verificación, integrados por representantes del vendedor y del comprador con el

arbitraje de un experto o grupo de expertos, que actúan como observadores e intervienen solamente en caso de desavenencia.

- En casos de adquisiciones de equipos con características de paquete cerrado o semi-abierto, el contrato de adquisición (si lo hay) suele tener las características de un contrato de adhesión que el vendedor presenta al comprador. En estos casos el comprador quedará limitado exclusivamente a la oferta del mercado y al amparo que legalmente le corresponda de acuerdo a la legislación vigente. El comprador deberá tener especial cuidado en verificar las especificaciones del equipo y las condiciones de garantía, de tal forma que no surjan dudas a la hora de hacer un reclamo, entre otras:
 - ✓ Duración de la garantía (en horas de servicio a partir de la fecha de arranque, duración a término a partir de la fecha de adquisición).
 - ✓ Limitaciones de la garantía: Sustitución total del bien, reparación de componentes, ambos.
 - ✓ Anomalías no cubiertas por la garantía (sabotaje, envejecimiento prematuro por condiciones del ambiente no reconocidas por el vendedor, etc).

2.2 Hoja de Datos para los Requisitos a Cumplir

a) Requerimientos de datos para confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad

- .- Confiabilidad dada a través del tiempo promedio operativo (TPO).
- .- La Mantenibilidad dada en función de los tiempos promedio para reparar (TPPR).
- .- La Disponibilidad intrínseca calculada con el tiempo promedio operativo y el tiempo promedio para reparar.

b) Establecer las Condiciones Operacionales

En este punto el fabricante deberá indicar si el equipo cumple con las especificaciones operacionales requeridas por el comprador.

c) Dimensiones y Peso

El vendedor o fabricante suministrará los datos de dimensiones y peso, que luego serán evaluados por el comprador según las limitaciones de espacio y los requerimientos para el transporte.

d) Accesorios

Se debe detallar todos los accesorios que posee el equipo dado por el vendedor.

e) Capacidad de Control y Sistemas de Detección de Fallas

El vendedor deberá describir la tecnología del equipo dada a través de la capacidad de control y sistemas de detección de fallas, de manera que el comprador evalúe según sus necesidades para la operación y mantenimiento del equipo. El comprador debe tener claro el impacto del equipo en la instalación, para poder establecer estrategias de monitoreo y mantenimiento, de manera que surjan los requerimientos en capacidad de control y sistemas de detección de fallas.

3.- Evaluación del equipo existente y los candidatos a reemplazarlos**3.1.- Modelo Económico Propuesto****Entrada del Modelo**

- Factores Económicos a considerar en el estudio:
 - ✓ Tasa de retorno promedio anual sobre el capital que busca la empresa para N años.

- ✓ Tasa de Inflación promedio anual para N años.
- ✓ Tasa de descuento calculada en función de la tasa de retorno y la tasa de inflación.
- ✓ Estimado del Tiempo de Vida restante.
- Capital inicial (diseño, desarrollo, adquisición, instalación, herramientas, repuestos de aseguramiento, desincorporación, entrenamiento del personal, manuales, etc.).
- Costo por Operación:
 - ✓ Labor de operación anual.
 - ✓ Consumo de energía anual.
 - ✓ Consumo de combustible anual (opcional).
- Costo de Mantenimiento:

Mantenimiento Preventivo:

Especificar el costo asociado a cada nivel de mantenimiento. Para cada nivel se va solicitar lo siguiente:

- ✓ Mano de Obra.
- ✓ Repuestos.
- ✓ Almacenamiento.
- ✓ Materiales.

El Nivel V de mantenimiento Preventivo corresponde a reparación mayor.

Mantenimiento Correctivo:

Para evaluar el mantenimiento correctivo se realiza por cada modo de falla. Cada uno de estos eventos o modos van a tener asociado un costo que se dividen en lo siguiente:

- ✓ Mano de Obra.
 - ✓ Apoyo logístico.
 - ✓ Repuestos.
 - ✓ Almacenamiento.
 - ✓ Materiales.
- Costo de penalización por indisponibilidad.

Las penalizaciones se van a asociar para cada modo de falla. De esta manera, se puede conocer el modo o evento que impacta más en la indisponibilidad.

- Costo de penalización por pérdida de eficiencia.
- Costo de desincorporación.

Salida del Modelo:

- ✓ Costo del Ciclo de Vida (Salida de caja).
- ✓ Costo Anual Equivalente (CAE).
- ✓ Valor Presente Neto (VPN).

3.2.- Ecuaciones a utilizar en el Análisis.

.- Flujo de Caja (FC):

$$FC_i = (GN_i - (CA_i + CD_i + COM_i + CMM_i + PPE_i + PMF_i))^i$$

.- Valor Presente Neto (VPN):

$$VPN_n = \sum_{i=0}^n (GN_i - (CA_i + CD_i + COM_i + CMM_i + PPE_i + PMF_i)) \cdot \left(\frac{1+p}{1+m} \right)^i$$

.- Costo Anual Equivalente (CAE):

$$CAE_n = \sum_{i=0}^n \left(\frac{CA + CD + COM + CMM + PPE + PMF}{n} \right) \cdot \left(\frac{1+p}{1+m} \right)^i$$

Donde:

- CA = Costo de Adquisición del Activo.
- CD = Costo de Desincorporación.
- COM = Costo de Operación y Mantenimiento anual para el año i.
- CMM = Costo de Mantenimiento Mayor para el año i.
- PPE = Penalización por Pérdida de Eficiencia.
- PMF = Penalización por Modo de Falla.
- p = Promedio anual de la tasa de inflación para N años.
- m = Tasa promedio de retorno sobre el capital esperada para el proyecto en N años.

3.- Selección de la mejor opción a través de una matriz de evaluación técnica

La selección se realiza a través de una matriz que permite evaluar todos los aspectos tomados en cuenta anteriormente, y compararlos para tomar la decisión de selección.

3.1.- Criterios:

Los criterios que se tomarán en cuenta para la evaluación de los equipos se describen a continuación:

- a) **Requisitos de Adquisición:** revisión de las modalidades contractuales de adquisición, para ver si las disposiciones ofrecidas por el vendedor conforman las especificaciones y condiciones de posesión deseadas, a un costo inicial razonable.
- b) **Costo Anual Equivalente:** comportamiento de los costos anuales del equipo, los cuales dependerán en gran medida de los eventos más probables que causan indisponibilidad, y de los tiempos operativos y reparación por estos eventos (demostrado por el fabricante sobre la base de experiencia previa con equipos similares). Estos eventos también incurren en el mantenimiento correctivo, asociando el costo por reparar cada evento. Luego se debe considerar la penalización por pérdida de eficiencia que se puede asumir promedio para el ciclo de vida, y así hasta considerar todos los costos que forman parte del capex y opex.
- c) **Valor Presente Neto:** beneficios que se obtendrían a lo largo del ciclo de vida del activo. Los beneficios del equipo dependerán del flujo de caja que resulta de cada año. Si el equipo en algún momento tiene un flujo de caja negativo, entonces se infiere que el equipo ha decaído fuertemente en su desempeño.

3.2.- Sistema de evaluación

Cada uno de los criterios descritos anteriormente se evaluará según una escala de 0 a 10 puntos, de acuerdo a la siguiente escala:

- 10 puntos: el equipo posee el mayor nivel que se pueda conseguir en el mercado.
- 7 puntos: el equipo está por encima de los requerimientos mínimos exigidos por el comprador o cliente, pero no llega a alcanzar el máximo nivel.
- 5 puntos: el equipo cumple con los requisitos mínimos establecidos.
- 3 puntos: el equipo no cumple con los requisitos mínimos exigidos por el cliente.
- 0 puntos: el equipo no satisface las expectativas dadas en los requisitos.

3.3.- Matriz de evaluación:

	Requisitos Adquisición	Costo Anual Equivalente (CAE)	Valor Presente Neto (VPN)	Σ (Total)
Equipo existente				
Opción A				
Opción B				
Opción C				

3.4.- Procedimiento:

Para aplicar la metodología se empieza por seleccionar una lista de proveedores confiables, y se exponen los requisitos que deben cumplir para participar en el proceso de licitación. Una vez hecho esto, se evalúan los aspectos que se toman en cuenta en la matriz como son: Requisitos de adquisición (contrato y hoja de datos), costo anual equivalente, y valor presente neto. Para la evaluación del costo anual equivalente y el valor presente neto, se realiza a través del programa ECCVA, el cual se encuentra fundamentado en el modelo económico. Se le da el puntaje correspondiente a cada renglón según el resultado de la evaluación. Luego se elige el mejor perfil y se justifica el porque de su selección, y se indican las deficiencias si las hay. En todo momento hay que comparar el perfil de los equipos concursantes con el que se desea reemplazar, para determinar si existe mejora en cuanto a tecnología, desempeño (confiabilidad), beneficios económicos, etc., de manera de justificar la realización de esta actividad y asegurar que haya innovación.

ANEXO B

INFORME DE EVALUACIÓN DE LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN DEL CENTRO DE REFINACIÓN PARAGUANÁ

UNIDAD DE ALQUILACIÓN

(Informe de evaluación y reestructuración)

Función de la unidad de alquilación

La unidad de alquilación tiene por función producir alquilato para darle octanaje a la gasolina. Esto se logra a través de la reacción de alquilación, que consiste en mezclar olefinas con isoparafinas, en este caso se usa isobutano, en presencia de ácido fluorhídrico o sulfúrico (catalizadores). Existen variables en el proceso que al ser controladas adecuadamente permiten obtener un número alto de octano, estas variables son: temperatura de reacción, fuerza del ácido, concentración de isobutano y velocidad espacial de la olefina. Entre los productos de la alquilación además del alquilato tenemos propano líquido, butano normal líquido y asfaltos.

Descripción del RAPTOR

El RAPTOR es un programa para simular a través de Monte Carlo sistemas, en donde se pueden caracterizar eventos, redundancia, análisis de costos, estrategia de reemplazo, buen control de las simulaciones, etc. Provee una interfase gráfica para su fácil uso, en donde permite la creación de modelos en forma de diagramas de bloques de confiabilidad. El formato de entrada está dado por cuadrículas que facilitan la colocación de los bloques. El usuario puede elegir entre 16 distribuciones estadísticas, incluyendo la Exponencial, Weibull y Lognormal, para caracterizar fallas y reparaciones de equipos. El apoyo logístico está representado por componentes disponibles (repuestos) que son utilizados durante la reparación de los componentes activos. El RAPTOR no posee una interfase para introducir base de datos. El programa usa simulaciones Monte Carlo. Provee una característica de flujo de azar múltiple por estudios de sensibilidad de Monte Carlo. Los resultados comprenden la confiabilidad, disponibilidad, costos y otras estadísticas en forma tabular, con algunas gráficas. Los equipos o componentes no son clasificados por impacto en el número de

fallas y tiempo fuera de servicio del sistema. El intervalo de confianza estadística no es indicado directamente, pero el usuario la puede calcular a través de la información provista. A continuación se presenta los resultados de la evaluación de los subsistemas 3, 6 y 9 a través del RAPTOR. Estos subsistemas fueron elegidos porque presentan los mayores problemas en confiabilidad y disponibilidad. En las figuras 37, 38 y 39 se presentan los resultados de la simulación.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	2595458.18	2652399.64	2725854.23	24775.07
λ_o	0.977400107	0.994017737	1.0000000000	0.004763221
MTBDE	5708.016628	>23786.083956	>35040.000000	n/a
MDT (83 runs)	11.790052	126.934993	244.082584	49.715008
MTBM	992.114147	1592.010800	2695.384615	334.829884
MRT	233.007788	239.842727	246.960811	2.659105
%Green Time	76.735119	85.073180	91.168822	2.740448
%Yellow Time	7.995247	14.328593	22.363041	2.671244
% Red Time	0.000000	0.598226	2.259989	0.476322
System Failures	0	1.730000	6	1.271652
$R(t=35040.000000) = 0.170000$				

Figura 37. Resultados de la evaluación para el subsistema-3.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	12475822.68	12673860.52	16855669.32	510733.83
λ_o	0.976593759	0.992885140	1.0000000000	0.003292120
MTBDE	4888.549335	>20012.398272	>35040.000000	n/a
MDT (99 runs)	8.009867	123.488037	235.811110	43.384024
MTBM	603.543442	891.269694	1449.172096	157.273430
MRT	97.265290	123.235984	171.287797	11.985764
%Green Time	80.097419	86.556514	91.873475	2.478684
%Yellow Time	7.328718	12.732000	19.378704	2.491489
% Red Time	0.000000	0.711486	2.340624	0.329212
System Failures	0	2.230000	7	1.247838
$R(t=35040.000000) = 0.010000$				

Figura 38. Resultados de la evaluación para el subsistema-6.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	13833884.16	13913140.24	13989694.41	31964.29
Ao	0.992994914	0.998422402	1.0000000000	0.001617823
MTBDE	11598.180600	>28697.278127	>35040.000000	n/a
MDT (69 runs)	1.115730	51.480976	123.730285	28.081143
MTBM	429.889628	580.325008	854.634146	81.654762
MRT	79.913862	87.946411	94.426564	2.943531
%Green Time	81.538797	85.655943	90.867586	1.850473
%Yellow Time	8.972384	14.186297	17.836374	1.829858
% Red Time	0.000000	0.157760	0.700509	0.161782
System Failures	0	1.090000	3	0.906587
R(t=35040.000000) =0.310000				

Figura 39. Resultados de la evaluación para el subsistema-9.

SUBSISTEMA-3 PREPARACIÓN DE LA CARGA

1^{ER} Escenario: Mejoramiento de la disponibilidad del subsistema a través de redundancia

Para agregar redundancia se procederá a elegir el equipo o sistemas de equipos más crítico del subsistema. En este caso se eligió el sistema de bombas y se agregó una bomba, de las mismas condiciones y costo. En la figura 40 se muestra los resultados de la simulación, para cuatro (4) años y cien (100) corridas, y en la figura 41 se muestran los resultados para la simulación de una falla.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	3120867.30	3190031.05	3338872.86	35275.69
Ao	0.994548813	0.999652124	1.0000000000	0.001052604
MTBDE	17436.126933	>34853.449175	>35040.000000	n/a
MDT (15 runs)	2.439272	75.672169	191.009581	54.097383
MTBM	699.117830	1033.004625	1523.478261	158.889072
MRT	234.490627	239.732893	245.245807	2.227324
%Green Time	68.972870	78.147224	84.668302	3.186708
%Yellow Time	15.331698	21.817989	31.027130	3.172232
% Red Time	0.000000	0.034788	0.545119	0.105260
System Failures	0	0.160000	2	0.392938
R(t=35040.000000) =0.850000				

Figura 40. Simulación del subsistema-3 para cuatro años y 100 corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	1705955.38	9425255.69	58410810.24	8254743.19
Ao	0.953381762	0.997763640	0.999999571	0.005687483
MTBDE	1343.315074	175405.357680	1278482.044948	186220.764943
MDT	0.086409	76.963350	215.181984	52.557793
MTBM	335.828768	966.350546	1487.854103	157.847178
MRT	233.878450	240.312821	250.650444	2.152125
%Green Time	63.088754	77.470632	87.580417	3.282616
%Yellow Time	11.383713	22.305732	35.820773	3.227329
% Red Time	0.000043	0.223636	4.661824	0.568748
Ending Sim Time	1358.125061	175482.321030	1278510.493712	186222.221361

Figura 41. Resultados para la simulación de una falla en el subsistema-3.

Impacto del escenario en el desempeño total de la Unidad de Alquiler:

En la figura 42 se observa el impacto del primer escenario en la unidad de alquiler.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.966729808	0.982986165	0.996796474	0.006137930
MTBDE	4839.173213	9993.901148	34927.748463	5485.451628
MDT	102.396636	146.007423	209.029318	20.491439
MTBM	4839.173213	9993.901148	34927.748463	5485.451628
MRT	102.396636	146.323980	209.029318	20.696205
%Green Time	96.672981	98.298617	99.679647	0.613793
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
% Red Time	0.320353	1.701383	3.327019	0.613793
System Failures	1	4.080000	7	1.397712

R(t=35040.000000) = 0.000000

Figura 42. Impacto del primer escenario en la unidad de alquiler.

Se observa un incremento de la disponibilidad total de la unidad en 0,955% evaluada en el período de cuatro (4) años.

También se observa un incremento en el tiempo medio entre fallas en 2.980,493 horas para la unidad completa.

Beneficios Económicos del Escenario:

Beneficio Económico del escenario planteado durante los cuatro (4) años:

$$21.000,00 \text{ BBL} / \text{Día} \times 365 \text{ días} \times 4 \times 0,955\% \times 18\$ / \text{BBL} = 5.270.454,00\$$$

Inversión y costos de operación, mantenimiento y repuestos por la nueva bomba, en el período de cuatro (4) años:

$$537.631,41\$$$

Beneficio neto del escenario:

$$5.270.454,00\$ - 537.631,41\$ = 4.732.822,59\$$$

2^{do} Escenario: Mejoramiento de la confiabilidad del subsistema a través del reemplazo de equipos con una confiabilidad mayor en 50%

Para este escenario se reemplazarán las dos (2) bombas existentes por otras que poseen un 50% de confiabilidad mayor, según un análisis en un período de un año. Para ello se evaluó la confiabilidad de la bomba a reemplazar en el subsistema en un período de un año, cuyo resultado fue de 4%. Luego se estimó el tiempo promedio operativo (TPO) para una bomba con 59% de confiabilidad, el cual resultó de 16.600 horas. Y por último se realizó la simulación del subsistema con estas bombas, cuyo resultado se presenta en la figura 43 y en la figura 44.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	2570533.31	2595241.34	2643967.12	16422.45
Ao	0.994390830	0.999882565	1.0000000000	0.000735562
MTBDE	34843.454695	>35035.885104	>35040.000000	n/a
MDT (3 runs)	50.934391	137.163206	196.545305	62.402961
MTBM	3185.454545	11362.054114	35040.000000	8100.073206
MRT	213.332182	238.941533	254.118980	7.601159
%Green Time	92.490532	97.056081	99.391175	1.521902
%Yellow Time	0.608825	2.932176	7.509468	1.517592
% Red Time	0.000000	0.011743	0.560917	0.073556
System Failures	0	0.030000	1	0.170587
R(t=35040.000000) =0.970000				

Figura 43. Resultados de la simulación para el segundo escenario, para 4 años y 100 corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	1866242.56	16705511.29	68306947.44	13910795.52
Ao	0.977557643	0.999074890	0.999969685	0.002425575
MTBDE	8037.545078	550751.020666	2436932.071426	509023.603814
MDT	10.512176	134.500254	244.034732	67.513582
MTBM	2796.595544	8189.399938	10978.223370	1535.011777
MRT	230.538927	239.517150	247.143517	2.823358
%Green Time	92.526298	97.104692	98.054466	0.640186
%Yellow Time	0.581447	2.802797	7.028417	0.646947
% Red Time	0.003031	0.092511	2.244236	0.242558
Ending Sim Time	8222.067649	550885.520919	2437097.824402	509026.835374

Figura 44. Simulación del segundo escenario para una falla en el subsistema-3.

Impacto del escenario en el desempeño total de la Unidad de Alquiler:

En la simulación de este escenario para el impacto en la unidad de alquiler, se observa un incremento de la disponibilidad total de la unidad en 0,887% evaluada para un período de cuatro (4) años. A continuación se presenta los resultados de la simulación en las figura 45.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.970733171	0.982310937	0.994000169	0.005803626
MTBDE	4859.212905	8971.041733	17414.882973	3310.413619
MDT	97.272169	144.363981	181.947091	17.295011
MTBM	4859.212905	8971.041733	17414.882973	3310.413619
MRT	97.272169	144.363981	181.947091	17.295011
%Green Time	97.073317	98.231094	99.400017	0.580363
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
% Red Time	0.599983	1.768906	2.926683	0.580363
System Failures	2	4.280000	7	1.296765
R(t=35040.000000) = 0.000000				

Figura 45. Simulación del segundo escenario en la unidad de alquiler, para 4 años y 100 corridas.

Se observa un incremento en el tiempo medio entre fallas de 1.957,6335 horas para la unidad completa.

Beneficios Económicos del Escenario:

Beneficio obtenido por el escenario planteado:

$$0,887\% \times 551.880.000,00 \$ = 4.895.175,60 \$$$

Inversión y costos de operación, mantenimiento y repuestos, durante los cuatro años:

El costo del ciclo de vida para el escenario presentado, es de 2.595.241\$, y el costo total en el subsistema original es de 2.652.399,64\$. Por lo que, se puede apreciar un ahorro de 57.158,30\$ durante los cuatro años. Esto se justifica por la mejora de la confiabilidad, en que a pesar de hacer una mayor inversión en adquisición e instalación y tener repuestos más costosos, se obtiene un ahorro en los gastos de mantenimiento y operación debido al mejor desempeño del equipo. Uno de los indicadores que demuestran esto es la frecuencia de mantenimiento, al observar que para el segundo escenario tenemos una frecuencia de mantenimiento de cada

11.362,054 horas, y para el subsistema original se tiene una frecuencia de mantenimiento de cada 1592,011 horas. Esto concuerda con el mayor tiempo de vida operativa de los equipos, cuyo mejoramiento es significativamente mayor.

Beneficio neto del escenario:

$$4.895.175,60\$ + 57.158,30\$ = 4.952.333,90\$$$

El mayor beneficio entre estos dos escenarios lo presenta el segundo caso.

SUBSISTEMA-6 TORRE DESPOJADORA DE ISOBUTANO

1^{ER} Escenario: Mejoramiento de la confiabilidad del subsistema a través de redundancia

Para empezar, se realizó una evaluación de los sistemas de bombeo pertenecientes al Subsistema-6, con la finalidad de trabajar con el sistema o sistemas de bombeo más críticos.

- Evaluación del sistema de bombeo del rehervidor de la torre despojadora (ver evaluación en las figuras 46 y 47):

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	1525214.90	1581613.07	1635610.54	23654.96
Ào	0.996827855	0.999722572	1.0000000000	0.000629746
MTBDE	17464.424029	>34156.223308	>35040.000000	n/a
MDT (23 runs)	3.245031	33.811705	60.341466	16.805123
MTBM	1345.563684	2357.690273	5840.000000	827.895238
MRT	62.832277	65.936853	69.236038	0.919492
%Green Time	95.043656	96.973244	98.924105	0.800086
%Yellow Time	1.075895	2.999014	4.956344	0.787134
%Red Time	0.000000	0.027743	0.317214	0.062975
System Failures	0	0.280000	2	0.549181
R(t=35040.000000) =0.770000				

Figura 46. Simulación del sistema de bombeo del rehervidor de la torre despojadora, para 4 años y 100 corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	175488.12	5170496.55	23043845.91	5044278.46
Ao	0.950969091	0.998203630	0.999999897	0.006062473
MTBDE	824.423082	121698.130868	553722.734692	121755.177935
MDT	0.033768	35.529075	67.058010	18.638631
MTBM	274.807694	2180.233765	3260.290883	479.437938
MRT	61.946087	66.042713	69.762102	0.907485
%Green Time	83.905933	96.865435	98.455260	1.615188
%Yellow Time	0.197352	2.954928	11.190976	1.100956
% Red Time	0.000010	0.179637	4.903091	0.606247
Ending Sim Time	866.929420	121733.659943	553756.207533	121750.733646

Figura 47. Simulación del sistema de bombeo del rehervidor de la torre despojadora para una falla.

- Evaluación del sistema de bombeo de reciclaje de isobutano (Ver evaluación en las figuras 48 y 49):

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	1059127.92	1115432.49	1172411.21	19063.81
Ao	0.990856704	0.998074424	1.0000000000	0.002216136
MTBDE	8708.224173	>29100.881839	>35040.000000	n/a
MDT (62 runs)	0.707510	65.674452	140.682787	34.253348
MTBM	969.250644	1596.594592	3504.000000	362.388929
MRT	134.408373	137.903604	142.580666	1.606486
%Green Time	86.347153	91.220788	96.173914	1.655676
%Yellow Time	3.826086	8.586655	13.233392	1.620084
% Red Time	0.000000	0.192558	0.914330	0.221614
System Failures	0	1.040000	4	1.038460

R(t=35040.000000) =0.380000

Figura 48. Simulación del sistema de bombeo de reciclaje de isobutano, para 4 años y 100 corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	116985.56	1148589.77	6079406.89	1042439.19
Ao	0.773469945	0.990250883	0.999966571	0.026147769
MTBDE	131.939672	36157.252192	210030.684532	36532.059328
MDT	0.424308	73.465493	134.652577	41.436382
MTBM	65.969836	1433.963717	2864.672832	461.351335
MRT	127.922883	137.919025	146.294718	2.462024
%Green Time	17.598339	89.912600	96.169930	7.999168
%Yellow Time	1.716466	9.112489	59.748656	5.889827
% Red Time	0.003343	0.974912	22.653005	2.614777
Ending Sim Time	170.581511	36230.717685	210052.461361	36531.686683

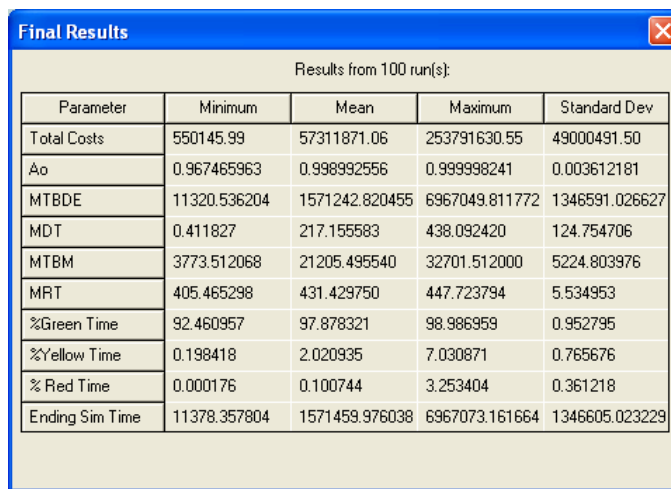
Figura 49. Simulación del sistema de bombeo de reciclaje de isobutano para una falla.

- Evaluación del sistema de bombeo de condensado del rehervidor de la torre desisobutanizadora (Ver evaluación en las figuras 50 y 51):

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	1381440.00	1395829.21	1434517.04	12664.26
Ao	0.990089375	0.999821711	1.0000000000	0.001143179
MTBDE	34692.731704	>35033.752778	>35040.000000	n/a
MDT (4 runs)	26.223101	156.180552	347.268296	129.218434
MTBM	5835.629483	>25455.145662	>35040.000000	n/a
MRT (77 runs)	381.398674	432.144082	472.842957	17.383323
%Green Time	92.615664	98.005398	100.000000	1.754511
%Yellow Time	0.000000	1.976773	7.318140	1.730139
% Red Time	0.000000	0.017829	0.991062	0.114318
System Failures	0	0.040000	1	0.195959

R(t=35040.000000) =0.960000

Figura 50. Simulación del sistema de bombeo de condensado del rehervidor de la torre desisobutanizadora, para 4 años y 100 corridas.



Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	550145.99	57311871.06	253791630.55	49000491.50
Ao	0.967465963	0.998992556	0.999998241	0.003612181
MTBDE	11320.536204	1571242.820455	6967049.811772	1346591.026627
MDT	0.411827	217.155583	438.092420	124.754706
MTBM	3773.512068	21205.495540	32701.512000	5224.803976
MRT	405.465298	431.429750	447.723794	5.534953
%Green Time	92.460957	97.878321	98.986959	0.952795
%Yellow Time	0.198418	2.020935	7.030871	0.765676
%Red Time	0.000176	0.100744	3.253404	0.361218
Ending Sim Time	11378.357804	1571459.976038	6967073.161664	1346605.023229

Figura 51. Simulación del sistema de bombeo de condensado del rehervidor de la torre desisobutanizadora para una falla.

Se observa que el sistema de bombeo con mayor problema es el de reciclaje de isobutano, debido a que presenta la menor confiabilidad, y por lo tanto menor tiempo promedio operativo, y presenta la mayor frecuencia de mantenimiento. Por ende, afecta en mayor proporción que los otros en la confiabilidad del subsistema. Por consiguiente, se trabajará con este sistema de bombeo para crear redundancia.

CASO A

Para empezar se va a realizar redundancia agregando una bomba al sistema de bombas de reciclaje de isobutano, de las mismas condiciones y costos. En la figura 52 y 53 se muestra los resultados de la simulación, para cuatro (4) años y cien (100) corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	13044109.03	13259757.46	19236843.82	838309.50
Ao	0.982796330	0.994284579	1.0000000000	0.001984656
MTBDE	11479.061141	>28579.567915	>35040.000000	n/a
MDT (99 runs)	9.917723	154.779883	206.454350	45.140846
MTBM	497.891203	684.747601	1088.352002	99.786476
MRT	107.747570	125.826007	146.405272	8.873979
%Green Time	76.837464	82.748930	89.673364	2.335137
%Yellow Time	10.298332	16.679528	22.648402	2.337353
% Red Time	0.000000	0.571542	1.720367	0.198466
System Failures	0	1.410000	3	0.664756
R(t=35040.000000) =0.010000				

Figura 52. Simulación de redundancia en el sistema de bombas de reciclaje de isobutano para el subsistema-6.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	4743545.29	11123455.32	13378581.84	2346288.39
Ao	0.959082797	0.994384994	0.999931200	0.005306627
MTBDE	983.733589	26711.709520	35692.965050	9454.942041
MDT	0.428267	134.268460	205.794165	72.361879
MTBM	245.933397	653.501138	1025.687433	130.645493
MRT	88.249501	124.086852	160.908861	10.205393
%Green Time	69.457567	82.272588	92.077974	3.318961
%Yellow Time	6.877258	17.165911	29.942402	3.305077
% Red Time	0.006880	0.561501	4.091720	0.530663
Ending Sim Time	1025.702464	26845.977980	35876.833795	9511.398879

Figura 53. Resultados para la simulación de una falla del caso A.

CASO B

En este caso se va a agregar una bomba al sistema de bombas del rehervidor de la torre despojadora, de las mismas condiciones y costos. En la figura 54 y 55 se muestran los resultados de la simulación, para cuatro (4) años y cien (100) corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	13173209.66	13288951.79	17162715.69	390736.02
Ao	0.974653882	0.992854367	1.000000000	0.003199339
MTBDE	4268.984003	>21733.511213	>35040.000000	n/a
MDT (99 runs)	3.693927	135.726047	199.775448	38.037426
MTBM	553.170753	762.485933	1202.052401	106.865064
MRT	96.452379	116.176608	137.923992	9.568329
%Green Time	79.089990	85.427520	91.822293	2.171212
%Yellow Time	7.662638	13.857917	20.181061	2.084224
% Red Time	0.000000	0.714563	2.534612	0.319934
System Failures	0	2.000000	8	1.086278
R(t=35040.000000) =0.010000				

Figura 54. Simulación de redundancia en el sistema de bombas del rehervidor de la torre despojadora para el subsistema-6.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	4706035.50	9627258.43	13859861.56	2862346.32
Ao	0.888359065	0.992021364	0.999838233	0.012947499
MTBDE	487.799922	20282.080457	37413.645404	11502.561542
MDT	0.679316	110.099417	207.142280	67.517295
MTBM	162.599974	742.750432	1270.007012	193.636695
MRT	89.625806	113.348728	184.032416	15.160452
%Green Time	61.928370	85.085302	94.616752	5.490574
%Yellow Time	4.639656	14.116834	36.635696	4.975316
% Red Time	0.016177	0.797864	11.164093	1.294750
Ending Sim Time	549.102205	20392.179874	37600.504742	11557.376275

Figura 55. Resultados para la simulación de una falla para el caso B.

Impacto del escenario en el desempeño total de la Unidad de Alquiler:

CASO A

Este caso presenta un incremento de la disponibilidad total de la unidad en 0,262% evaluada en el período de cuatro (4) años. También se observa un incremento en el tiempo medio entre fallas de 1336,807 horas para la unidad completa, y el tiempo fuera de servicio aumenta en 5,975 horas. Ver figura 56.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.954487386	0.976058889	0.996652515	0.008381675
MTBDE	3720.855379	8350.215912	34922.704149	4720.321444
MDT	109.749618	175.488850	242.231676	22.487386
MTBM	3720.855379	8350.215912	34922.704149	4720.321444
MRT	99.153469	175.605182	242.231676	22.303645
%Green Time	95.448739	97.605889	99.665252	0.838168
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
% Red Time	0.334748	2.394111	4.551261	0.838168
System Failures	1	4.760000	9	1.497465
R(t=35040.000000) =0.000000				

Figura 56. Resultados de la simulación del caso A en la unidad de alquiler.

CASO B

En este caso se observa que no hay ninguna contribución para la disponibilidad, durante el período de cuatro (4) años de evaluación. En la figura 57 se presentan los resultados de la simulación.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.951701850	0.973346075	0.991799234	0.008535322
MTBDE	3705.292538	6706.247552	11584.215059	2132.182975
MDT	95.784941	167.015305	209.629713	21.074631
MTBM	3705.292538	6706.247552	11584.215059	2132.182975
MRT	95.784941	167.481344	209.629713	20.995219
%Green Time	95.170185	97.334608	99.179923	0.853532
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
% Red Time	0.820077	2.665392	4.829815	0.853532
System Failures	3	5.550000	9	1.551612
R(t=35040.000000) = 0.000000				

Figura 57. Resultados de la simulación del caso B en la unidad de alquiler.

Beneficios Económicos del Escenario:

CASO A

Beneficio obtenido por el escenario planteado:

$$0,262\% \times 551.880.000,00 \$ = 1.445.925,60 \$$$

Inversión en adquisición e instalación, costos de operación, mantenimiento y repuestos durante el período de cuatro (4) años:

$$585.896,94\$$$

Beneficio neto del escenario:

$$1.445.925,60\$ - 585.896,94\$ = \mathbf{860.028,66\$}$$

CASO B

En este caso no hay beneficios económicos para la unidad de alquiler. El saldo que presenta este escenario es negativo, puesto que, la inversión de una bomba adicional (42000\$), no justifica o no contribuye en el mejoramiento de la disponibilidad del subsistema de la torre despojadora de isobutano.

En el análisis realizado para cada uno de los casos resulta que el beneficio económico se consigue con el Caso A, en el cual se adiciona una bomba al sistema de bombeo de reciclaje de isobutano. Para el Caso B, la simulación indica que agregar una bomba al sistema de bombeo del rehervidor de la torre despojadora, es una mala inversión en vista que no mejora la disponibilidad, y se desembolsa un dinero innecesario. En otras palabras, el sistema del rehervidor de la torre despojadora, no necesita una reestructuración, en cuanto a redundancia.

2^{do} Escenario: Mejoramiento de la confiabilidad del subsistema a través del reemplazo de equipos con una confiabilidad mayor en 50%

Para este escenario se reemplazarán las bombas existentes por otras que poseen un 50% de confiabilidad mayor, para el tiempo de evaluación de 1 año. Para ello se evaluó la confiabilidad de una bomba del sistema de bombeo del rehervidor de la torre despojadora, en un período de un año, cuyo resultado fue de 26% de confiabilidad. También se evaluó la confiabilidad de una bomba del sistema de bombeo de reciclaje de isobutano, para un período de un año, cuyo resultado fue de 5,7% de confiabilidad. Luego se estimó el tiempo promedio operativo (TPO) para una bomba del sistema de bombeo del rehervidor de la torre despojadora con 76% de confiabilidad, el cual resultó de 30.550 horas. Y para una bomba del sistema de bombeo de reciclaje de isobutano con 55,7% de confiabilidad, posee un tiempo promedio operativo (TPO) de 15.680 horas. A continuación se realizó la simulación del subsistema con estas bombas, cuyo resultado se presenta en la figura 58 y 59.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	12530416.30	12663405.79	19528028.38	690178.28
Ao	0.983262360	0.994578402	1.0000000000	0.001537424
MTBDE	17226.756559	>33460.392108	>35040.000000	n/a
MDT (98 runs)	91.980459	181.640706	293.243441	22.110096
MTBM	1660.016097	3623.385875	8710.455110	1240.163479
MRT	94.184909	168.714222	266.629263	37.188862
%Green Time	90.103274	95.025838	98.146711	1.621992
%Yellow Time	1.304413	4.432002	9.353916	1.599465
% Red Time	0.000000	0.542160	1.673764	0.153742
System Failures	0	1.060000	2	0.310483
R(t=35040.000000) =0.020000				

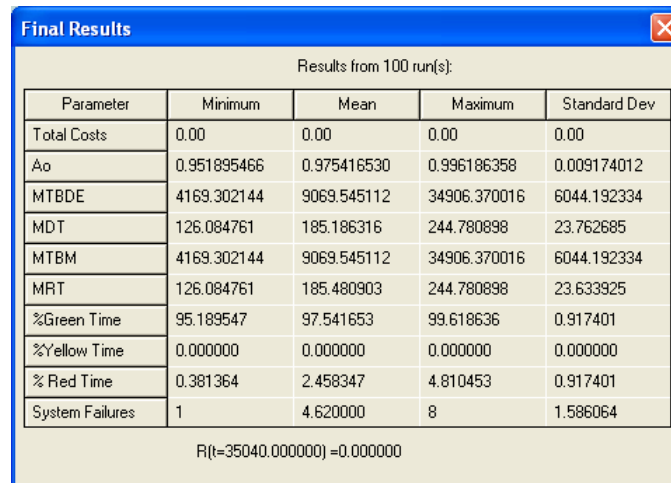
Figura 58. Simulación del segundo escenario para el subsistema- 6.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	6324600.57	11806665.07	12941435.35	815678.80
Ao	0.959455586	0.993852176	0.995370670	0.003540104
MTBDE	7677.003320	31447.788886	36249.762038	3530.586840
MDT	140.599064	184.436193	324.412718	17.247904
MTBM	1664.946126	3591.224814	7748.647417	1207.056010
MRT	87.698301	161.027468	420.297541	44.641119
%Green Time	89.494421	95.193674	98.588891	1.806241
%Yellow Time	0.872831	4.191544	8.299262	1.730182
% Red Time	0.462933	0.614782	4.054441	0.354010
Ending Sim Time	8001.416038	31632.225079	36424.581957	3522.657721

Figura 59. Resultados para la simulación de una falla para el segundo escenario.

Impacto del escenario en el desempeño total de la Unidad de Alquiler:

Para este escenario se observa un incremento en la disponibilidad en 0,198 %, en donde el tiempo medio entre fallas presentó un incremento en 1436,527 horas, y el tiempo fuera de servicio incrementó en 13,739 horas. Los resultados se presentan en la figura 60.



Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.951895466	0.975416530	0.996186358	0.009174012
MTBDE	4169.302144	9069.545112	34906.370016	6044.192334
MDT	126.084761	185.186316	244.780898	23.762685
MTBM	4169.302144	9069.545112	34906.370016	6044.192334
MRT	126.084761	185.480903	244.780898	23.633925
%Green Time	95.189547	97.541653	99.618636	0.917401
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
%Red Time	0.381364	2.458347	4.810453	0.917401
System Failures	1	4.620000	8	1.586064

R(t=35040.000000) = 0.000000

Figura 60. Resultados de la simulación del segundo escenario para la unidad de alquiler.

Beneficios Económicos del Escenario:

Beneficio obtenido por el escenario planteado:

$$0,198\% \times 551.880.000,00 \$ = 1.092.722,40 \$$$

Inversión de adquisición e instalación, costos de operación, mantenimiento y repuestos durante el período de cuatro (4) años:

El costo del ciclo de vida para el presente escenario es de 12.663.405,79\$, y el costo total en el ciclo de vida en el subsistema original es de 12.673.860,52\$. Por lo que, se puede apreciar un ahorro de 10.454,73\$ durante los cuatro años. Esto se justifica por la mejora de la confiabilidad, en que a pesar de hacer una mayor

inversión en adquisición e instalación y tener repuestos más costosos, se obtiene un ahorro en los gastos de mantenimiento y operación debido al mejor desempeño de los equipos sustituidos. También se puede distinguir un reflejo de este escenario en la frecuencia de mantenimiento, al observar que para el segundo escenario tenemos una frecuencia de mantenimiento de cada 3.623,386 horas, y para el subsistema original se tiene una frecuencia de mantenimiento de cada 891,270 horas. Esto concuerda con el mayor tiempo de vida operativa de los equipos, cuyo mejoramiento es significativamente mayor.

Beneficio neto del escenario:

$$1.092.722,40\$ + 10.454,73\$ = \mathbf{1.103.177,13\$}$$

El mayor beneficio se obtiene con el segundo escenario.

SUBSISTEMA-9 TORRE DEPROPANIZADOR

1^{ER} Escenario: Mejoramiento de la confiabilidad y disponibilidad del subsistema a través de redundancia

Para empezar, se realizó una evaluación de los sistemas de bombeo pertenecientes al Subsistema-9, con la finalidad de trabajar con el sistema o sistemas de bombeos más críticos. A continuación se presentan las evaluaciones a los sistemas de bombeos.

- Evaluación del sistema de bombeo del asentador de ácido (Ver evaluación en las figuras 61 y 62):

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	984013.28	1010140.60	1036093.97	13336.96
Ao	0.996661715	0.999786239	1.000000000	0.000651579
MTBDE	17461.513251	>34857.894697	>35040.000000	n/a
MDT (13 runs)	1.001415	53.117712	92.766525	28.817444
MTBM	2186.002850	3935.293694	8760.000000	1513.806234
MRT	96.221373	101.135524	105.275725	1.689960
%Green Time	95.394941	97.143026	98.901582	0.873283
%Yellow Time	1.098418	2.835598	4.605059	0.858940
% Red Time	0.000000	0.021376	0.333828	0.065158
System Failures	0	0.140000	2	0.374700
R(t=35040.000000) =0.870000				

Figura 61. Simulación del sistema de bombeo del asentador de ácido, para 4 años y 100 corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	74387.72	5567501.69	20365052.56	4974657.13
Ao	0.944679406	0.997825291	0.999986807	0.007875350
MTBDE	398.328197	202049.142475	745137.459763	182934.344829
MDT	5.823671	56.028929	99.838806	26.682251
MTBM	199.164098	3129.313188	4454.770191	701.666658
MRT	94.032295	100.896505	103.280741	1.334342
%Green Time	76.682005	96.607197	97.755786	2.246935
%Yellow Time	0.109623	3.175332	17.785936	1.689203
% Red Time	0.001319	0.217471	5.532059	0.787535
Ending Sim Time	421.654366	202105.171404	745216.918895	182934.648076

Figura 62. Simulación del sistema de bombeo del asentador de ácido para una falla.

- Evaluación del sistema de bombeo de carga de la torre depropanizadora (Ver evaluación en las figuras 63 y 64):

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	992444.28	1022718.85	1074170.55	14083.78
Ao	0.994554136	0.999417592	1.0000000000	0.001186589
MTBDE	17424.588477	>33972.611773	>35040.000000	n/a
MDT (30 runs)	2.096667	53.960758	114.203027	31.066928
MTBM	1293.463710	2554.275568	5005.714286	634.082155
MRT	112.781055	116.978491	123.123989	1.802436
%Green Time	91.346963	95.238946	97.540331	1.084193
%Yellow Time	2.459669	4.702814	8.320618	1.048044
% Red Time	0.000000	0.058241	0.544586	0.118659
System Failures	0	0.360000	2	0.591946
R(t=35040.000000) =0.700000				

Figura 63. Simulación del sistema de bombeo de carga de la torre depropanizadora, para 4 años y 100 corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	73330.09	2779130.14	15013899.03	2836130.98
Ao	0.948521426	0.996762833	0.999978510	0.007631838
MTBDE	521.987413	98432.869675	546115.255555	102963.957537
MDT	0.468324	59.955145	123.268198	33.486284
MTBM	260.993706	2262.870468	4550.623267	648.431268
MRT	109.190386	116.983346	121.823788	1.892883
%Green Time	76.679885	94.538537	98.716354	2.905990
%Yellow Time	0.069902	5.137746	19.523419	2.356440
% Red Time	0.002149	0.323717	5.147857	0.763184
Ending Sim Time	550.316944	98492.824820	546154.503386	102963.208360

Figura 64. Simulación del sistema de bombeo de carga de la torre depropanizadora para una falla.

- Evaluación del sistema de bombeo de sobrecarga de la torre depropanizadora (Ver evaluación en las figuras 65 y 66):

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	990777.80	1015126.92	1058284.83	12514.35
Ao	0.998492740	0.999890056	1.000000000	0.000278029
MTBDE	17493.592818	>34861.211649	>35040.000000	n/a
MDT (19 runs)	0.343807	18.886058	39.184729	10.528344
MTBM	1130.119111	2202.508894	3893.333333	555.686934
MRT	41.116472	42.968712	44.734708	0.581248
%Green Time	96.299958	97.942121	98.905214	0.493407
%Yellow Time	1.094786	2.046884	3.682041	0.488832
% Red Time	0.000000	0.010994	0.150726	0.027803
System Failures	0	0.200000	2	0.424264
R(t=35040.000000) =0.810000				

Figura 65. Simulación del sistema de bombeo de sobrecarga de la torre depropanizadora, para 4 años y 100 corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	177324.50	5578427.55	24112394.55	4927581.54
Ao	0.990425116	0.999655466	0.999998172	0.001030159
MTBDE	4298.764033	201415.089427	877872.408866	179779.897251
MDT	0.396831	19.596641	42.519079	12.420123
MTBM	1074.691008	2104.424857	2974.830306	325.588389
MRT	41.573738	43.040603	46.066787	0.463361
%Green Time	96.663882	97.964122	98.805998	0.341994
%Yellow Time	1.150715	2.001425	3.191715	0.304437
% Red Time	0.000183	0.034453	0.957488	0.103016
Ending Sim Time	4340.322112	201434.686068	877908.148521	179781.513505

Figura 66. Simulación del sistema de bombeo de sobrecarga de la torre depropanizadora para una falla.

- Bomba de vaciado de alquiler (Ver evaluación en las figuras 67 y 68):

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	983471.41	1014589.09	1061110.41	14599.36
Ao	0.997122384	0.999729236	1.000000000	0.000676611
MTBDE	17497.502281	>34855.537430	>35040.000000	n/a
MDT (19 runs)	9.076712	48.750369	100.831634	31.234821
MTBM	1459.619202	3036.515618	7008.000000	1039.605680
MRT	100.563936	104.971822	108.994931	1.749041
%Green Time	92.781390	96.243347	98.496109	1.060145
%Yellow Time	1.503891	3.729577	7.218610	1.056512
% Red Time	0.000000	0.027076	0.287762	0.067661
System Failures	0	0.200000	2	0.424264
R(t=35040.000000) =0.810000				

Figura 67. Simulación de la bomba de vaciado de alquiler, para 4 años y 100 corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	73955.50	4151060.52	23466358.19	4139574.97
Ao	0.824233016	0.996692044	0.999993663	0.017687386
MTBDE	443.279613	149365.128643	854339.486035	151187.273109
MDT	1.228042	50.344260	103.028778	30.226164
MTBM	221.639806	2570.956831	4321.312290	676.856474
MRT	101.820138	105.203434	113.681551	1.468311
%Green Time	80.708603	95.764021	97.724985	1.990729
%Yellow Time	1.714699	3.905183	12.221583	1.253493
% Red Time	0.000634	0.330796	17.576698	1.768739
Ending Sim Time	537.808610	149415.472903	854408.217522	151190.816883

Figura 68. Simulación del sistema de bombeo de vaciado de alquiler para una falla.

- Sistema de bombeo de fondo de la torre depropanizadora (Ver evaluación en las figuras 69 y 70):

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	980895.85	1001906.01	1040323.42	11008.95
Ao	0.998008737	0.999916075	1.000000000	0.000340270
MTBDE	34970.226178	>35037.059291	>35040.000000	n/a
MDT (7 runs)	19.170100	42.010125	69.773822	19.736982
MTBM	1946.666667	4720.244009	11680.000000	1702.456645
MRT	85.170587	89.934907	95.483455	1.566218
%Green Time	95.341815	97.875970	99.228339	0.707771
%Yellow Time	0.771661	2.115637	4.658185	0.703183
% Red Time	0.000000	0.008392	0.199126	0.034027
System Failures	0	0.070000	1	0.255147
R(t=35040.000000) =0.930000				

Figura 69. Simulación del sistema de bombeo de fondo de la torre depropanizadora, para 4 años y 100 corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	189734.54	9477642.91	42701654.56	8812711.95
Ao	0.995770201	0.999527767	0.999995623	0.000824266
MTBDE	4813.250369	349791.912150	1586775.360343	327690.808772
MDT	1.392621	45.117223	91.255821	26.730853
MTBM	1764.643015	4112.561816	6293.104693	809.492561
MRT	85.773564	89.956755	95.009309	1.006581
%Green Time	96.357606	97.822811	99.063378	0.455154
%Yellow Time	0.513642	2.129966	3.557006	0.445918
% Red Time	0.000438	0.047223	0.422980	0.082427
Ending Sim Time	4814.655485	349837.029373	1586823.594742	327690.105279

Figura 70. Simulación del sistema de bombeo de fondo de la torre depropanizadora para una falla.

Se observa que el sistema de bombeo de carga y sobrecarga a la torre depropanizadora presentan una de las mayores frecuencia de mantenimiento. Por ende, afecta en mayor proporción que los otros sistemas de bombeo, tanto en la confiabilidad como en la disponibilidad del subsistema de la torre depropanizadora. Por consiguiente, se trabajará con estos dos sistemas de bombeo para crear redundancia, mejorando confiabilidad y disponibilidad.

CASO A

Para empezar se va a realizar redundancia agregando una bomba al subsistema de bombeo de carga a la torre depropanizadora, de las mismas condiciones operacionales y costos. En la figura 71 y 72 se muestran los resultados de la simulación, para cuatro (4) años y cien (100) corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	14361529.54	14431393.54	14524762.62	34215.18
Ao	0.995883643	0.999188202	1.0000000000	0.001081906
MTBDE	11637.576356	>32447.838335	>35040.000000	n/a
MDT (51 runs)	2.786025	44.238560	105.819004	28.471835
MTBM	393.676562	520.042173	700.800000	64.543287
MRT	82.867563	91.552382	98.284315	3.525633
%Green Time	77.872929	83.479444	88.878834	1.944578
%Yellow Time	11.121166	16.439376	22.119120	1.957199
% Red Time	0.000000	0.081180	0.411636	0.108191
System Failures	0	0.670000	3	0.762299
R(t=35040.000000) =0.490000				

Figura 71. Simulación del Caso A: Redundancia agregando una bomba al subsistema de bombeo de carga a la torre depropanizadora.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	2397153.33	13140605.94	20157269.51	5611136.75
Ao	0.867593661	0.995188108	0.999932977	0.013759858
MTBDE	109.701557	31237.031585	51688.091216	16246.733664
MDT	2.023929	65.010878	118.278074	34.179200
MTBM	54.850779	494.960857	759.493633	86.867764
MRT	64.049570	89.735889	102.304510	5.553359
%Green Time	19.090716	82.880708	93.475160	6.879305
%Yellow Time	3.411356	16.638103	67.668650	5.798411
% Red Time	0.006702	0.481189	13.240634	1.375986
Ending Sim Time	126.443475	31302.042463	51792.469876	16261.225505

Figura 72. Simulación del Caso A para una falla.

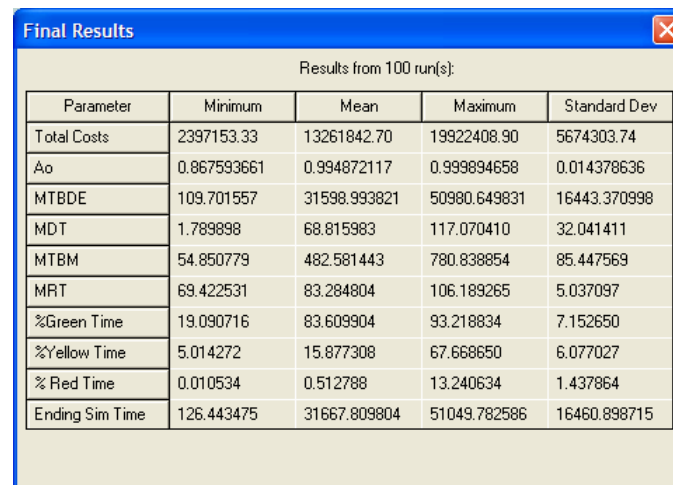
CASO B

En este caso se va a agregar una bomba al sistema de bombas de sobrecarga a la torre depropanizadora, de las mismas condiciones y costos. En la figura 73 y 74 se muestran los resultados de la simulación, para cuatro (4) años y cien (100) corridas.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	14328301.35	14428212.87	14515074.44	30095.31
Ao	0.995667575	0.998737029	1.000000000	0.001300547
MTBDE	11629.397282	>32259.294727	>35040.000000	n/a
MDT (58 runs)	3.538350	61.905643	112.171075	26.739818
MTBM	383.821304	499.361015	730.000000	57.538117
MRT	75.338212	83.103796	95.354037	3.435677
%Green Time	79.936103	84.421672	88.967335	1.783869
%Yellow Time	11.001378	15.452031	19.706835	1.761298
% Red Time	0.000000	0.126297	0.433242	0.130055
System Failures	0	0.750000	3	0.753326

$R(t=35040.000000) = 0.420000$

Figura 73. Simulación del Caso B: Redundancia agregando una bomba al sistema de bombeo de sobrecarga a la torre depropanizadora.



Final Results

Results from 100 run(s):

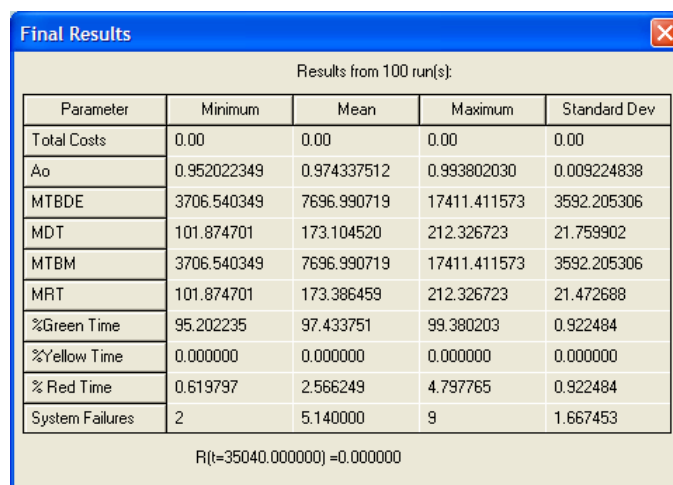
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	2397153.33	13261842.70	19922408.90	5674303.74
Ao	0.867593661	0.994872117	0.999894658	0.014378636
MTBDE	109.701557	31598.993821	50980.649831	16443.370998
MDT	1.789898	68.815983	117.070410	32.041411
MTBM	54.850779	482.581443	780.838854	85.447569
MRT	69.422531	83.284804	106.189265	5.037097
%Green Time	19.090716	83.609904	93.218834	7.152650
%Yellow Time	5.014272	15.877308	67.668650	6.077027
% Red Time	0.010534	0.512788	13.240634	1.437864
Ending Sim Time	126.443475	31667.809804	51049.782586	16460.898715

Figura 74. Resultados para la simulación de una falla del Caso B.

Impacto del escenario en el desempeño total de la Unidad de Alquiler:

CASO A

Para el escenario presentado en el caso A se observa un incremento de la disponibilidad total de la unidad en 0,09% evaluada en el período de cuatro (4) años. También se detalla un incremento en el tiempo medio entre fallas de 683,582 horas para la unidad completa, y el tiempo fuera de servicio aumenta en 3,592 horas. Estos resultados se observan en la figura 75.



Final Results

Results from 100 run(s):

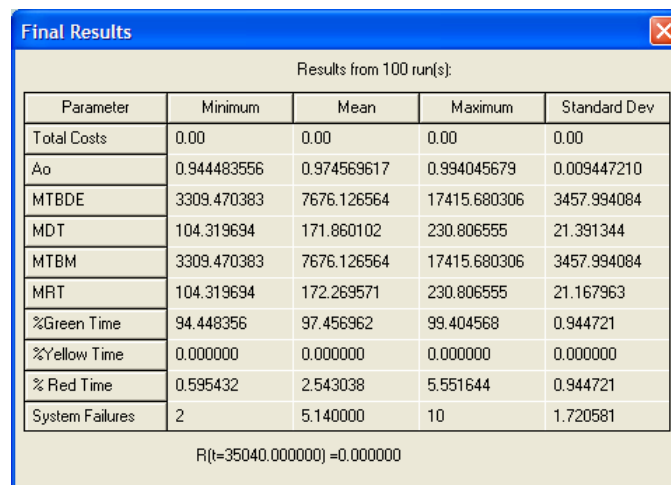
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.952022349	0.974337512	0.993802030	0.009224838
MTBDE	3706.540349	7696.990719	17411.411573	3592.205306
MDT	101.874701	173.104520	212.326723	21.759902
MTBM	3706.540349	7696.990719	17411.411573	3592.205306
MRT	101.874701	173.386459	212.326723	21.472688
%Green Time	95.202235	97.433751	99.380203	0.922484
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
% Red Time	0.619797	2.566249	4.797765	0.922484
System Failures	2	5.140000	9	1.667453

R(t=35040.000000) = 0.000000

Figura 75. Resultados de la simulación para el caso A en la unidad de alquiler.

CASO B

En este caso se observa que hay una contribución para la disponibilidad en 0,113%, durante el período de cuatro (4) años de evaluación. También se incrementa el tiempo medio entre fallas de 662,7180 horas para la unidad completa, y el tiempo fuera de servicio aumenta en 2,347 horas. Estos resultados se observan en la figura 76.



Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.944483556	0.974569617	0.994045679	0.009447210
MTBDE	3309.470383	7676.126564	17415.680306	3457.994084
MDT	104.319694	171.860102	230.806555	21.391344
MTBM	3309.470383	7676.126564	17415.680306	3457.994084
MRT	104.319694	172.269571	230.806555	21.167963
%Green Time	94.448356	97.456962	99.404568	0.944721
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
%Red Time	0.595432	2.543038	5.551644	0.944721
System Failures	2	5.140000	10	1.720581

R(t=35040.000000) = 0.000000

Figura 76. Resultados de la simulación para el caso B en la unidad de alquiler.

Beneficios Económicos del Escenario:

CASO A

Beneficio obtenido por el escenario planteado:

$$0,09\% \times 551.880.000,00 \$ = 496.692,00 \$$$

Inversión en adquisición e instalación, costos de operación, mantenimiento y repuestos durante el período de cuatro (4) años:

$$518.253,30\$$$

Beneficio neto del escenario:

$$496.692,00\$ - 518.253,30\$ = -21.561,30\$$$

En este caso no hay beneficios económicos para la unidad de alquiler. El saldo que presenta este escenario es negativo, puesto que, la inversión de una bomba adicional (26.000\$), no se justifica, debido a que no contribuye en el mejoramiento de la disponibilidad del subsistema de torre depropanizadora. Presentando más gastos que los ingresos económicos que puede generar.

CASO B**Beneficio obtenido por el escenario planteado:**

$$0,113\% \times 551.880.000,00 \$ = 623.624,40 \$$$

Inversión en adquisición e instalación, costos de operación, mantenimiento y repuestos durante el período de cuatro (4) años:

$$515.072,63\$$$

Beneficio neto del escenario:

$$623.624,40\$ - 515.072,63\$ = 108.551,77\$$$

2^{DO} Escenario: Mejoramiento de la confiabilidad del subsistema a través del reemplazo de equipos con una confiabilidad mayor en 50%

Para este escenario se reemplazarán las bombas existentes, en los escenarios que se están estructurando, por otras que poseen un 50% de confiabilidad mayor, estudiado para un período de un año. Para ello se evaluó la confiabilidad de una bomba del sistema de bombeo de carga a la torre depropanizadora, en un período de un año, cuyo resultado fue de 15,8% de confiabilidad. También se evaluó la

confiabilidad de una bomba del sistema de bombeo de sobrecarga a la torre depropanizadora, para un período de un año, cuyo resultado fue de 12% de confiabilidad. Luego, se estimó el tiempo promedio operativo (TPO) para una bomba del sistema de bombeo de carga a la torre depropanizadora con 65,8% de confiabilidad, el cual resultó de 20.650 horas. Y para una bomba del sistema de bombeo de sobrecarga a la torre depropanizadora con 62% de confiabilidad, posee un tiempo promedio operativo (TPO) de 17.860 horas. A continuación se realizó la simulación del subsistema con estas bombas, cuyo resultado se presenta en la figura 77 y 78.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	13848959.85	13902905.08	13995886.57	29769.55
Ao	0.993311829	0.999300562	1.000000000	0.001216108
MTBDE	6961.129300	>33864.344534	>35040.000000	n/a
MDT (43 runs)	3.817122	44.966200	108.783562	28.258365
MTBM	583.930740	930.125905	1401.600000	158.184258
MRT	85.155511	95.372129	102.014951	3.340422
%Green Time	85.131967	89.946260	93.043704	1.640219
%Yellow Time	6.956296	9.983796	14.856174	1.639008
% Red Time	0.000000	0.069944	0.668817	0.121611
System Failures	0	0.520000	5	0.741350
R(t=35040.000000) =0.570000				

Figura 77. Simulación del segundo escenario para el subsistema-9.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	2730739.79	13181408.27	19460767.06	5392552.12
Ao	0.932466287	0.996169185	0.999852245	0.007339343
MTBDE	1054.033122	32797.136150	51896.807911	16387.278732
MDT	1.955703	71.355999	115.011640	32.077235
MTBM	376.624418	887.813568	1540.848624	219.698032
MRT	80.714907	95.272902	114.081833	5.013948
%Green Time	74.968037	89.539573	94.761059	2.653768
%Yellow Time	3.228135	10.077346	24.484294	2.728208
% Red Time	0.014775	0.383081	6.753371	0.733934
Ending Sim Time	1130.371292	32868.492149	52001.252015	16403.870800

Figura 78. Simulación del segundo escenario para una falla.

Impacto del escenario en el desempeño total de la Unidad de Alquiler:

Para este escenario se observa un incremento en la disponibilidad en 0,087 %, en donde el tiempo medio entre fallas presentó un incremento en 646,216 horas, y el tiempo fuera de servicio incrementó en 6,919 horas. Ver los resultados en la figura 79.

Final Results				
Results from 1000 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.944483556	0.974308814	0.997283789	0.008733666
MTBDE	3309.470383	7659.624225	34944.823998	3617.705008
MDT	95.176002	176.432156	242.254064	22.105908
MTBM	3309.470383	7659.624225	34944.823998	3617.705008
MRT	95.176002	176.921106	242.254064	21.990827
%Green Time	94.448356	97.430881	99.728379	0.873367
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
% Red Time	0.271621	2.569119	5.551644	0.873367
System Failures	1	5.084000	10	1.586488
R(t=35040.000000) =0.000000				

Figura 79. Resultado de la simulación del segundo escenario para la unidad de alquiler.

Beneficios Económicos del Escenario:**Beneficio obtenido por el escenario planteado:**

$$0,087\% \times 551.880.000,00 \$ = 480.135,60 \$$$

Inversión de adquisición e instalación, costos de operación, mantenimiento y repuestos durante el período de cuatro (4) años:

El costo del ciclo de vida para el presente escenario es de 13.902.905,08\$, y el costo total en el ciclo de vida en el subsistema original es de 13.913.140,24\$. Por lo que, se puede apreciar un ahorro de 10.235,16\$ durante los cuatro años. Esto se justifica por la mejora de la confiabilidad, en que a pesar de hacer una mayor inversión en adquisición e instalación y tener repuestos más costosos, se obtiene un ahorro en los gastos de mantenimiento y operación debido al mejor desempeño de los equipos sustituidos. También se puede distinguir un reflejo de este escenario en la frecuencia de mantenimiento, al observar que para el segundo escenario tenemos una frecuencia de mantenimiento de cada 930,126 horas, y para el subsistema original se tiene una frecuencia de mantenimiento de cada 580,325 horas. Esto concuerda con el mayor tiempo de vida operativa de los equipos, cuyo mejoramiento es significativamente mayor.

Beneficio neto del escenario:

$$480.135,60\$ + 10.235,16\$ = \mathbf{490.370,76\$}$$

El mayor beneficio se obtiene con el segundo escenario.

3^{ER} Escenario: Mejoramiento de la disponibilidad de la instalación a través de las mejoras en los subsistemas reestructurados

Se aprecia que la instalación presenta una mejora del 1,259% en la disponibilidad respecto al estado original de la misma. El tiempo fuera de servicio, para la reparación del sistema total o una gran parte de estos, tiene una ligera variación, no considerable. Ver los resultados en la figura 80. También se observa un incremento en el tiempo medio entre fallas (TMEF) en 13.428,745 horas, referido a la evaluación inicial de la instalación. Por ende, el sistema presenta una frecuencia de mantenimiento mucho menor en el período estudiado, en comparación con el sistema original. Ver los resultados en la figura 81.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.975562524	0.986032026	1.0000000000	0.005459988
MTBDE	6836.742169	>14298.194418	>35040.000000	n/a
MDT (99 runs)	91.197447	169.177355	223.863161	23.124424
MTBM	6836.742169	>14298.194418	>35040.000000	n/a
MRT (99 runs)	91.197447	169.739529	223.863161	22.877921
%Green Time	97.556252	98.603203	100.000000	0.545999
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
% Red Time	0.000000	1.396797	2.443748	0.545999
System Failures	0	2.900000	5	1.100000
R(t=35040.000000) = 0.010000				

Figura 80. Resultados de la simulación del tercer escenario para la unidad de alquiler.

Final Results				
Results from 100 run(s):				
Parameter	Minimum	Mean	Maximum	Standard Dev
Total Costs	0.00	0.00	0.00	0.00
Ao	0.976094657	0.991756843	0.998655919	0.004023454
MTBDE	8009.687647	20442.153884	35338.471269	6664.787687
MDT	15.819383	156.470022	232.843563	56.807414
MTBM	8009.687647	20442.153884	35338.471269	6664.787687
MRT	15.819383	156.470022	232.843563	56.807414
%Green Time	97.609466	99.175684	99.865592	0.402345
%Yellow Time	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
% Red Time	0.134408	0.824316	2.390534	0.402345
Ending Sim Time	8145.724055	20598.623906	35519.272938	6677.276549

Figura 81. Resultados de la simulación del tercer escenario para una falla de la unidad de alquiler.

Beneficios Económicos del Escenario:

Beneficio Económico del escenario planteado durante los cuatro (4) años:

$$1,259\% \times 551.880.000 = 6.948.169,20\$$$

Inversión y costos de operación, mantenimiento y repuestos por la nueva bomba, en el período de cuatro (4) años:

El análisis del ciclo de vida para los escenarios planteados, muestran un ahorro relativamente considerable, en cuanto a que los gastos no superan los de la instalación inicialmente. Por el contrario, el balance económico muestra un ahorro basado en el desempeño de la instalación reestructurada.

Estos ahorros son los siguientes:

$$57.158,30\$ + 10.454,73\$ + 10.235,16\$ = 77.848,19\$$$

Beneficio neto del escenario:

$$6.948.169,20\$ + 77.848,19\$ = \mathbf{7.026.017,39\$}.$$

Es importante aclarar que el estudio del costo del ciclo de vida para este escenario hace referencia al costo del ciclo de vida del sistema original, al compararlo con éste y poder estimar los beneficios.

ANEXO C

GLOSARIO DE TÉRMINOS

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Análisis Preliminar de Peligro (APP). Es un método para identificar peligros durante la etapa de ingeniería conceptual de un proyecto, que permite la identificación temprana de los peligros y concientización por parte del equipo responsable de diseño de proyectos, lo que permite eliminar, minimizar o controlar los peligros desde el inicio del desarrollo de un proyecto.

Análisis Cuantitativo de Riesgo (ACR – “QRA o PRA”). Metodología que permite la cuantificación del riesgo de que un sistema falle basada en la identificación de los modos de falla y el cálculo de sus probabilidades.

AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Fallas). Consiste de un análisis la cual es utilizada para determinar la manera como unidades operativas de una instalación pueden fallar.

Fase de Conceptualización. En esta fase de un proyecto, se pre-planifica el proyecto. La meta es seleccionar la(s) mejor (es) opción (es) y mejora en la precisión de los resultados.

Confiabilidad. Probabilidad que un activo realice su función en un determinado periodo de tiempo.

Confiabilidad desde Diseño (CDD). Aplicación de conceptos, metas y procedimientos de confiabilidad a lo largo de toda la vida del proyecto, es decir, desde la etapa de Definición y Desarrollo hasta la fase de Desincorporación.

Constructibilidad. Es el uso óptimo de todos los conocimientos de construcción y de la experiencia en planificación, diseño, procura y operaciones con el fin de alcanzar todos los objetivos de un proyecto.

Fase de Definición. En esta fase de un proyecto, se planifica la ejecución del proyecto. La meta es definir por completo el alcance de la(s) opción(es) seleccionada(s) y desarrollo de un plan de ejecución detallado que le permita a la corporación comprometer los fondos u obtener el financiamiento requeridos.

Disponibilidad. Porcentaje de tiempo por el cual un activo realiza su función.

Documento de Soporte de Decisión (DSD). Consisten en una recopilación de los documentos más importantes desarrollados en cada fase de un proyecto, en los cuales se encuentran los elementos de juicio que soportan la toma de decisión de sí pasar o no a la siguiente fase del proyecto.

ESDRA (Evaluaciones de Sitio y De Riesgo Ambiental). Las ESDRA evalúan las alternativas de ubicación y tecnológicas con potencial de generación de impactos ambientales, así como aspectos de seguridad ofreciendo al proyecto un marco legal ambiental, susceptible a ser utilizado en el Documento de Intención (DI), permitiendo adicionalmente establecer la franja de seguridad.

F.E.L. (Front End Loading). También conocido como Definición y Desarrollo es cuando se han realizado los pasos necesarios para asegurar, con un alto grado de confiabilidad, que el proyecto se podrá ejecutar en forma exitosa. El FEL comprende las fases de Visualización, Conceptualización y Definición, las cuales cubren el proceso de desarrollo de información estratégica para el dueño, suficiente para analizar el riesgo involucrado y decidir comprometer los recursos necesarios, a fin de materializar la idea, maximizando las posibilidades de éxito.

Gerencia del Riesgo. Un proceso que consiste en controlar el impacto del riesgo dentro de la inversión, los costos operacionales, el tiempo de ejecución, la calidad del proyecto y los objetivos del mercado, mediante la toma de medidas apropiadas para mitigarlo o eliminarlo. Estas medidas deben ser tomadas efectuando, en todo momento, análisis de costo/beneficio para ver si se justifican; o en otras palabras, considerando permanentemente sus posibles impactos en la rentabilidad del proyecto.

HAZOP (“Hazard and Operability Analysis”). Estudio de Peligros y Operabilidad identifica los peligros y los problemas de operabilidad, el cual implica investigar cómo la planta podría desviarse del concepto original de diseño.

HAZROP (“Hazard and Operability Analysis and Reliability Centered Maintenance”). Representa una combinación entre HAZOP y Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC o RCM).

Fase de Implantación. En esta fase, es cuando se materializa el proyecto. Esta fase comienza una vez que se haya realizado una evaluación del estado de completación (grado de definición FEL) de la fase de Definición y Desarrollo. La meta de esta fase es la contratación y materialización del plan de ejecución del proyecto hasta la completación mecánica.

Mantenibilidad. Medida de la facilidad con que un activo puede volver a cumplir su función cuando haya fallado.

MCC (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). Proceso sistemático utilizado para determinar las acciones a tomar para asegurar que el activo cumpla sus funciones para la cual está diseñado dentro de un cierto contexto operacional.

SIL (Safety Integrity Level). Nivel de Integridad de Seguridad consiste de un indicador de desempeño del SIS basado en Probabilidad de Falla en Demanda (PFD) del sistema.

SIS (Sistema Instrumentado de Seguridad). Sistema compuesto por sensores, procesadores lógicos y elementos finales de control, cuyo propósito es llevar el proceso a un estado seguro, cuando condiciones predeterminadas no son mantenidas.

TPPR (Tiempo Promedio para Reparar). Tiempo promedio para restablecer la(s) función(es) satisfactoriamente de un activo.

Fase de Visualización. Esta constituye la primera fase en la ejecución de proyectos y forma parte de etapa de Definición y Desarrollo. En esta fase se planifica el negocio. La meta es la identificación del proyecto para el plan de negocios y asegurara su alineación con los objetivos del negocio.

Utilización del Activo (UA). Es la medida de manufactura que combina la disponibilidad (utilización de la instalación) con las ventas.