

OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA PARA EL MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD.

**ANDRÉS IVÁN CARRASCAL PEÑALOZA
VICTOR ENRIQUE RUEDA ZAPATA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO- MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2007

OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA PARA EL MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD.

**ANDRÉS IVÁN CARRASCAL PEÑALOZA
VICTOR ENRIQUE RUEDA ZAPATA**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar al título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

**Director
Royman López Botero
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO- MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2007**

*A mi esposa e hijas por su
comprensión y apoyo para el logro
de esta meta.*

Víctor Enrique

A mis padres que con su constante apoyo, han sido la fuente de mi motivación y tenacidad.

Andrés Iván

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La Refinería de Cartagena S.A. (RCSA) por brindar el espacio y poner a disposición los recursos para la elaboración de esta monografía.

Carlos Arturo Vargas, Coordinador de la Unidad de Servicios Industriales por su valiosa colaboración.

Wilson De Las Salas, Ingeniero de Procesos de la Unidad de Servicios Industriales por su valiosa colaboración.

A los compañeros de trabajo que creyeron en el resultado de esta tesis y nos brindaron su colaboración y apoyo en todo sentido.

Ingeniero Carlos Ramón González, Coordinador de la Especialización en Gerencia de Mantenimiento.

A cada uno de los profesores de la Especialización en Gerencia de Mantenimiento, por brindar su mejor esfuerzo en transmitirnos los conocimientos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	16
OBJETIVO	18
OBJETIVO GENERAL	18
OBJETIVO ESPECIFICO	18
1. REFINERÍA DE CARTAGENA S.A.	19
1.1. HISTORIA DE ECOPETROL	19
1.2. GENERALIDADES DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA	21
1.3. GENERALIDADES DE LA UNIDAD DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA S.A.	21
1.3.1.Generalidades sobre las Calderas de la Unidad de Servicios Industriales.	23
1.3.2. Generalidades Sistema de Turbo Generadores	25
1.3.3. Generador Eléctrico	33
1.3.4. Gestión de mantenimiento en la refinería de Cartagena	38
1.3.5. Confiabilidad e Integridad de Activos	39
1.3.6.Eliminación de Defectos	40
1.3.7. Volumen de Trabajo Óptimo	40
1.3.8. Máxima Eficiencia de Ejecución	40
1.4. ORGANIZACIÓN DE MANTENIMIENTO DE REFINERÍA DE CARTAGENA S.A.	41
2. ESTADO DEL ARTE DEL USO DE HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD PARA OPTIMIZAR EL MANTENIMIENTO	43
2.1. CONCEPTO DE CONFIABILIDAD	45
2.1.1. Factores de Confiabilidad	46
2.2. HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD	48
2.2.1. Análisis de Modos y Efectos de Fallas y Criticidad (FMECA)	48
2.2.2. Análisis de Confiabilidad	49

2.2.3. Análisis Estadísticos	50
2.3. METODOLOGÍA DE MEJORAMIENTO CONTINUO CAPDO	50
2.4. WEIBULL	53
2.4.1. La Curva de la Bañera	54
2.5. NUMERO DE PRIORIDAD DE RIESGO	56
2.6. ENFOQUE “KANTIANO” DE LA ORGANIZACIÓN DE MANTENIMIENTO.	56
3. IMPLEMENTACION DE HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD PARA OPTIMIZAR LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO	59
3.1. DESCRIPCIÓN SITUACIÓN ACTUAL	59
3.1.1. Alcance	60
3.2. MODELO DE OPTIMIZACION DEL MANTENIMIENTO APLICADO HERRAMIENTA DE CONFIABILIDAD EN TUBOS GENERADORES DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA S.A.	60
3.2.1. Esquema del Modelo	61
3.2.2 Sistema de Información	63
3.2.3 Determinación y jerarquización de modos de fallos (FMECA)	64
3.3. VALORACIÓN DE LOS MODOS DE FALLAS	67
3.3.1 Falla de las Tarjetas Eléctricas	68
3.4. ANALISIS ESTADISTICO	70
3.5. ANALISIS DE PROPUESTAS PARA CADA MODO DE FALLA	73
3.5.1. Oportunidad de mejora de mantenimiento para Falla de tarjeta electrónica	73
3.5.2. Modo de falla de chumacera por alta vibración	76
3.5.3. Modo de falla del sistema Woodward	79
3.5.4. Error Humano	84
CONCLUSIÓN	86
BIBLIOGRAFÍA	87

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Sistema de Generación	23
Figura 2	Construcción de Caldera Acuotubular	24
Figura 3	Esquema del Sistema de Generación de Energía Eléctrica	25
Figura 4	Turbogeneradores	27
Figura 5	Gobernador WOODWARD 509 DCS	30
Figura 6	Condensador de Superficies	31
Figura 7	Sala de Turbogeneradores	33
Figura 8	Estructura del proceso de mantenimiento sostenible	39
Figura 9	Organigrama de la Refinería de Cartagena S.A	42
Figura 10	Confiabilidad Operacional	46
Figura 11	Ciclo de mejora continua	51
Figura 12	Curva de la bañera	54
Figura 13	Niveles o categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico	57
Figura 14	Numero de fallos del sistema de generación	59
Figura 15	Modelo de Mantenimiento	62
Figura 16	Sistema de información PI, (Visualización)	63
Figura 17	Representación grafica de la Frecuencia de las fallas	66
Figura 18	Matriz de análisis de Riesgo y Priorizacion de trabajos.	67
Figura 19	Análisis de riesgo del sistema de generación por falla den tarjeta electrónica	68
Figura 20	Representación grafica de falla Vs tiempo de componentes electrónicos	74
Figura 21	Representación grafica de falla Vs tiempo de elementos presentando comportamiento de mortalidad infantil	76
Figura 22	Simulación Weibull de confiabilidad	80
Figura 23	Grafica de Tiempo Optimo para intervenir Sistema Woodward	83

LISTA DE TABLAS

	Pág.	
Tabla 1	Generadores eléctricos	25
Tabla 2	Características de generadores de la Refinería	34
Tabla 3	Parámetros de temperatura de los embobinados del estator	35
Tabla 4	Modos de fallas de Turbo Generadores	65
Tabla 5	Valoración de los Modos de Falla	69
Tabla 6	Generación de l sistema en condición normal	71
Tabla 7	Generación del sistema con un turbo generador pequeño fuera de servicio	71
Tabla 8	Generación del sistema con un turbo generador grande fuera de servicio	72
Tabla 9	Principales modos de fallas y su valoración del impacto en pesos por evento ocurrido	73
Tabla 10	Estrategias de mantenimiento a implementar en cada nivel	75
Tabla 11	Numero de fallas presentado por turbo SPTG 2	77
Tabla 12	Numero de falla presentada por turbo SPTG 3	77
Tabla 13	Recomendaciones para mejorar confiabilidad de reparación de chumaceras	79
Tabla 14	Análisis de costo de mantenimiento	82
Tabla 15	Acciones recomendadas para atacar las fallas del Sistema de gobierno (Woodward)	83
Tabla 16	Acciones recomendadas para minimizar las fallas ocasionadas por error humano	84

RESUMEN

TITULO: OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGÍA PARA EL MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD.

AUTORES: ANDRÉS IVÁN CARRASCAL PENALOZA Y VÍCTOR ENRIQUE RUEDA ZAPATA.

PALABRAS CLAVES: PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA, TURBO GENERADORES, CONFIABILIDAD, MODOS DE FALLA, RIESGO, CURVA DE LA BAÑERA, CICLO MEJORAMIENTO CONTINUO PHVA.

DESCRIPCIÓN: Esta monografía se baso en el uso de herramientas de confiabilidad para optimizar la estrategia de mantenimiento de los equipos de generación de energía eléctrica de la Refinería de Cartagena S.A., el cual permitirá la transformación de la actual estrategia de mantenimiento en una mas eficiente, para lo cual se recurrió a la conceptos y herramientas de confiabilidad, pretendiendo así plantear oportunidades de mejora o estrategias a implementar para mejorar la eficacia de las acciones actualmente realizadas.

Este trabajo se desarrollo en tres capítulos en los cuales, en el capítulo uno, se hace una descripción que parte de lo universal y llega a lo particular detallando los componentes principales de la generación de vapor, generación de energía eléctrica y la organización del mantenimiento mediante la presentación de sus recursos, índices de gestión costos y problemática vigente. En el capítulo dos se describen los aspectos fundamentales de las herramientas de confiabilidad tales como análisis de falla y herramienta para la valoración de riesgo enmarcado en la metodología de mejoramiento continuo PHVA y así brinda la oportunidad de desarrollar el siguiente capitulo.

*Monografía

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Director: Royman López Botero, ingeniero mecánico

Capítulo este considerado el tercero en el cual en cada uno de los niveles de mantenimiento, los autores de esta monografía, se proponen identificar las oportunidades de mejora que se pudiesen implementar a la estrategia actual, clasifican las acciones a implementar dentro de cada una de las ramas de la confiabilidad a la cual van dirigidas y se realiza un presupuesto de su implementación para así finalmente mostrar, al lector, la confiabilidad como una estrategia para gerenciar los activos.

*Monografía

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento,
Director: Royman López Botero, ingeniero mecánico

BRIEF

TITLE: OPTIMIZATION OF THE MAINTENANCE STRATEGY FOR ELECTRIC POWER GENERATION EQUIPMENT IN THE CARTAGENA REFINERY USING RELIABILITY TOOLS

BY: ANDRÉS IVÁN CARRASCAL PEÑALOZA AND VÍCTOR ENRIQUE RUEDA ZAPATA

KEYWORDS: ELECTRIC POWER GENERATION PLANT, TURBO-GENERATOR, RELIABILITY, FAILURE MODES, RISK, BATHTUB CURVE, CONTINUOUS IMPROVEMENT CYCLE (PHVA).

DESCRIPTION: This document is based in reliability tools use focused to optimize maintenance for electric power generation machinery in Cartagena Refinery; these tools allow increasing maintenance effectiveness employing reliability concepts and tools discovering opportunities of improvement and strategies for increasing effectiveness of actual labors.

This document has been developed in three chapters, in chapter one, universal and detailed description are made detailing the main components in steam generation, power generation and maintenance organization showing resources, cost management indexes and actual situation. In chapter two, are described basic aspects of reliability tools such as failure analysis and risk assessment according with continuous improvement methodology (PHVA), that offers the opportunity to develop the next chapter.

*Monograph

**School of Physical-Mechanical Engineering. Specialization in Management of Maintenance.
Director: Royman López Botero, mechanical engineer.

Chapter three treats about each maintenance levels, so authors propose to identify improvement opportunities intended to be implemented in actual strategy, these actions are classified in correspondent reliability branches, for each one a budget is made, then, finally is showed the reliability as an strategy for actives management.

*Monograph

**School of Physical-Mechanical Engineering. Specialization in Management of Maintenance.
Director: Royman López Botero, mechanical engineer.

INTRODUCCIÓN

La Refinería de Cartagena S.A., con el propósito de establecer procesos de mantenimiento de clase mundial que permitan en el tiempo el aumento de la eficiencia, la maximización de los recursos y la disminución de los costos que afectan el margen de refinación del barril de crudo, ha establecido un objetivo estratégico de excelencia en todas las operaciones. Para ello ha generado toda una interacción de revisión y mejoramiento continuo, que se ha extendido a la Superintendencia de Servicios Técnicos, área que es consciente de la problemática actual de las Coordinaciones que dependen de la misma como son la Coordinación de Mantenimiento Día a Día, Administración de Proyectos y Paradas de Plantas, de Materiales e Inspección. Estas coordinaciones que no han implementado completamente un modelo moderno y unificado de Gestión de Mantenimiento acorde con el tamaño de la organización en la Unidad de Servicios Industriales, como si lo ha hecho en las demás plantas, donde han implementado técnicas, filosofías y metodologías que han optimizado los tiempos para reparación y disminuido el número de paradas no programadas.

El alcance de este trabajo se sustenta en el diseño de una Estrategia que brinde un mejoramiento de indicadores a una planta cuya importancia, debido a que supe todas las necesidades de Servicios Industriales a las demás, es alta y permitirá modernizar su modelo actual de gestión de mantenimiento y consolidarse en el tiempo como una Unidad de clase mundial, administrando de manera eficientemente el ciclo de vida de los activos a su cargo, los cuales se agrupan, principalmente en los Turbogeneradores y sus componentes.

Para el desarrollo del proyecto se estableció un reconocimiento de las mejores estrategias y fundamentos de confiabilidad junto con estadísticas de operación y

falla de equipos, aplicados todos ellos a desarrollar recomendaciones que eleven la disponibilidad de los equipos, disminuir los tiempos necesarios para reparación, aumentar los tiempos medios entre fallas y establecer ventanas operativas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal es establecer acciones de mantenimiento a diferentes niveles con el propósito de mejorar la mantenibilidad y confiabilidad de los equipos generadores de energía eléctrica de la Refinería.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hacer un reconocimiento de las mejores prácticas y herramientas de confiabilidad existentes, tales como: Fmeca, Weibull, análisis riesgo costo beneficio y modelo de mejoramiento continuo.
- Diseñar una estrategia de mantenimiento para los equipos de generación eléctrica de la refinería de Cartagena listando acciones a realizar en cada nivel del mantenimiento.
- Determinación de los principales modo de falla que afectan los equipos en estudio y su valoración.
- Identificar las acciones de mantenimiento como un proceso de mejoramiento continuo.

1. REFINERÍA DE CARTAGENA S.A.

1.1. HISTORIA DE ECOPETROL

La reversión al Estado Colombiano de la Concesión De Mares, mediante la ley 165 de 1951, dio origen a la Empresa Colombiana de Petróleos el 25 de Agosto de 1951.

La naciente empresa asumió los activos revertidos de la Tropical Oil Company que en 1921 inició la actividad petrolera en Colombia con la puesta en producción del Campo La Cira-Infantas en el Valle Medio del Río Magdalena, localizado a unos 300 kilómetros al nororiente de Bogotá.

Ecopetrol emprendió actividades en la cadena del petróleo como una Empresa Industrial y Comercial del Estado, encargada de administrar el recurso hidrocarburífero de la nación, y creció en la medida en que otras concesiones revirtieron y fueron incorporadas a su operación.

En 1961 asumió el manejo directo de la refinería de Barrancabermeja. Trece años después compró la Refinería de Cartagena, construida por Intercol en 1956.

En 1970 adoptó su primer estatuto orgánico que ratificó su naturaleza de empresa industrial y comercial del Estado, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, cuya vigilancia fiscal es ejercida por la Contraloría General de la República.

La empresa funciona como sociedad de naturaleza mercantil, dedicada al ejercicio de las actividades propias de la industria y el comercio del petróleo y sus afines, conforme a las reglas del derecho privado y a las normas contenidas en sus estatutos, salvo excepciones consagradas en la ley (Decreto 1209 de 1994).

En septiembre de 1983 se produjo la mejor noticia para la historia de Ecopetrol y una de las mejores para Colombia: el descubrimiento del Campo Caño Limón, en asocio con OXY, un yacimiento con reservas estimadas en 1.100 millones de millones de barriles. Gracias a este campo, la Empresa inició una nueva era y en el año de 1986 Colombia volvió a ser en un país exportador de petróleo.

En los años noventa Colombia prolongó su autosuficiencia petrolera, con el descubrimiento de los gigantes Cusiana y Cupiagua, en el Piedemonte Llanero, en asocio con la British Petroleum Company.

En 2003 el gobierno colombiano reestructuró la Empresa Colombiana de Petróleos, con el objetivo de internacionalizarla y hacerla más competitiva en el marco de la industria mundial de hidrocarburos.

Con la expedición del Decreto 1760 del 26 de Junio de 2003 modificó la estructura orgánica de la Empresa Colombiana de Petróleos y la convirtió en Ecopetrol S.A., una sociedad pública por acciones, ciento por ciento estatal, vinculada al Ministerio de Minas y Energía y regida por sus estatutos protocolizados en la Escritura Pública número 2931 del 7 de julio de 2003, otorgada en la Notaría Segunda del Circuito Notarial de Bogotá. D.C.

Con la transformación de la Empresa Colombiana de Petróleos en la nueva Ecopetrol S.A., la Compañía se liberó de las funciones de Estado como administrador del recurso petrolero y para realizar esta función fue creada Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)

A partir de 2003, Ecopetrol S.A. inició una era en la que, con mayor autonomía, ha acelerado sus actividades de exploración, su capacidad de obtener resultados con visión empresarial y comercial y el interés por mejorar su competitividad en el mercado petrolero mundial

1.2. GENERALIDADES DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA.

La Refinería de ECOPETROL S.A. se inició en los años cincuenta, cuando la Internacional Petroleum Co. Ltd. se comprometió a construir una Refinería en el Norte de Colombia, para atender los requerimientos de la Región Caribe y los del Occidente Colombiano.

En 1974 ECOPETROL compró la Refinería a Intercol, por un precio de 35 millones de dólares, valor que incluyó el 40% de las acciones del Oleoducto del Pacífico, perteneciente también a Intercol.

En la actualidad, la refinería cuenta con seis plantas, que tienen a su cargo el proceso de refinación del petróleo, como son: Planta Eléctrica, Planta de Materias Primas y Productos, Planta de Crudo, Planta Viscosreductora, Planta de Tratamiento de Productos y Planta de Cracking, esta última se divide en sección de livianos, Planta de Polimerización, Planta de Aminas y Planta de Azufre.

1.3. GENERALIDADES DE LA UNIDAD DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA S.A.

Como parte de los servicios industriales que suministra la Unidad de Servicios Industriales y que son utilizados en el proceso de refinación se tienen las diferentes plantas: planta de Agua, planta de Aire y planta de generación Eléctrica y vapor:

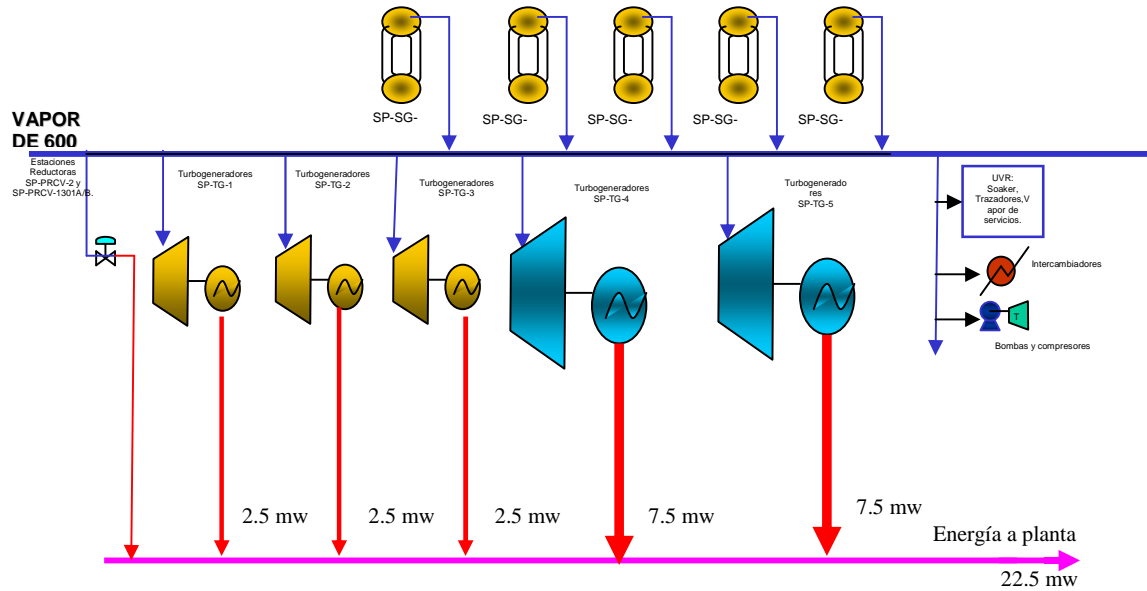
- Planta de Agua: es la sección encargada de producir agua de diversas calidades (industrial, potable, desmineralizada y condensados) para los diferentes consumos como son: enfriamiento, generación de vapor, consumo en el proceso y consumo humano.
- Planta de generación Eléctrica y vapor: En esta sección se encarga de producir vapor, por medio del uso de 5 calderas acuatubulares, el cual se usa básicamente para impulsar 5 turbogeneradores y turbinas de diferentes equipos en las diferentes Unidades de Proceso; Además se cuenta con estaciones reductoras de presión o por extracción de las turbinas con el fin de generar vapor de media presión (160 psig) para mover otras turbinas y para el calentamiento y despojo de torres; finalmente, se produce vapor de baja presión, (15 psig), el cual es un producto residual de las turbinas de media

presión y es usado en los desaireadores de agua de la planta de servicios industriales.

- Planta de aire: esta es la sección encargada de producir aire industrial para mantenimiento y para instrumentación, esto se obtiene mediante el uso de compresores de tornillo y de pistón, estos toman aire de la atmósfera y lo elevan a 80 Psi de presión, para usarlo como aire de mantenimiento o aire de proceso y, secándolo previamente, como aire de instrumentos.

Parte de los equipos que componen la Unidad de Servicios Industriales y que serán objeto de la optimización en la estrategia de mantenimiento, se circunscriben a los Turbogeneradores de la Unidad, una breve descripción gráfica de la unidad puede ser apreciada en la Figura 1.

Figura 1 Sistema De Generación De Corriente Eléctrica De La Refinería De Cartagena



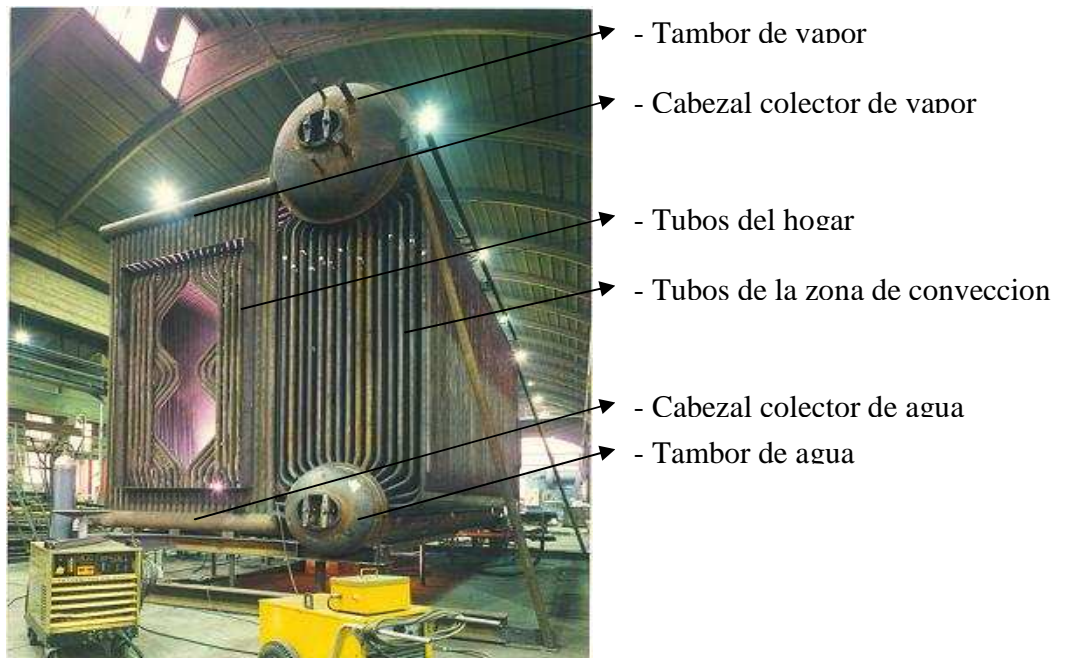
1.3.1. Generalidades sobre las Calderas de la Unidad de Servicios Industriales.

De manera sencilla una caldera se puede definir como un recipiente cerrado en el cual el agua se evapora en forma continua por la aplicación de calor por medio de gases. Estos gases generalmente son producto de la quema de un combustible fósil en el horno u hogar de la caldera, aunque pueden ser también el producto de un proceso como los gases resultantes de reacciones en las unidades de ruptura catalítica o gases de combustión de una turbotas (calderas de recuperación). El objetivo de una caldera, es generar vapor con la máxima eficiencia posible en la transferencia de calor, definiendo esta de una manera sencilla como la porción de calor liberado en el horno que es absorbido por los fluidos en los elementos de la caldera.

En la planta se producen tres clases de vapor, Vapor de 600 psig., Vapor de 160 psig., Vapor de 15 psig.

Las calderas usadas en la refinería de Cartagena son de tipo acuatubular ver figura 2 y están conformadas por 1 un tambor superior o tambor de vapor, un tambor inferior o tambor de lodos, 2 (dos) cabezales inferiores colectores de agua, dos cabezales superiores colectores de vapor, un (1) recalentador de vapor, sistema de purgas continua e intermitente, sistema de combustible y un (1) economizador.

Figura 2 Caldera Acuatubular



o Capacidad de las calderas:

La capacidad de las calderas de la refinería, por diseño son las siguientes:

Tabla 1 Capacidad de generación de las calderas de la planta

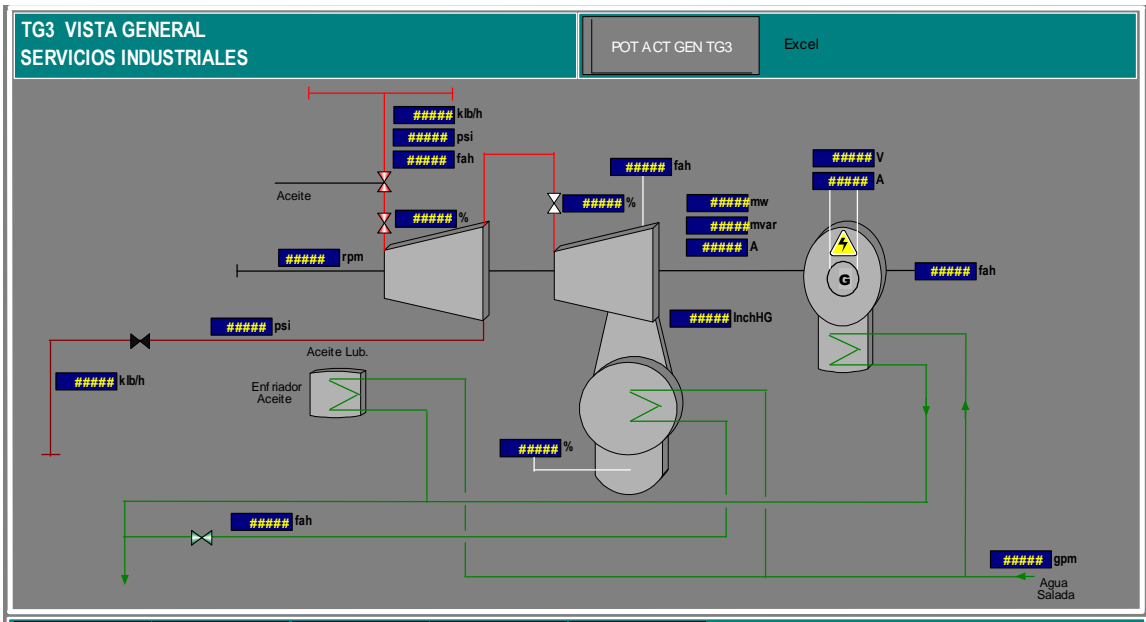
SG- 101	SG-102	SG-103	SG-104	SG-1005
---------	--------	--------	--------	---------

150 Klbs/hora	150 Klbs/hora	150 Klbs/hora	140 Klbs/hora	150 Klbs/hora
---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

1.3.2. Generalidades Sistema de Turbo Generadores

El sistema de generación de corriente eléctrica comprende del siguiente esquema ver Figura 3

Figura 3. Esquema del Sistema de Generación de Energía Eléctrica



Turbogeneradores:

El sistema de turbo generadores tienen como base de diseño el principio de reacción. El vapor de 600 psi proveniente de la calderas se expande en las boquillas estacionarias, cambia la presión en energía de movimiento, alcanzando

una alta y relativa velocidad de chorro, que al paso por los alabes rotatorios, impulsa el eje de la turbina y consecuentemente, el eje del generador.

Las turbinas generalmente tienen montajes de varias etapas en serie, su número depende sobre todo, de la presión y temperatura del vapor de entrada, la presión del exhosto, la velocidad y los rendimientos requeridos.

Las turbinas están protegidas contra los excesos de velocidad por un gobernador de velocidad y un mecanismo de disparo.

Para los turbos SPTG1, SPTG2 Y SPTG 3 parte del vapor es retirado desde algún punto intermedio como vapor de extracción con presión controlada, por medio de un dispositivo de extracción.

Con el propósito de condensar el vapor expandido a través de las últimas etapas, la turbina opera al vacío. Un sistema de vapor de sello evita la entrada de aire al condensador de superficie desde las empaquetaduras de la turbina.

Actualmente la planta cuenta con cinco turbogeneradores que generan un total de 22.500 Kw/h a un voltaje de 4.160 V., de las cuales se dispone con 3 turbos generadores, SPTG-1, SPTG-2, SPTG-3 de 2500 kw cada uno y 2 turbos de 7500 kw , SPTG 4 y SPTG 5 respectivamente. (Ver figura 4)

Figura 4. Turbogeneradores



Dentro de los elementos constitutivos de una una turbina se encuentran los siguientes:

El rotor.

Es una serie de ruedas de alabes (13 ruedas en los TG-1, 2 y 3 y en los TG-4 y 5 15 ruedas) configurados sobre un mismo eje. Dichos alabes, por la acción del vapor, procedente de las boquillas estacionarias girando, por consiguiente, movimiento rotatorio al eje y son clasificadas en dos secciones: Etapa de alta presión que comprende las ruedas del 1 al 10 (la primera rueda es de doble alabe) y la etapa de baja presión que consta de las ruedas 11, 12 y 13 (en TG-4 y 5 de la 11 a la 15).

Chumaceras.

El eje de la turbina descansa sobre dos chumaceras; la de adelante llamada chumacera de alta presión ó chumacera de empuje y la de atrás llamada chumacera principal. La superficie de contacto del eje con la chumacera (recubierta en babbit) está permanentemente lubricada con aceite procedente del sistema de lubricación a una presión de 15 psig.

Regulador de vapor de sello.

Es el mecanismo encargado de suministrar automáticamente el sello para todas las condiciones entre la operación sin carga y con carga total, el regulador de vapor de sello mantiene en cada empaquetadura, una presión de sello un poco por encima de la presión atmosférica.

Las dos empaquetaduras del eje de la turbina están conectadas a un sistema que proporciona los medios para disponer del vapor que escapa por los anillos de la empaquetadura de alta presión, y suministra vapor de sello para prevenir la entrada de aire a la turbina.

Sistema de aceite de lubricación y Control

Este sistema se divide en dos sistemas; de lubricación e hidráulico de control. El primero tiene por objeto lubricar las chumaceras de la turbina y del generador y el segundo proporciona un medio hidráulico de fuerza para operar el sistema de gobierno y control de la turbina.; ambos sistemas tienen en común una bomba principal de lubricación que trabaja acoplada al eje de la turbina, en su extremo, una bomba auxiliar, para arranque inicial y apagada del turbogenerador, movida por una turbina a 11.000 rpm, un tanque, deposito de aceite con capacidad para 600 galones.

La descarga de la bomba se divide en dos ramales; uno hacia el sistema de lubricación y otro hacia el sistema de control hidráulico.

Sistema de aceite de lubricación.

El aceite descarga hacia este sistema, pasa por un regulador de presión que la reduce de 55 a 14 psig y luego a una válvula de 3 vías con la cual el aceite se desvía a los enfriadores de aceite.

Después de los enfriadores, el aceite pasa por un par de filtros tipo canasta para luego distribuirse en varias tuberías que llegan a las siguientes partes:

- Chumacera de alta presión de la turbina
- Chumacera principal de la turbina
- Chumacera lado este del generador
- Chumacera lado oeste del generador
- Piñones de acople para la bomba principal lubricación

El aceite en las chumaceras tiene por objeto disminuir la fricción entre el eje y la chumacera pues forma una película soporte entre ellos y esta condición es monitoreada por transmisores de temperatura, Tl's y alarma en el cuarto de control.

Sistema de control hidráulico

Uno de los ramales en que se divide la descarga de la bomba de lubricación y se convierte en el sistema hidráulico de control o gobierno (válvulas) y de disparo de emergencia (válvula trip o de estrangulación). Este sistema debe permanecer en 55 psig. Si trata de subir, una válvula de relevo descarga hacia el tanque el exceso de presión.

Sistema de control de velocidad de las turbinas:

Los parámetros de velocidad y presión de extracción son controlados simultáneamente por el gobernador WOODWARD 509 DCS y actuadores que posicionan las válvulas piloto, tanto en la admisión como en la extracción.

El gobernador WOODWARD 509 DCS ha sido diseñado principalmente como elemento controlador de velocidad. Las referencias de velocidad y extracción pueden ajustarse manual o automáticamente.

Figura 5. Gobernador WOODWARD 509 DCS



Condensador De Superficie

Todo el vapor exhausto de la turbina pasa al condensador de superficie donde se condensa mediante intercambio de calor con agua de mar. Este condensado es sacado por bombas y es enviado al cabezal de condensado que lo lleva hacia los desaireadores del agua de alimentación a las calderas.

La condensación se lleva a cabo por medio de enfriamiento y vacío.

Figura 6. Condensador de Superficies.



Generalidades del sistema de agua de enfriamiento.

El sistema de agua de enfriamiento a turbogeneradores, se encuentra alimentado desde una sola fuente (el cabezal de agua salada), sobre la cual se tienen mediciones de flujo, presión y temperatura, para cada uno de los turbogeneradores.

Este sistema posteriormente se divide en tres circuitos independientes:

- Circuito de enfriamiento del condensador de superficie.
- Circuito de enfriamiento a enfriadores de aceite.
- Circuito de enfriamiento del aire de refrigeración del generador.

Las mediciones de presión diferencial permiten detectar eventuales taponamientos en la tubería de los circuitos, así como también roturas de los tubos o carcasa de los enfriadores. Adicionalmente, como ayuda al operador en el seguimiento del comportamiento de los turbogeneradores, se cuenta con mediciones directas en el recinto interno de los enfriadores de aire, de las temperaturas del aire en las entradas al generador (aire frío) y en la salida (aire caliente). Se tiene también un medidor de humedad relativa del aire de salida del enfriador.

Enfriadores de aire

El enfriador de circuito cerrado es un intercambiador de calor de tubos con la superficie de intercambio de calor del enfriador consiste de tubos de sección circular con aletas continuas de platina delgada fijadas a ellos. Las paredes laterales son parte integral del enfriador y están fijadas a las placas de los tubos.

El aire caliente fluye por encima de las aletas exteriores de los tubos y transmite el calor al fluido que pasa por el interior.

Los cabezales (llamados boquilla y cabezal de retorno) manejan el agua. El número de deflectores de separación conforman el número de pasadas del agua. Los cabezales van conectados a las placas de tubos, con empaques intermedios para proporcionar sello. Tapones o grifos en los cabezales sirven para ventilación y drenaje.

Los materiales para los cabezales, aletas y tubos se han escogido de acuerdo con las especificaciones del agua de enfriamiento usada y las condiciones específicas de servicio.

El enfriador está localizado de tal forma que el aire pasa por él y por la máquina en un circuito cerrado (aire movido por ventilación forzada).

Cada generador tiene dos enfriadores, que operan en forma continua; en caso de quedar fuera de servicio, limita la carga del generador a 67% de su capacidad nominal.

1.3.3. Generador Eléctrico

Los generadores eléctricos son dispositivos capaces de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos, llamados polos, terminales o

bornes. Los generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si mecánicamente se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se generara una fuerza electromotriz (F.E.M.).

Figura 7. Sala de Turbogeneradores.



Los generadores instalados en la refinería de Cartagena, son generadores sincrónicos con rotor cilíndrico, marca Siemens, con las siguientes características principales.

Tabla 2 Características de generadores de la Refinería

	Potencia nominal (Kva)	Voltaje Estator / Rotor (Volts)	Corriente Estator / Rotor (Amp)
Gen. # 1,2,3	3125	4160 / 46	434 / 373
Gen. # 4,5	9375	4160 / 61	1301 / 540

Factor de potencia: 0,8. Frecuencia: 60 Hz. Velocidad: 3600 rpm. Sentido de giro: Contrario a las manecillas del reloj, visto desde la turbina. Conexión de las fases del sistema en secuencia positiva: U_1 V_2 W_3 . y cuenta con los siguientes componentes constitutivos:

Rotor

Consiste del eje, que gira sobre dos cojinetes con pedestal, el embobinado de campo, las cuñas de las ranuras, las cubiertas de los finales de las bobinas y las aletas para ventilación.

El eje es de acero forjado con tratamiento térmico. El embobinado de campo está insertado en las ranuras del cuerpo del rotor, internamente conectado, y conectado externamente a la excitatriz estática mediante conductores a través del eje. Está compuesto de secciones individuales de conductores de cobre planos colocados concéntricamente alrededor de los polos. Las vueltas de todas las bobinas están conectadas en serie y los extremos finales conectados a los anillos rozantes. El rotor es enfriado directamente con aire a través de ranuras radiales. El rotor esta acoplado directamente al eje de la turbina, con acople rígido.

Estator

Se compone de la carcaza, el núcleo y el embobinado de estator. El embobinado es de doble capa, colocado en ranuras dentro del estator.

La carcaza se compone de una parte interior en forma de envoltura anular que cubre el embobinado, y una parte exterior que proporciona el grado de protección requerida por el generador.

El núcleo del estator está formado de paquetes de láminas de material de bajas pérdidas, aisladas entre sí con recubrimiento de barniz. Las ranuras están estampadas en la parte circular interior de las laminaciones. Para guiar y asegurar con pernos el núcleo a la carcaza se tienen agujeros en la periferia exterior de las laminaciones. Las bobinas del estator han sido impregnadas al vacío con resina sintética y calentadas, para curar el devanado. El aislamiento de los conductores individuales o capas consiste de una delgada cinta de fibra de vidrio y mica (aislamiento clase F). La temperatura del embobinado del estator se monitorea mediante termómetros de resistencia embebidos en el devanado para protegerlo de sobrecargas térmicas. Se entiende por sobrecarga térmica un exceso de temperatura que puede dañar el aislamiento o acortar considerablemente su vida; si se alcanza esta temperatura se generará una señal de alarma o la máquina parará automáticamente.

Tabla 3 Parámetros de temperatura de los embobinados del estator

	Embobinado de Estator	Entrada de Aire 1	Entrada de Aire 2	Salida de Aire 2
Temperatura máxima de operación continua.	125° C	36° C	36° C	70° C
Alarma por temperatura	128° C	39° C	39° C	73° C
Disparo por temperatura	131° C	42° C	42° C	76° C

Cubierta Exterior

La cubierta conduce la corriente de aire refrigerante, proporciona protección contra contactos con piezas energizadas, impide la introducción de cuerpos extraños al interior de la máquina y mediante un recubrimiento interior de material que absorbe sonido, disminuye la salida del ruido del generador al exterior; está fijada al marco de la base mediante pernos, maquina pero tiene aberturas adecuadamente localizadas para permitir los trabajos de mantenimiento.

Anillos Rozantes

Proporcionan el medio de transferencia de corriente entre las escobillas estacionarias y el rotor.

Los anillos rozantes se encuentran en un compartimiento separado del generador, sobre una plataforma adicionada a la base de la carcasa.

El aire de enfriamiento del generador refrigera también este compartimiento, un flujo nominal de $3,2 \text{ m}^3 / \text{seg.}$, entra por un canal en la parte superior de la cubierta, pasa por los anillos rozantes y sale a través de un filtro. El filtro de aire se controla mediante un manómetro que mide la presión diferencial de entrada y salida y actúa sobre una alarma cuando esta presión llega a $300 \text{ N} / \text{m}^2$

Sistema anticondensación

El sistema de resistencias anticondensación consiste de varios calentadores de espacio conectados a una fuente de energía común y distribuidos en la máquina de manera que calienten el aire que llega a las partes activas, para mantenerlas a una temperatura mayor que la del ambiente, evitando condensación, sin que se produzca deterioro del aislamiento por la temperatura de la superficie de los calentadores.

La caja de control contiene también un interruptor manual para desconexión permanente y lámparas indicadoras roja (desconectado), verde (conectado).

Interconexión con la red externa

El sistema eléctrico de la Refinería de Ecopetrol, además de cubrir la demanda propia, tiene la posibilidad recibir o entregar energía de la red externa; sin embargo, en operación normal, la red de la central eléctrica no está conectada a la red externa; los turbogeneradores alimentan la refinería operando en “**modo aislado**”.

En el caso de la central eléctrica conectada a la red externa, la potencia eléctrica generada debe ser la suficiente para cubrir la demanda interna y entregar a la red externa una potencia determinada, ajustable a través de la OMw hasta 6 Mw. Este límite superior al que se puede seleccionar el set-point lo determina la suma de las cargas permitidas en los turbogeneradores y la disponibilidad de vapor de 600 psi, excluyendo la demanda propia calculada para la Refinería y la suma de los flujos de vapor de 600 psi extraídos de las calderas. La demanda propia es el valor total de la potencia eléctrica generada, menos la potencia entregada a la red externa.

El límite inferior del set-point de la potencia a entregar a la red externa está limitado por la capacidad del transformador de enlace con la red, considerando sus capacidades **máxima y continua** y por un valor de “**set-point de potencia entregada mínima**”, ajustable.

1.3.4. Gestión de mantenimiento en la refinería de Cartagena.

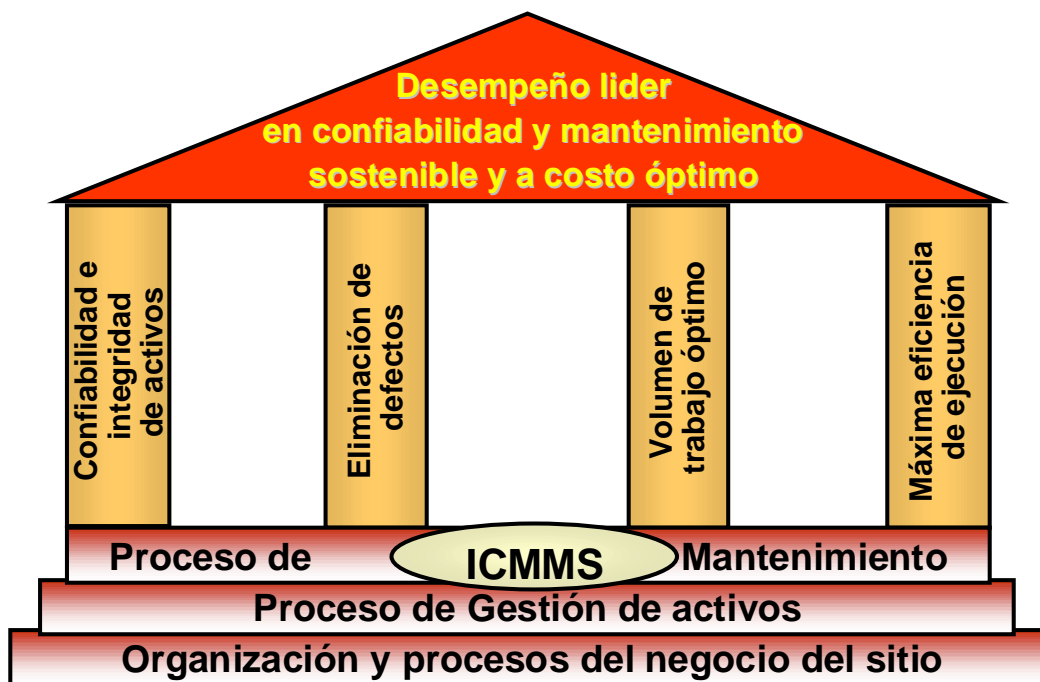
La gestión y desarrollo del procesos de mantenimiento ha sido el resultado del Proyecto de Optimización de Refinerías (POR), contrato que ejecuto Shell Global Solutions (SGS) y que tuvo como plazo de ejecución hasta el año 2006, éste, impulsó el papel determinante de Mantenimiento como base que soporta los

pilares de la organización del negocio, apoyándose en un sistema de información robusto y confiable como lo es el sistema ELLIPSE.

Los CUATRO pilares que sostienen el andamiaje del desempeño confiable, el mantenimiento sostenible a costo óptimo son los siguientes, ver Fig. 1:

- **Confiabilidad e Integridad de Activos.**
- **Eliminación de defectos.**
- **Volumen de trabajo óptimo.**
- **Máxima eficiencia de ejecución.**

Figura 8. Estructura del proceso de mantenimiento sostenible



1.3.5. Confiabilidad e Integridad de Activos.

Como respuesta al primer pilar del andamiaje, actualmente se están desarrollando e implementando programas de mantenimiento basados en técnicas de confiabilidad que responden apropiadamente a las necesidades del negocio, como son: Inspección Basada en Riesgo (S-RBI), Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (S-RCM), Función de Protecciones Instrumentadas. (S-IPF) y Ventanas de Integridad Operativa (IOW).

Como producto de estas herramientas de confiabilidad se han diseñado y se desarrollan programas de mantenimiento más acordes con las necesidades individuales de cada planta de proceso al igual que, y basado en el estado de los equipos, se controlan los puntos óptimos de operación de la misma, de manera que no cause deterioros en los equipos y a su vez puedan ser operados, incluso, por encima de sus capacidades nominales.

1.3.6. Eliminación de Defectos

Para desarrollar el segundo pilar la refinería de Cartagena ha implementado un programa de de Técnicas de monitoreo e Inspección que permitirán reducir paulatinamente los equipos “problema” en GRC; las metodologías con las que se cuenta son: Gestión de control de cambios menores, Definición de malos actores y Aplicación del Análisis de Causa Raíz (S-RCA). I

1.3.7. Volumen de Trabajo Óptimo

Como respuesta al Tercer pilar, se implementan técnicas de evaluación de alcance de reparaciones aplicadas tanto a las paradas mayores de planta como al mantenimiento rutinario del Día-Día, en estas, se plantean discusiones de alcance para cada reparación y congelamiento del mismo, con esto se minimizan los trabajos emergentes y las improvisaciones que redundan en trabajos de deficiente calidad y “urgencias” en cuanto a consecución de materiales y recursos.

1.3.8. Máxima Eficiencia de Ejecución

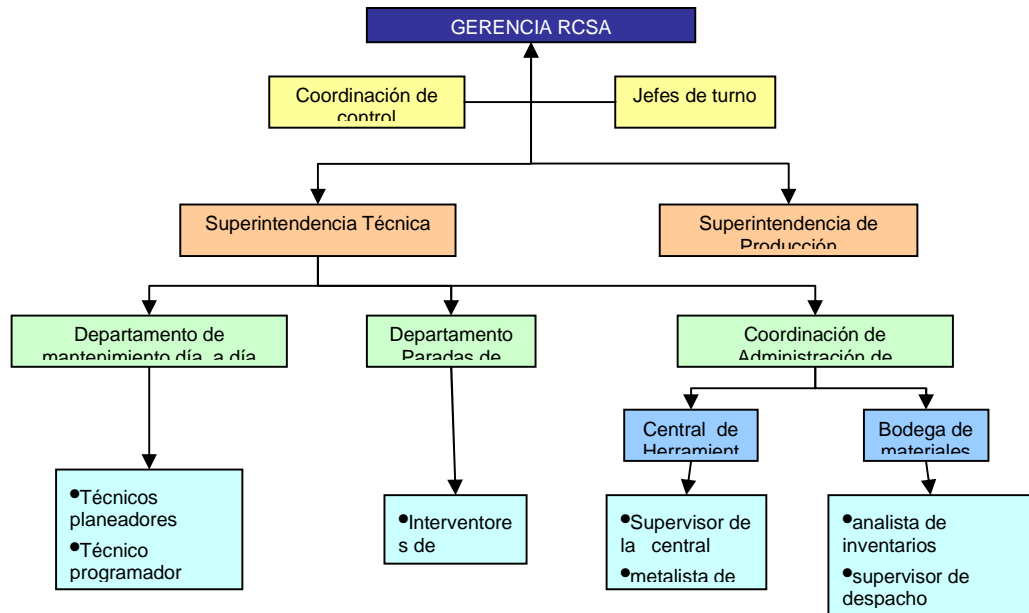
Como respuesta al Cuarto pilar, se implementan técnicas de optimización de trabajos que permiten definir que proceso de ejecución, se emplea y también aclaran que trabajos requieren ser ejecutados con la planta parada y cuales pueden ser llevados a cabo dentro de una planeación programada en el tiempo rutinario o cuales equipos deben ser operados hasta producirse la falla.

Para llevar a cabo este planteamiento la refinería se ha organizado en departamentos de los cuales cada uno de ellos aportan al cumplimiento del desarrollo de la estrategia de mantenimiento propuesto.

1.4. ORGANIZACIÓN DE MANTENIMIENTO DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA S.A.

La Refinería de Cartagena S.A. presenta dentro su organigrama una superintendencia técnica la cual se encargara de los departamentos de mantenimiento los cuales se dividen de acuerdo al de mantenimiento a ejecutar en departamento del Mantenimiento Día a Día y departamento de Proyectos y Paradas de Plantas. Ver figura 9.

Figura 9 . Organigrama de la Refinería de Cartagena S.A



Fuente: Tomado de la Unidad de Desarrollo Organizacional (UDO), Manual de calidad de la GRC

El departamento de Mantenimiento Día a Día, se encarga de todas aquellas actividades menores que pueden ser acometidas sin mayor impacto a la operación, este mayor impacto llega a ser en su mayor magnitud una baja de la carga que se este procesando en cada una de las plantas.

La segunda, es decir, Administración de Proyectos y Paradas de Plantas, se encarga de todos aquellos proyectos de inversión, inferiores a un millón de dólares, Proyectos de reposición de equipos, Proyectos de gastos como el mantenimiento a tanques de almacenamiento y las Paradas de Plantas, estas son no programadas y programadas.

Dado que de las 4 plantas existentes en la refinería, la única planta que no posee dentro de la programación anual de parada de planta es la Unidad de servicios industriales por lo tanto el mantenimiento a sus equipos, caldera y turbogeneradores, son realizados por los ingenieros del departamento de mantenimiento día a día.

2. ESTADO DEL ARTE DEL USO DE HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD PARA OPTIMIZAR EL MANTENIMIENTO

En los últimos veinte años, el Mantenimiento ha cambiado tal vez más que cualquier otra disciplina administrativa.

Los cambios son debidos al desmesurado incremento en número y variedad de los activos físicos (planta, equipamiento y edificios), los cuales deben ser mantenidos a lo largo del mundo, diseños cada vez más exigentes y complejos, nuevas técnicas de Mantenimiento y cambios en la visión de la organización de Mantenimiento y sus responsabilidades.

La Gestión de Mantenimiento está también respondiendo a las expectativas cambiantes, estas incluyen un crecimiento rápido de la conciencia hacia cuáles son las fallas de los equipos afectan la seguridad y el medio ambiente, un crecimiento de la conciencia sobre la relación entre Mantenimiento y la Calidad del producto, y la presión también creciente hacia el logro de una alta disponibilidad de planta y hacia la reducción y restricción en los costos.

La gente involucrada en el Mantenimiento, tanto técnicos e ingenieros como administradores, están teniendo que adoptar nuevas formas de pensar y actuar. Al mismo tiempo, las limitaciones de los sistemas de Información del Mantenimiento están comenzando a tener un incremento aparente, sin importar que tanto éstos estén computarizados. En el frente de esta avalancha de cambios,

los administradores están buscando por todos lados un nuevo enfoque para Mantenimiento. Se desea prevenir las salidas en falso y las terminaciones bruscas que siempre acompañan a las grandes perturbaciones.

Es esta una de las principales razones por las cuales el uso de herramientas de confiabilidad ha tenido gran acogida dentro del ámbito laboral.

El objetivo del uso de estas herramienta es disminuir la incertidumbre del comportamiento o estado de la maquina y optimizar la toma de decisiones en el proceso de gestión del mantenimiento.

El desconocimiento en las condiciones de un equipo nos puede llevar a sobre dimensionar el mantenimiento, realizar presupuestos y alcances sobre o sub dimensionados, tener paradas no planificadas y toma errada de decisiones.

El tener un alto grado de incertidumbre en el mantenimiento se debe a la mala calidad y cantidad de datos que ayuden a soportar una decisión, de la ignorancia sobre los modos de fallas de la máquina, del poco uso de herramientas estadísticas y de la baja confiabilidad humana.

Existen 3 clases de situaciones a las cuales se ve enfrentado el ingeniero de mantenimiento para decidir su estrategia en presencia de la incertidumbre

- ❖ Tomar decisiones Ignorando la incertidumbre trae como consecuencia incurrir en altos riesgos, sub o sobre dimensionamiento de las actividades lo que conlleva finalmente a vivir en un ambiente correctivo.
- ❖ Tratar de eliminar la incertidumbre para decidir, dando origen a altos costos en sistemas de información, sobre dimensionamiento en mantenimiento y parálisis por análisis.

- ❖ Tomar decisiones usando herramientas de confiabilidad para cuantificar la incertidumbre.

2.1 CONCEPTO DE CONFIABILIDAD

La confiabilidad de un sistema, equipo o componente, puede ser definido desde dos puntos de vista, uno cuantitativo y/u otro cualitativo.

La siguiente definición de Parra es típicamente cualitativamente: ***“Una planta es confiable si esta disponible cuando se requiere y opera en su capacidad para la cual fue diseñada operar de forma segura y económicamente.”***

En estos casos el termino confiabilidad involucra algunos aspectos asociados con el rendimiento de la planta tales como seguridad y economía. Los cuales algunas veces son difíciles de cuantificar, sin embargo esta es una definición conveniente en casos como, por ejemplo, cuando se trata de implementar una estrategia de mantenimiento para una planta.

Por otra parte cuando los objetivos de evaluar la confiabilidad son mas determinísticos, una definición cuantitativa tal como: “La Confiabilidad se percibe comúnmente como la capacidad de un activo para suministrar largos períodos de operación satisfactoria sin fallas durante su uso. En términos cuantitativos, una gestión eficiente de la Confiabilidad, permitirá disminuir la incertidumbre en el proceso de control de las fallas, ayudando a incrementar de forma eficiente, la Disponibilidad de los activos industriales dentro de un sistema de producción.”¹

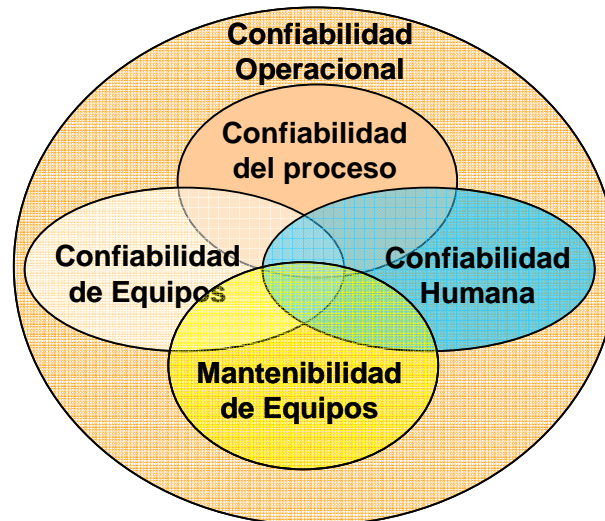
Factores de la Confiabilidad

Son las diferentes áreas que abarca un análisis de confiabilidad con el propósito

¹ ASESORIA INTEGRAL. Definición de confiabilidad <http://www.confabilidadoperacional.co> [19 ABRIL 2007]

de asegurar el funcionamiento de la planta durante el tiempo establecido, a en la figura 6. ² Se ilustra los factores que inciden en la confiabilidad Operacional y como cada uno de ellos se interrelaciona entre si.

Figura 10 Confiabilidad Operacional



En donde la confiabilidad humana, se define como "el cuerpo de conocimientos que se refieren a la predicción, análisis y reducción del error humano, enfocándose en el papel de la persona en las operaciones de diseño, mantenimiento, uso y gestión de un sistema socio técnico". ³

Este ítem es tenido en cuenta durante el análisis de este trabajo debido a que el error no proviene del ser humano al contrario el error esta en el.

Por otro lado encontramos los siguientes factores la confiabilidad:

² CARDONA, Camilo . Mejoramiento de los indicadores de confiabilidad de la refinería de Cartagena: Conferencia en : CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA ;2005;Bogotá ; Presentación hoja 5.

³ F.K GEITHNER, Machinery Reliability Assessment For Effective Maintenance; Edition 3 ;1996

- Confiabilidad de proceso: la cual es el área que vela por que se manejen procedimientos estandarizados y la comprensión del proceso así como la operación de los equipos dentro de las ventanas operativas o condiciones de diseño de los equipos.
- Confiabilidad de Equipos: Es la rama que propende por extender los tiempo para operar de los equipos, disminuir su tasa de fallas.
- Confiabilidad en los procesos de mantenimiento (Mantenibilidad): se encarga de vigilar y dar directriz, medir la efectividad y calidad de los mantenimientos, además de definir estrategias de mantenimiento y reducción de los tiempos medios para reparar.

HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD

En el análisis de confiabilidad se cuentan con herramientas aplicadas al proceso de optimización del mantenimiento las cuales se describen a continuación:

Análisis de Modos y Efectos de Fallas y Criticidad (FMECA)

Es una técnica de análisis que procura el diseño, desarrollo, operación y mantenimiento de productos y procesos sobre la base de actividades priorizadas a efecto de reducir el riesgo de las fallas, así como la documentación de las actividades y las fallas del sistema.

Entendiéndose como falla, la terminación de la capacidad de un componente, equipo, subsistema o sistema, para ejecutar la función para la cual es requerido.

El FMECA es definida por Parra como una serie de actividades tendientes a⁴:

- Reconocer y evaluar las fallas potenciales de un producto o proceso (antes de que estas ocurran), así como los efectos de cada una de las fallas
- Identificar acciones que puedan eliminar o reducir la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias de dichas fallas potenciales

Esta herramienta de confiabilidad permite:

- Jerarquizar los sistemas de un proceso
- Identificar de forma organizada y estructurada los diferentes modos de fallas de los sistemas críticos.
- Definir el impacto y las consecuencias de los modos de fallas de los sistemas críticos.
- Jerarquizar los modos de fallas en función del riesgo.

Análisis de Confiabilidad

Basado en la historia de falla, esta herramienta representa la realidad a través de modelos matemáticos, los cuales se clasifican en:

- Modelos Variables determinísticas donde se obtienen un único resultado final.
- Modelo Variables probabilísticas, donde se determinan un rango de probables resultados, los cuales son variables con un grado de incertidumbre asociado. También son conocida como variable Aleatorios.

Las variables aleatorias se subdividen en:

⁴ ELITE TRAINING, Ingeniería de confiabilidad aplicada al proceso de Optimización [20 Diciembre de 2006]
Memorias de cursos de confiabilidad, 2006

- Variables aleatorias continuas, las cuales se caracterizan por aceptar fracción, entre estos valores se tiene el calculo de los tiempos fuera de servicio (TFS), Tiempo de Reparación (TR),Tiempo de Operación (TO) y Tasa de Fallos.
- Variables Aleatorias Discretas: este tipo de datos se caracteriza por ser enteros y las principales valores obtenidos: numero de elementos defectuosos, numero de defectos por elemento, numero de repuesto, entre otros.

Análisis Estadísticos

Son herramienta dentro de la confiabilidad las cuales se clasifican en :

- Análisis de tendencia que sirven para establecer prioridades en las acciones a implementas entre estas técnicas tenemos, diagrama de pareto, diagrama causa efecto e histograma.
- Análisis distribución exponencial es una herramienta que permite calcular la probabilidad de falla mediante le unos de leyes matemáticas lo cual permite al ingeniero de confiabilidad optimizar el programa de inspección y mantenimiento de los equipos, además de identificar los equipos que no siguen estas leyes.
- Ley de Weibull esta es la herramienta estadística mas usada en la rama de confiabilidad y ayuda a representar el comportamiento de componentes con desgaste y fatiga de los equipos rotativos a analizar, esta herramienta será explicada con mas detalle en la sección 2.4

METODOLOGÍA DE MEJORAMIENTO CONTINUO CAPDO

Hace alrededor de 50 años el padre de la gestión moderna de la calidad, Edward Deming propuso un ciclo de mejora continua que se basaba en la aplicación de cuatro pasos:

- Planificar (Plan)
- Hacer (Do)
- Verificar (Check)
- Actuar (Act)

Los cuales son los pasos a seguir en la implementación de un programa de mejoramiento continuo (PHVA). No obstante, para los programas que ya tienen un camino recorrido o implementados el orden de los pasos a aplicar es el CAPDO (Chequear Analizar Planear y Hacer). En lugar de empezar por la **Planificación** empieza por la **Verificación** esto supone que no se está implementando o diseñando “desde cero” sino que se busca medir resultados mejorar, corregir u optimizar un proceso que ya está en marcha.

El ciclo CAPDO refuerza el concepto de iniciar el análisis partiendo de la realidad concreta que es estudio de mejora (maquinaria, equipo de trabajo o la empresa misma),. y consiste en aplicar la siguiente secuencia de trabajo, siguiendo ciclo de mejora continua ver figura 11⁵.

Figura 11. Ciclo de mejora continua



1. Verificar o “Chequear”

Consiste en relevar los datos relativos al problema. Se trata de conocer adecuadamente el estado actual para tener una idea clara del desvío o “gap” con relación a la condición ideal o planificada. No se trata de sacar conclusiones apresuradas sino de relevar los **datos** asociados al problema. ¿Qué vemos?, ¿Qué aparece?, ¿Qué síntomas son visibles?

2. Analizar

El objetivo de este paso consiste en analizar el fenómeno modo de falla para encontrar la causa raíz. Una vez que disponemos la mayor cantidad de datos posibles procedemos a su análisis.

Por eso el objetivo es ahora entender las razones del desvío: Por qué ocurrió lo que ocurrió. No se trata de quedarse en el síntoma o modo de fallo sino de averiguar cabalmente qué fue lo que lo produjo la falla.

3. Planificar

Encontrada la causa raíz, debemos planear la implantación de las soluciones incluyendo recursos capacitaciones responsables y plazos. Además de definir periodos de corrida, tiempo medio entre fallos y estrategias para mejorar al efectividad del mantenimiento. En algunos casos es conveniente en esta etapa definir indicadores de gestión apropiados para visualizar la efectividad de las acciones planteadas.

4. Hacer

En esta etapa se implementara no una acción inmediata al estímulo o modo de falla que generó el incidente, sino el resultado de una acción reflexionada por el grupo de los directamente involucrados y que apunta a solucionar definitivamente el problema o en nuestro caso a mejorar la confiabilidad de la planta.

2.4. WEIBULL

La confiabilidad de un componente depende del tiempo que éste haya estado en servicio. En los estudios de confiabilidad es muy importante la distribución de los tiempos de falla, esto es, la distribución del tiempo a la falla de un componente en unas condiciones ambientales especificas. Para caracterizar esta distribución se utiliza su razón de falla instantánea.

La distribución de Weibull es definido por Jonson así "Cuando un componente esta en un periodo de investigación, la razón de falla de este puede no ser constante durante dicho tiempo, lo que nos podría hacer pensar que el periodo de vida inicial del componente fue usado solo para la investigación es entonces donde el tiempo de falla se determina por desgaste y no de manera aleatoria como se necesita"⁶.

Es aquí donde el modelo exponencial no es aplicable y se hace necesario utilizar una razón de falla más general.

El modelo de Weibull sería entonces la distribución con una razón de falla mas general aplicable en estas circunstancias, ya que describe los tiempos de falla de componentes cuando sus razones de falla crecen o decrecen con el tiempo.

⁶ JHONSON, Richard, Definición de Weibull., <http://correo.puj.edu.co/probabilidad>.

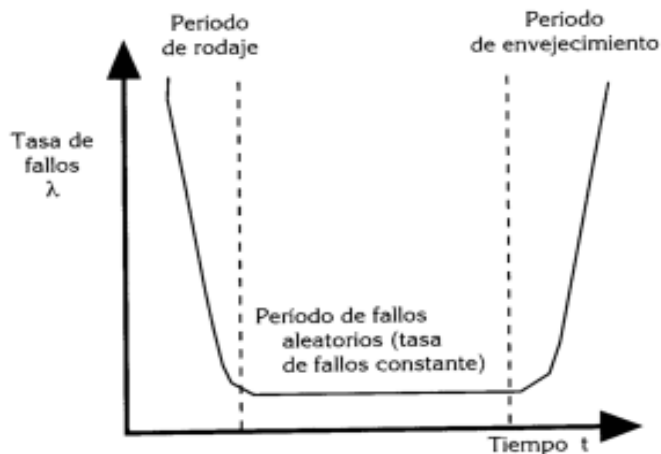
$$R(t) = e^{-\alpha t^\beta}$$

Tiene como parámetros α y β , Los cuales definen la forma de la curva de Davis o curva de la bañera.

2.4.1 La Curva de la Bañera

Es un gráfica que representa los fallos durante el período de vida útil de un sistema o máquina. Se llama así porque tiene la forma de una bañera cortada a lo largo. Ver Figura 7.

Figura 12. Curva de la bañera.



La construcción de la grafica se construye de acuerdo al valor de β y se pueden apreciar tres etapas⁷:

⁷ MORA GUTIÉRREZ, Alberto. Mantenimiento estratégico para empresas de servicios o industriales. Medellín: AMG, 2005, 268 p.

1. Fallos iniciales o periodo de rodaje $\beta \leq 1$ Esta etapa se caracteriza por tener una elevada tasa de fallos que desciende rápidamente con el tiempo. Estos fallos pueden deberse a diferentes razones de acuerdo a la condición del equipo, si el equipo es nuevo esta fallas podrían deberse a equipos defectuosos, instalaciones incorrectas, errores de diseño del equipo; si el equipo fue reparado esta fallas provienen de desconocimiento del equipo por parte del mantenedor, desconocimiento del procedimiento adecuado de funcionamiento o malos repuestos. Esta etapa es llamada también, etapa de mortalidad infantil, y es propia de equipos rotativos.
2. Fallos normales, $1 \leq \beta \leq 2$, etapa con una tasa de errores menor y constante. Los fallos no se producen debido a causas inherentes al equipo, sino por causas aleatorias externas. Estas causas pueden ser accidentes fortuitos, mala operación, condiciones inadecuadas y otros sucesos fortuitos. Esta etapa es propia de equipos electrónicos y eléctricos, el cual siguen una tendencia constante a través del tiempo, por otra parte este fenómeno se observa en equipos rotativos cuando se presentan daños operacionales.
3. Fallos de desgaste: $\beta \geq 2$ etapa caracterizada por una tasa de errores rápidamente creciente después de un periodo de operación. Los fallos se producen por desgaste natural del equipo debido al transcurso del tiempo. Este tipo de comportamiento se ve reflejado en equipos estáticos tales como tanques, tambores e intercambiadores.

2.5. NUMERO DE PRIORIDAD DE RIESGO

Risk Priority Number (RPN) es el producto matemático de los rateos de Severidad, Probabilidad de Ocurrencia y Probabilidad de Detección

La severidad es una medida de la seriedad del efecto potencia de un Modo de Falla, desde la perspectiva del cliente Probabilidad de Ocurrencia, la cual es una medida de que tan factibles es que una causa en particular ocurra y resulte en un Modo de Falla específico, durante la vida estimada o esperada del producto. Además, esta metodología cuantitativa para la evaluación de la Criticidad es el resultado del producto de la Severidad y la Probabilidad de Ocurrencia de un evento. Este número es utilizado para priorizar los sistemas, componentes y Modos de Falla de un sistema

El método de análisis de riesgo se basa en la evaluación cualitativa del riesgo (woodhouse; 2001); empleando la siguiente formula:

Riesgo= Frecuencia de fallos * Consecuencias.

2.6. ENFOQUE “KANTIANO” DE LA ORGANIZACIÓN DE MANTENIMIENTO.

Concepto filosófico que indica la evolución gradual de la organización de mantenimiento en el tiempo dada por los siguientes niveles o categorías, ver Figura 13, los cuales es e medio para jerarquizar los diferentes tópicos que maneja el mantenimiento⁸.

Figura 13 Niveles o categorías del mantenimiento bajo enfoque sistémico



Aplicando este enfoque se describe en forma general las fases conceptuales que deben ser recorridas para lograr ser una organización de mantenimiento de Clase Mundial, para lo cual se debe entender el concepto de cada uno de los niveles:

- **Nivel 1. Instrumental (funciones y acciones).** El nivel instrumental abarca todos los elementos reales requeridos para que exista mantenimiento en las empresas, procura el manejo sistémico de toda la información construida, requerida en un sistema de mantenimiento en lo referente a las relaciones entre Personas. Recursos Productivos y Máquinas: pertenecen a este grupo todos los registros, documentos, historia., información, codificación, entre otros: en general todo lo que identifica a los equipos, a los recursos de AOD y de mantenimiento: la administración de la información y su tratamiento estadístico: la estructura organizacional de los tres elementos descritos de un sistema de mantenimiento. Clasifican también en este nivel instrumentos más avanzados como las 5S, el mejoramiento continuo, etc., también se encuentran aquí herramientas avanzadas específicas y de orden técnico. En general abarca todos los elementos físicos y mentales que requieren las Personas para poder realizar las acciones concretas de mantenimiento sobre los elementos o máquinas.
- **Nivel 2. Operacional (acciones mentales).** El nivel operacional comprende todas las posibles acciones a realizar en el mantenimiento de equipos por parte del oferente, a partir de las necesidades y deseos de los demandantes. Acciones correctivas, preventivas, predictivas y modificativas.

- **Nivel 3. Táctico (Conjunto de acciones reales).** El nivel táctico contempla el conjunto de acciones de mantenimiento que se aplican a un caso específico (un equipo o conjunto de ellos), es el grupo de tareas de mantenimiento que realizan con el objetivo de alcanzar un fin; al seguir normas y reglas para ello establecido. Aparecen en este nivel el TPM, RCM & RCM Combinadas, reactiva, proactiva, clase mundial, RCM Scorecard, entre otros.

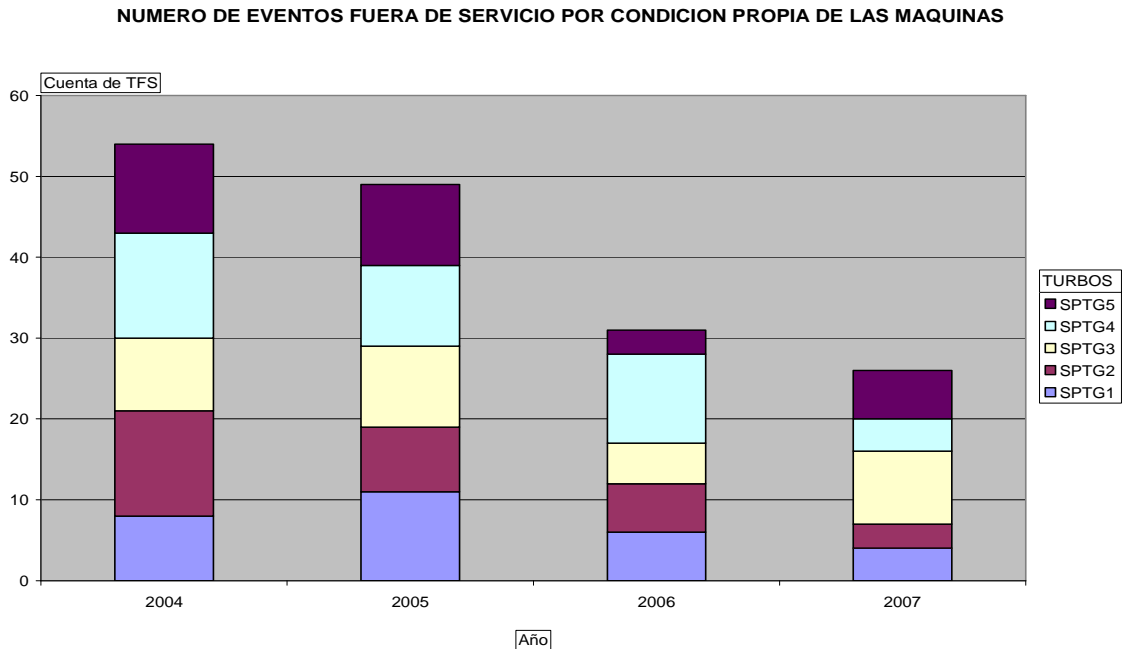
- **Nivel 4. Estratégico (Conjunto de funciones y acciones mentales).** El campo estratégico está compuesto por las metodologías que desarrollan con el fin de evaluar el grado de éxito alcanzado con las tácticas desarrolladas; esto implica el establecimiento de índices, rendimientos e indicadores que permitan medir el caso particular con otras diferentes industrias locales, nacionales o internacionales. Es la guía que permite alcanzar el grado de éxito propuesto. Se alcanza mediante el LCC, el CMD y los costos.

3. IMPLEMENTACION DE HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD PARA OPTIMIZAR LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO

3.1 DESCRIPCIÓN SITUACIÓN ACTUAL

La confiabilidad y disponibilidad del sistema de generación de energía de la Refinería de Cartagena ha sido impactada por el comportamiento de los turbogeneradores de la planta de USI durante los últimos años, debido a la alta tasa de fallas presentada y al alto número de paradas planeadas y no planeadas de los turbogeneradores, Ver Figura 14, que ha obligado a la refinería acoger la estrategia de mantener una conexión a la red externa, facturando tres mil millones de pesos por dicho consumo durante el año 2006.

Figura 14. Numero de fallos del sistema de generación



3.1.1 Alcance

La búsqueda constata de la Refinería de mejorar el proceso de mantenimiento de turbogeneradores aumentando la disponibilidad de estos equipos y afianzándose en la mantenibilidad de los mismos ha impulsado el desarrollo de esta monografía incursionando con el uso de herramientas de confiabilidad con el propósito de optimizar el proceso Mantenimiento y mejora de la confiabilidad de los turbogeneradores de la Refinería de Cartagena, el cual se centra en:

- Identificar los modos de fallas predominantes de estos equipos.
- Realizar un análisis de pareto de estos modos de falla y determinar el impacto en el sistema de generación de cada uno de ellas.
- Realizar un análisis de las causas.

- Plantear alternativas de solución y ubicarla en cada uno de los niveles del mantenimiento pertinente que permita a la planta de Servicios Industriales aumentar la confiabilidad en la prestación del servicio.

3.2. MODELO DE OPTIMIZACION DEL MANTENIMIENTO APLICADO HERRAMIENTA DE CONFIABILIDAD EN TUBOS GENERADORES DE LA REFINERÍA DE CARTAGENA S.A.

El Modelo a implementar ha sido diseñado bajo dos enfoques como son; Enfoque filosófico “Kantiano” de la organización de mantenimiento y el sistema de mejoramiento continuo

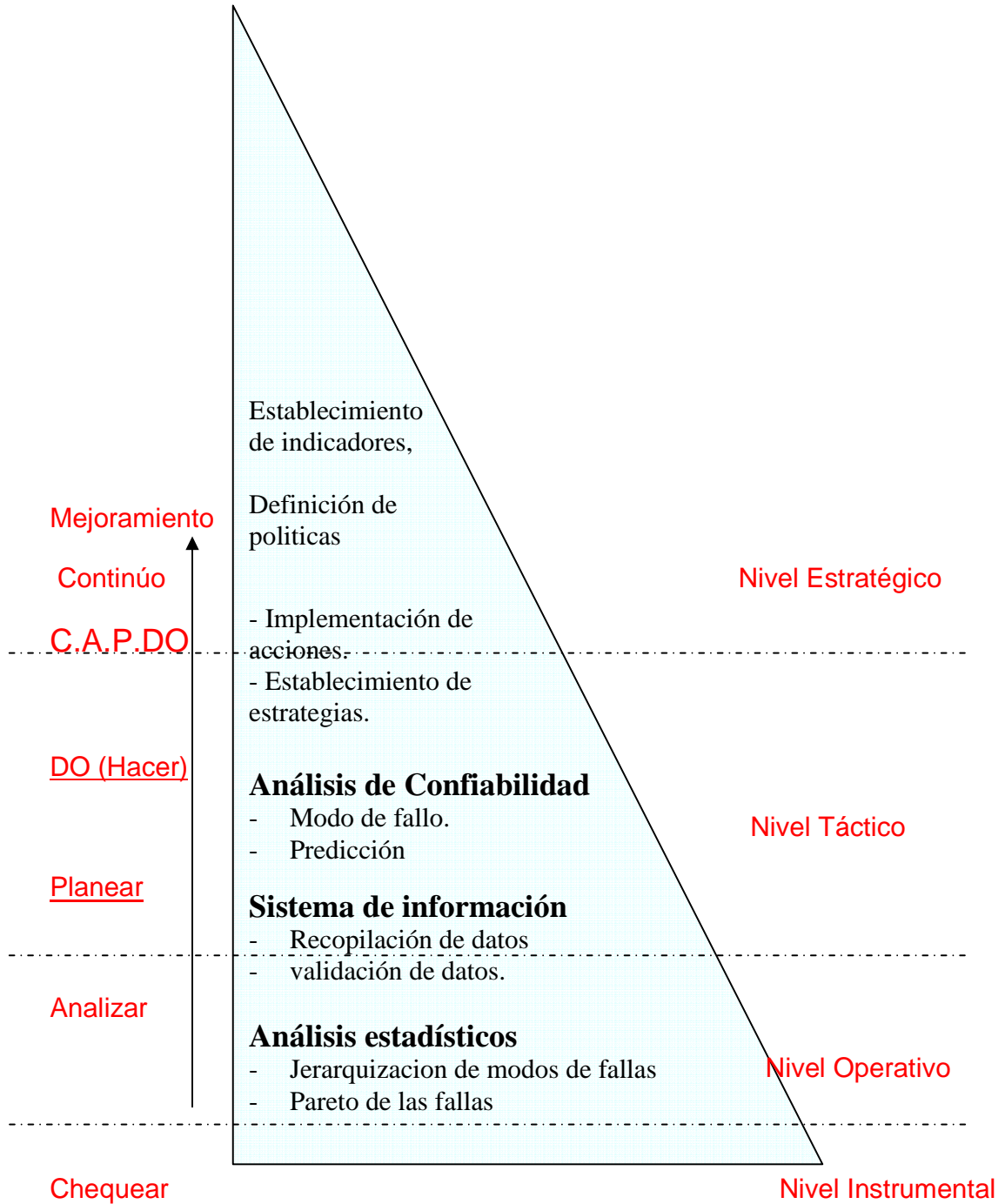
La propuesta comprende actividades del nivel instrumental, el cual comprende el levantamiento de datos usando el sistema de información, validando los datos jerarquizando los modos de fallas; continuando con la etapa de análisis de los modos de falla.

El segundo nivel es trabajado en la definición de las estrategias de mantenimiento y las siguientes fases del modelo implica la implementación y medición de esos resultados ubicándose estas actividades en el nivel 3 y 4 respectivamente.

3.2.1 Esquema del Modelo

Para efectos de esta monografía se siguió el siguiente orden, donde se muestra la integración de cada uno de los niveles, estratégico táctico operativo e instrumental. Ver Figura 15.

Figura 15. Modelo de Mantenimiento

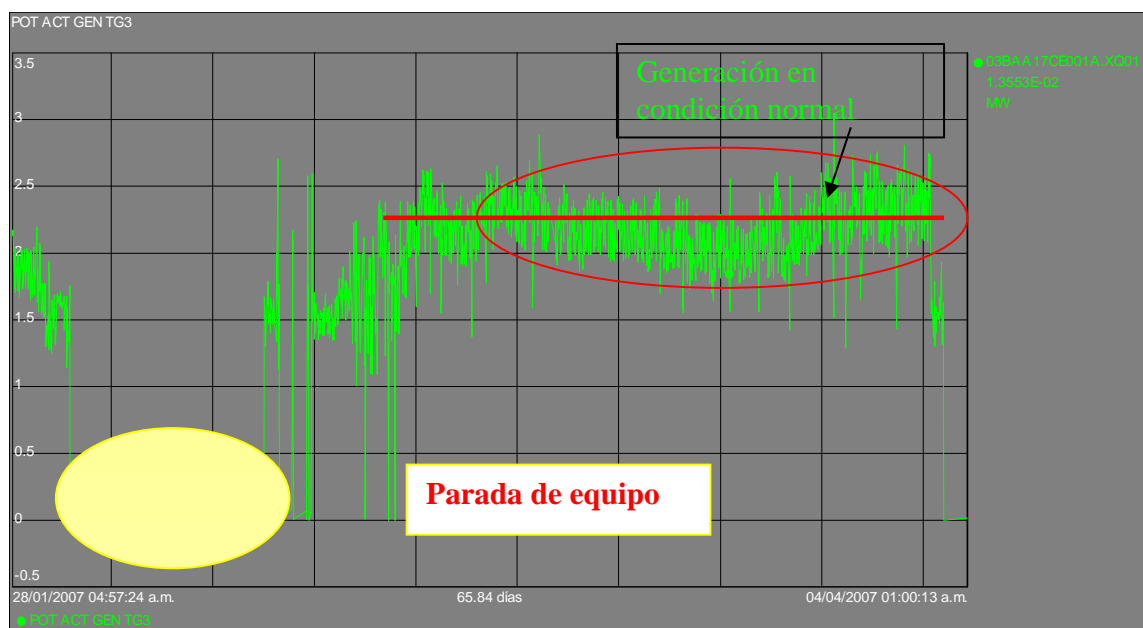


3.2.2 Sistema de Información

Esta etapa comprendió en la recopilación y análisis de datos, de donde para cada Turbo generador se recopiló la información desde el año 2004 hasta la fecha, identificando los modos de fallas, impacto en la operación y especialidad involucrada⁹.

Esta recolección de datos fue realizada usando la herramienta PI* el cual es un SOFTWARE que permite monitorear en línea las variables operativas de los equipo de la refinería incluyendo los turbogeneradores. Con esta herramienta se establece el tiempo el TMEF y el TMPR.

Figura 16. Sistema de Información PI, (Visualización)



3.2.3 Determinación y jerarquización de modos de fallos (FMECA)

Para realizar el análisis de Modo de Fallo lo primero que se realiza es establecer

⁹ PI CIENTS, PI sistem, Visualización de megavatios producidos en turbos

las siguientes premisas:

1. Función: el sistema de turbo generación es un sistema encargado de producir la cantidad de MW requeridos por la Refinería de Cartagena S.A, operando los equipos dentro de la ventana operativa de la maquina.

2. Identificación y descripción del modo de falla: en esta etapa se realiza la descripción del fallo y se evalúa las consecuencias o impacto que tiene el fallo para la operación, la seguridad o prestación del servicio.

Para el desarrollo de la descripción de la falla se deberá responder las siguientes preguntas:

- ***De que manera afecta el fallo a la seguridad***
- ***De que manera afecta la producción.***
- ***El fallo produce fallo a otros sistemas.***
- ***Hay impacto en el servicio***
- ***Que daño físico ocasiona el fallo.***
- ***Que debe hacerse para reparar el daño.***

Se presenta la identificación y descripción de cada uno de los modos de fallos. Esta Identificación se logro listando los modos de fallos más comunes y se listaron sus causas y posibles consecuencias.

A continuación se describe los modos de fallos encontrados en el periodo del año 2004 a 2007: ver Tabla 4

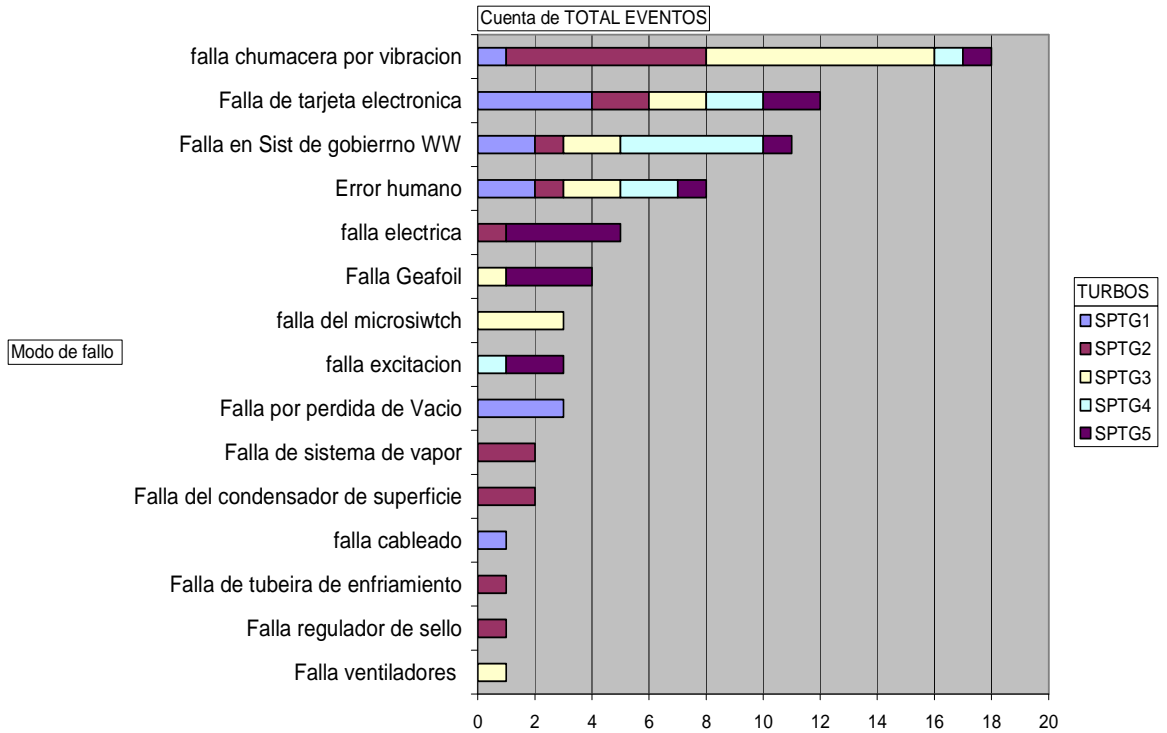
Tabla 4. Modos de fallas de Turbo Generadores.

	Modo de falla	Numero	Rata	de
--	----------------------	---------------	-------------	-----------

		de falla	fallas/Año
1	Alta Vibración chumacera.	18	4.5
2	Falla tarjeta electrónica.	12	3
3	Falla del sistema de gobierno.	11	2.75
4	Error humano.	8	2
5	Falla eléctrica.	5	1.25
6	Falla de tubería de condensador de superficie..	4	1
7	Falla de vapor de sello.	2	0.5
8	Falla de excitación.	3	0.75
9	Falla de Geafoil.	3	0.75
10	Falla de los Microsiwtch.	3	0.75
11	Perdida de vacío.	2	0.5
12	Falla de cableado	1	0.25

Figura 17. Representación grafica de la Frecuencia de las fallas.



Frecuencia de ocurrencia de los modos de fallos



3. Cuantificación del riesgo a cada modo de fallo

Identificados los modos de fallos y la frecuencia de ocurrencia de cada uno de ellos durante los últimos 4 años se procede a jerarquizar de forma cualitativa el riesgo de cada uno de los mismos en función del impacto, la cual valora el riesgo que generan a nivel Económico, ambiental, seguridad e imagen de la empresa.

Figura 18. Matriz de análisis de Riesgo y Priorización de trabajos.

 				PROBABILIDAD					CATEGORIA
				A	B	C	D	E	
Ecopetrol RAM MATRIZ DE ANÁLISIS DE RIESGOS Y PRIORIZACIÓN DE TRABAJOS				Equipo fallaría en un tiempo mayor a 6 meses	Equipo fallaría entre 2 y 6 meses	Equipo fallaría entre 4 y 8 semanas	Equipo fallaría entre 2 y 4 semanas	Equipo fallaría en 2 semanas	<i>Prioridad del trabajo:</i> Actividades de Mantenimiento Programado (PV, PD)
				Posible Avería del equipo después de 2 meses	Posible Avería del equipo entre 1 y 2 meses	Posible Avería del equipo entre 2 y 4 semanas	Posible Avería del equipo en próxima semana	Avería del equipo ha sucedido	<i>Prioridad del trabajo:</i> Equipo Estático / Eléctrico / Instrumentos/ Equipo Rotativo Sin auxiliar
CONSECUENCIAS				Equipo auxiliar fallaría después de 2 mes	Equipo auxiliar fallaría entre 1 y 2 meses	Equipo auxiliar fallaría entre 3 y 4 semanas	Equipo auxiliar fallaría entre 1 y 3 semanas	Equipo auxiliar fallaría antes de 1 semana	<i>Prioridad del trabajo:</i> Equipo auxiliar (Equipo rotativo, intercambiadores, etc).
				Personas	Económica (1*)	Ambiental	Imagen de la Empresa	No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria
Una o mas Fatalidades	Catastrófica > \$ 10 M	Masivo	Internacional	M	M	H	H	VH	

Donde:

N: No riesgo

L: Criticidad Baja.

M: Criticidad Media

H: Criticidad Alta.

VH: Criticidad Muy Alta

3.3. VALORACIÓN DE LOS MODOS DE FALLAS

La calificación de los modos de fallas se lleva a cabo valorando la consecuencia del fallo para las personas, ambiente, seguridad y Económica, columna izquierda de la matriz y se cruza con la frecuencia de ocurrencia, escogiendo para cada modo de fallo la valoración mas alta.

3.3.1 Falla de las Tarjetas Eléctricas

Para la valoración de riesgo de esta falla se ha teniendo en cuenta lo siguiente:

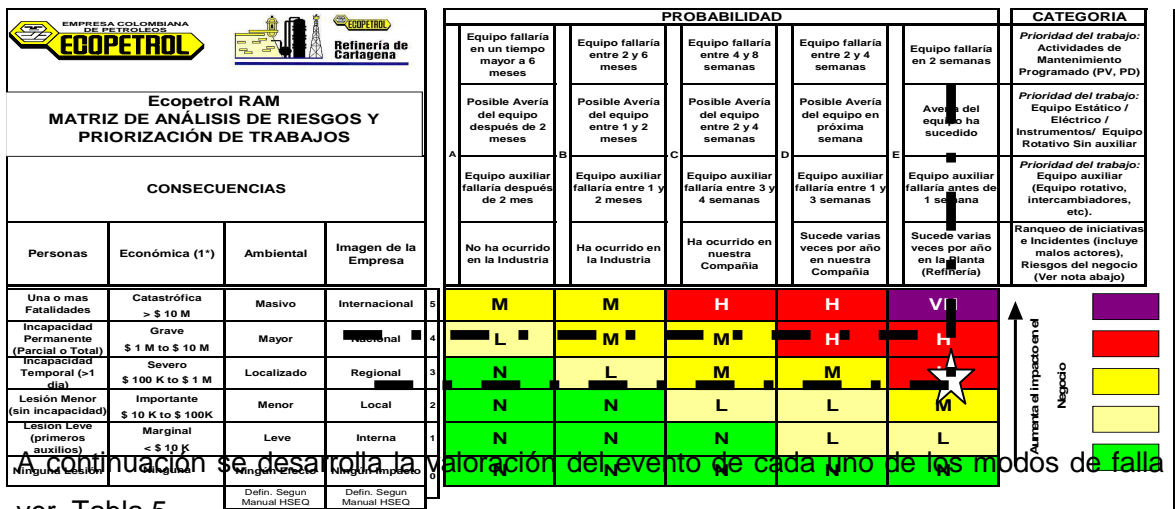
Probabilidad: En este renglón se clasifica como avería del equipo ha ocurrido anteriormente.

Consecuencias: Se valoran las 4 áreas así:

- Personas: El fallo no genera ninguna lesión. Impacto 0
- Económica: La falla puede generar pérdidas entre 100 k y 1 Millón de dólares, Impacto 3.
- Ambiental: La falla no genera ningún efecto ambiental, Impacto 0.
- Imagen de la empresa: la falla traería una pérdida de producción de gasolina de la región. Impacto 3

Por lo tanto se asume el valor mayor, consecuencia 3 y frecuencia E. ver figura 19.

Figura 19. Análisis de riesgo del sistema de generación por falla de tarjeta electrónica.



A continuación se desarrolla la valoración del evento de cada uno de los modos de falla ver Tabla 5.

Tabla 5. Valoración de los Modos de Falla

Modo de fallo	JERARQUIZACION DEL MODO DE FALLO				
	Frecuencia de falla	Impacto en SHA	Impacto en el negocio	Posición de la matriz	Nivel de criticidad

				o		
1.1	Falla de tarjetas electrónicas	E	1	3	3E	H
1.2	Alta vibración de Chumacera	E	1	2	2E	M
1.3	Falla del sistema de gobierno Woodward.	E	1	2	2E	M
1.4	Error humano	C	1	3	3C	M
1.5	Falla del sistema eléctrico	C	1	3	3C	M
1.6	Falla del tubería del condensador de superficie	C	1	3	3C	M
1.7	Problemas de excitación	C	1	3	3C	M
1.8	Falla de bomba de lubricación	C	1	3	3C	M
1.9	Falla geafoil	C	1	3	3C	M
1.10	Falla regulación vapor de sello. (3)	D	1	2	2D	L
1.11	Rotura por enfriador de aceite	C	1	2	2C	L
1.12	Perdida de vació	D	1	2	2D	L
1.13	Falla del microsiwtch	C	1	2	2C	L

3.4. ANALISIS ESTADISTICO

Para esta etapa se utilizara una herramientas estadísticas que sirva para priorizar los modos de falla y seleccionar los de mayor impacto.

Como resultado de la cuantificación del riesgo el siguiente paso es utilizar la técnica de análisis de Pareto para priorizar los fallos acordes a las políticas planteadas por la organización y teniendo en cuenta las siguientes premisas:

Se le cargara a los costos de las fallas, el valor de los KW/hrs consumidos para suplir la energía no generada y la penalización a la operación.

El costo de KW /hr para la refinería de Cartagena esta en \$ 140.¹⁰

Se estima que se esta operando en condición habitual y estable, con un consumo de 14.5 Mw. generados de la siguiente forma: ver Tabla 6

Tabla 6. Generación de I sistema en condición normal.

Equipo	Generación
SPTG 1	1.7 Mw
SPTG 2	1.7 Mw
SPTG 3	1.7 Mw
SPTG 4	4.7 Mw
SPTG 5	4.7 Mw

En caso de ocurrir una falla en alguno de los SPTG (1/2/3) se implementar la siguiente estrategia: ver Tabla 7

¹⁰ Informe anual de Comité de Energía y perdida, Comité de energía y perdida GRCSA,2007.

Tabla 7. Generación del sistema con un turbo generador pequeño fuera de servicio.

Equipo	Generación
SPTG 1	0
SPTG 2	2 Mw
SPTG 3	2 Mw
SPTG 4	5 Mw
SPTG 5	5 Mw
Conexión a red externa	.5 Mw

Conexión con red externa de .5 MW, mientras dure la falla del turbo SPTG1.

En caso de ocurrir una falla de los turbos SPTG 4/5 se implementará la siguiente estrategia: ver Tabla 8

Tabla 8. Generación del sistema con un turbo generador grande fuera de servicio.

Equipo	Generación
SPTG 1	2.2 Mw
SPTG 2	2.2 Mw
SPTG 3	2.2 Mw
SPTG 4	5.5 Mw
SPTG 5	0
Conexión a red externa	2.4 Mw

Conexión con red externa de 2.4 MW, mientras dure la falla de cualquiera de los 2 turbos grandes SPTG 4 o 5.

Estableciendo la frecuencia de ocurrencia de las fallas y su impacto para la organización se determina que el 66 % de las fallas se encuentran representadas en 4 modos de fallos, para lo cual se determino realizar el analisis para estos modos d fallos y su costeo o el impacto de comprar energía de la red externa.

La clasificación consiste en la selección de los modos de fallas que tiene mayor impacto para la organización, los cuales se describen en la Tabla 9.

Tabla 9. Principales modos de fallas y su valoración del impacto en pesos por evento ocurrido.

Modo de fallo	Nivel de criticidad	Penalización por consumo de energía.(pesos)
Falla de tarjetas electrónicas	H	\$6.206.000
Alta vibración de Chumacera	M	\$131'512.000
Falla del sistema de gobierno Woodward.	M	\$4.976.000
Error humano	M	\$2'093.500

Las fallas de las tarjetas electrónicas se han valorado como H debido a su condición de ser fallas aleatorias.

3.5. ANÁLISIS DE PROPUESTAS PARA CADA MODO DE FALLA

Para el análisis de los modos de falla se utilizarán conceptos de confiabilidad aplicables a cada uno de los casos estudiados y se establecerán las recomendaciones en cada uno de los niveles jerárquico del mantenimiento.

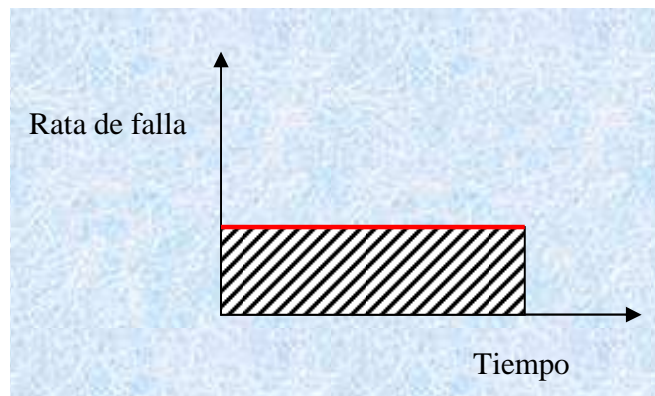
3.5.1. Oportunidad de mejora de mantenimiento para Falla de tarjeta electrónica

Este modo de falla presenta una valoración de riesgo alta (H), por su condición de ser fortuita.

La importancia de este modo de fallo lo hace su característica de ser repentino y no hay sistema alguno que pueda detectar ni monitorear su condición durante su ciclo de vida.

Por otra parte estos componentes electrónicos presenta un comportamiento constante de falla, lo que significa que tiene igual probabilidad de falla al inicio de su vida útil como al final de la misma, por lo que las herramientas de predicción no son aplicables, para este tipo de componentes la representación grafica en la curva de la bañera sería una línea recta. Ver figura 20.

Figura 20. Representación grafica de falla Vs tiempo de componentes electrónicos



Este comportamiento constante en el tiempo hace que pierda eficiencia implementar una estrategia de mantenimiento preventivo con base en el tiempo, debido a que el cambios pro activos de estos componentes no mejora la confiabilidad o elimina el riesgo de falla.

Por lo tanto para este tipo de falla se recomiendan implantar las acciones listadas en la Tabla 10.

Tabla 10. Estrategias de mantenimiento a implementar en cada nivel.

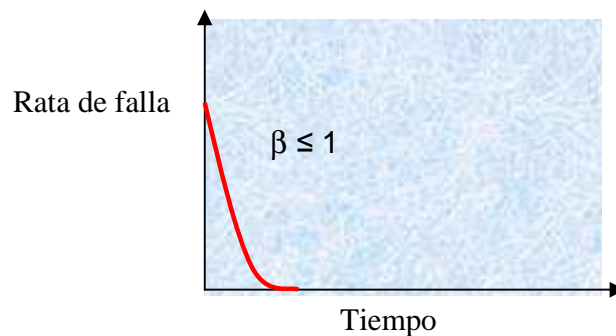
Nivel	Actividades	Meta
Instrumental	Registrar información de cambio de tarjetas, TMEF, documentar actividades.	Llevar registros de actividades y realizar tendencia de falla.
Operacional	Generar rutinas de los mantenimientos preventivos e inspección de las condiciones del tablero electrónico.	Velar por condiciones apropiadas de los sistemas electrónicos, evitar humedad.
	Realizar termografía a elementos electrónicos.	Realizar monitoreo para verificar cambio de condiciones de temperatura entre un periodo y otro.
Táctico	Re evaluar periodos de mantenimiento e inspección de equipos electrónicos.	Ajustar frecuencia de inspección de acuerdo a TMEF
	Establecer procedimientos de operación de turbos en casos de contingencia de la planta.	Estandarizar procedimientos de emergencia para disminuir impactos.

Estratégico	Contemplar un sistema de control electrónico redundante para la operabilidad del sistema.	Aumentar % de disponibilidad.
	Gestionar estudio de cambio de tecnología o actualización de la misma.	Optimizar sistema de generación realizando cambio de tecnología
	Establecer política de disponibilidad en bodegas de tarjetas electrónicas.	Publicar directrices de mantener repuestos en stock.

3.5.2. Modo de falla de chumacera por alta vibración

Este modo de falla fue valorado con una criticidad de M. La distribución de los datos de las fallas en el tiempo se ubica en la curva de la bañera en la fase de mortalidad infantil debido que el factor de forma $\beta = 0.34$ (ver Fig. 21)

Figura 21. Representación grafica de falla Vs tiempo de elementos presentando comportamiento de mortalidad infantil.



De este tipo de falla los 18 eventos ocurridos durante los últimos 4 años, 14 de ellos han ocurrido después de haber sido el equipo intervenido por el personal de mantenimiento. (Ver tabla 11 y 12).

Tabla 11. Numero de fallas presentado por turbo SPTG 2

Año	TURBOS	FECHA	MODO DE FALLA
2004	SPTG2	24/02/2004	Alta vibración en chumacera
2004	SPTG2	02/03/2004	Alta vibración en chumacera
2004	SPTG2	18/03/2004	Alta vibración en chumacera
2004	SPTG2	19/03/2004	Alta vibración en chumacera
2004	SPTG2	24/03/2004	Alta vibración en chumacera
2004	SPTG2	25/03/2004	Alta vibración en chumacera

Tabla 12. Numero de falla presentada por turbo SPTG 3

Año	TURBOS	FECHA	MODO DE FALLA
2007	SPTG3	15/02/07- 17/02/07	Alta vibración en chumacera
2007	SPTG3	02/04/07 - 19/04/07	Alta vibración en chumacera
2007	SPTG3	21/04/2007	Alta vibración en chumacera
2007	SPTG3	23/04/2007	Alta vibración en chumacera
2007	SPTG3	25/04/2007	Alta vibración en chumacera

			chumacera
2007	SPTG3	26/04/07- 27/04/07	Alta vibración en chumacera

El patrón de falla que sigue el modo de falla lo ubica en la fase de mortalidad infantil el cual se caracteriza por tener una elevada tasa de fallos que desciende rápidamente con el tiempo. Estos fallos pueden deberse a diferentes razones como repuestos defectuosos, reparaciones incorrectas, desconocimiento del equipo por parte de los operarios o desconocimiento del procedimiento adecuado.

Otro factor predominante de este modo de falla es su baja mantenibilidad. TMR: 7 días

Para este tipo de modo de fallas se recomienda trabajar en confiabilidad de la maquina y la confiabilidad humana como oportunidad de mejora, para los cuales se recomienda realizar las diferentes acciones descritas en la Tabla 13.

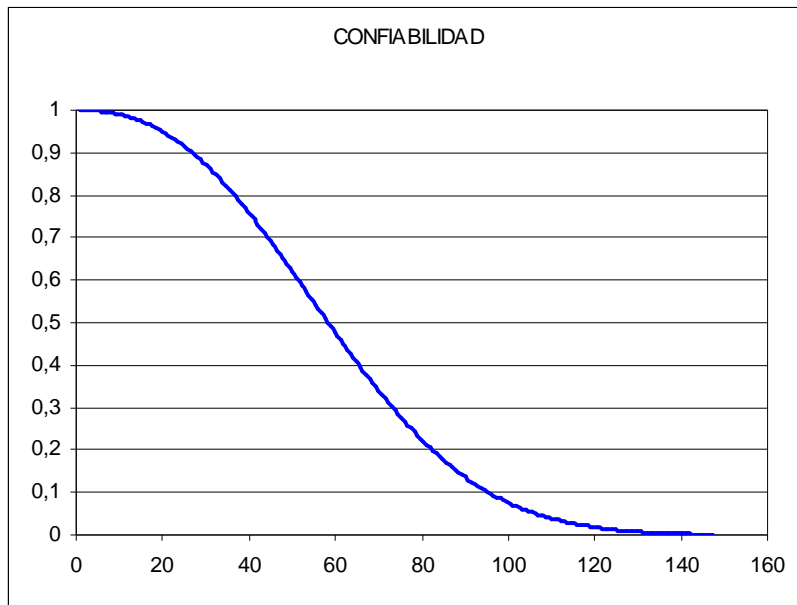
Tabla 13. Recomendaciones para mejorar confiabilidad de reparación de chumaceras.

Nivel	Acciones	Meta
Instrumental	Mejorar competencia del personal técnico.	Disponer de personal competente en las reparaciones.
	Disponer de registro de datos	Disponer de datos de montaje y e la reparación.
	Contratar asesores externos para acompañamiento del personal técnico durante la ejecución.	Mejorar competencia del personal ejecutor
Operacional	Continuar con el programa de monitoreo en línea.	Vigilar cambios bruscos de la vibración durante los cambios de carga.
	Establecer programas de mantenimiento correctivo	Aumentar disponibilidad de equipos y planear mtto correctivos.
Táctico	Implementar proceso de certificación de competencias del personal propio y contratista.	Certificar personal a participar en reparaciones de este tipo.
	Implementar técnicas de las mejores prácticas para la ejecución del mantenimiento del equipo.	Aumentar confiabilidad del equipo.
Estratégico	Implementar política de repuestos en stock, antes de intervenir el equipo.	Asignar presupuesto a consecución de repuestos.
	Establecer disposición de herramientas adecuadas y repuestos originales.	Asignar presupuesto a consecución de herramientas.

3.5.3. Modo de falla del sistema Woodward

Este modo de falla tiene una valoración del riesgo M y se calculo valores de confiabilidad del componente en software comercial, VALVAMORA4*, su parámetro calculado da un valor $\beta = 0.55$ y un TMEF de 4.5 meses, además se grafico el valor de la confiabilidad a través del tiempo. Ver Figura 22.

Figura 22. Simulación Weibull de confiabilidad



Las principales causas de este modo de fallo daño son; daño de bomba de lubricación, falla de tarjetas electrónicas internas, falla del actuador mecánico y falla del sistema hidráulico, siendo esta la causa predominante de este modo de falla.

- El Análisis de costo riesgo beneficio para decidir estrategia de mantenimiento hace parte de la premisa de preservar la función de los equipos, a partir de la aplicación de estrategias efectiva de mantenimiento.

En esta etapa se hará la evaluación de plantear la estrategia de mantenimiento de acuerdo al escenario calculado de acuerdo a la siguiente formula:

$$\text{Calculo del análisis de costo riesgo- Beneficio} = \text{CNP} \times (\text{F}(t) - \text{CP} * \text{R}(t))$$

Para el desarrollo de esta formula se tendrá en cuenta la confiabilidad $R(t)$ y la probabilidad de falla $F(t)$ dados en la figura 14.

Los costos planeados (CP) tiene un valor de 6'077.000, los cuales serán la suma de los costos de los siguientes ítems:

Recurso humano

Materiales

Consumo de energía externa

Así los Costos de los mantenimientos correctivos tienen un valor de \$37.212.000 y es el resultado de la suma de los costos de los siguientes ítems:

Recurso humano.

Materiales.

Consumo de energía externa.

Penalización de la operación (costo por daños en otras plantas).

De acuerdo a la formula de beneficio, se analizará la fecha para la cual es conveniente realizar el mantenimiento preventivo.

$$\text{Riesgo} = \text{CNP} \times (F(t) - \text{CP} \times R(t))$$

$R(t)$ = Confiabilidad del equipo para un tiempo T , (Ver Tabla 14)

$F(t)$ = Probabilidad De Falla = $1 - R(t)$.

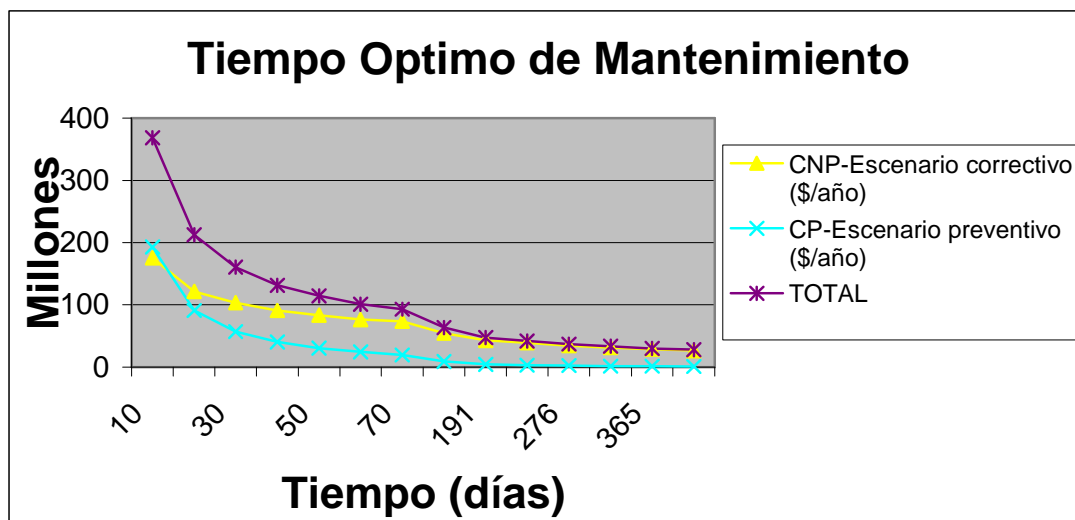
- La frecuencia de mantenimiento óptima para realizar la intervención si existe será el menor valor dado en la columna de total. Ver Tabla 14

Tabla 14. Análisis de costo de mantenimiento

Tiempo (días)	R(t)	CNP- Escenario correctivo (\$/año)	CP-Escenario preventivo (\$/año)	TOTAL
10	0,87	175,57	192,98	368,54
20	0,82	121,55	90,94	212,49
30	0,77	103,54	56,93	160,47
40	0,73	91,16	40,48	131,64
50	0,69	83,73	30,61	114,34
60	0,66	76,53	24,40	100,93
70	0,62	73,31	19,65	92,96
124	0,5	54,46	8,94	63,40
191	0,39	43,13	4,53	47,66
233	0,33	38,83	3,14	41,98
276	0,29	34,74	2,33	37,07
324	0,24	31,68	1,64	33,32
365	0,22	28,86	1,34	30,20
405	0,2	26,68	1,10	27,77

Graficando la función de obtiene la Figura 23.

Figura 23. Grafica de Tiempo Optimo para intervenir Sistema Woodward.



➤ **Oportunidad de mejora de las fallas del sistema de gobierno Woodward**

La grafica (Ver Figura 23), muestra que el establecer un mantenimiento periódico cada 2 meses como se esta realizando y aun así se mantiene el Tiempo Medio Entre Falla (TMEF) de 120 días, la refinería esta asumiendo un costo de 100 millones pesos anuales, por lo que se recomienda las siguientes acciones. Ver Tabla 15.

Tabla 15. Acciones recomendadas para atacar las fallas del Sistema de gobierno (Woodward)

Nivel	Actividades	Meta
Instrumental	Capacitar personal ejecutor	Mantener y mejorar competencia del personal.
Operacional	Implementar un programa de mantenimiento basado en condición de variables del equipo tales como presión de aceite, temperatura y respuesta a	Planear las reparaciones con el propósito de minimizar impacto de la intervención.

	comando operativos.	
Estratégico	Contemplar cambio de tecnología, los equipos están obsoletos y no se cuenta con repuesto original o nuevo.	Mejorar la mantenibilidad del equipo.

3.5.4. Error Humano

Como un patrón de falla del equipo, su valoración de riesgo es M, dado el impacto o las consecuencias económicas que conlleva y el número de apariciones.

Estos errores se presentaron estando las maquinas en servicio, lo que evidencia un desconocimiento de los equipos y para lo cual se recomienda las siguientes actividades. Ver Tabla 16:

Tabla 16. Acciones recomendadas para minimizar las fallas ocasionadas por error humano.

Nivel	Actividad	Meta
Instrumental	Capacitar personal	Mejorar competencia del personal.
	Documentar procedimientos de intervención	Estandarizar labores de mantenimiento.
	Realización de Análisis de Trabajo Seguro (ATS)	Valorar riesgo de la labor a ejecutar.

CONCLUSIONES

- Se efectuó un reconocimiento de las mejores prácticas para el gerenciamiento de activos, mantenimiento de clase mundial, FMECA, WEIBULL, RIESGO COSTO – BENEFICIO, RCM, y Modelos de Mejoramiento Continuo. De este estudio se tomaron los conceptos fundamentales para recomendar estrategia

para el mantenimiento de los equipos de generación de energía eléctrica de la Refinería de Cartagena mediante el uso de herramientas de confiabilidad.

- Se diseñó una estrategia para el mantenimiento de los equipos de generación de energía eléctrica de la Refinería de Cartagena mediante el uso de herramientas de confiabilidad para el gerenciamiento de los activos a cargo de la Superintendencia Técnica de la RCSA.
- Se efectuaron cálculos de costos para con ello hacer la evaluación de la Fase I del Modelo de Maduración de Proyectos, Evaluación de Alternativas, con ello se deberá iniciar la siguiente fase que incluye el desarrollo de la Ingeniería Básica.
- Se determinaron las acciones a seguir de acuerdo al marco conceptual de un sistema de mejoramiento continuo

BIBLIOGRAFÍA

A. Iserles, A first course in the numerical analysis of differential equations, Cambridge texts in applied mathematics, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

DOUNCE VILLANUEVA, Enrique. La productividad en el mantenimiento industrial. 2a. ed. México : Continental, 1998, 196 p.

EPRI AP-5974 (1988), Reliability and availability data for gas turbine generator procurement, Electric Power Research Institute.

Hines, W. W. y D. C. Montgomery (1994), "Probabilidad y estadística para ingeniería y administración", CECSA.

Mandel, J., The statistical analysis of experimental data, Dover Publications, Inc., Nueva York.

MATHER, Daryl. The maintenance scorecard. Creating strategic advantage. New York : Industrial press, 2005, 267 p.

MORA GUTIÉRREZ, Alberto. Mantenimiento estratégico para empresas de servicios o industriales. Medellín : AMG, 2005, 268 p.

NEWBROUGH, E. T. Personal de Albert Ramona y Asociados. Administración del mantenimiento industrial. 6a. ed. México : Diana, 1982, 96 p.

R. D. Richtmyer and K. Morton, Difference methods for initial value problems, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.

TAVARES, Lourival. Administración moderna de mantenimiento. Río de Janeiro : Novo Polo Publicações, 1999, 213 p.

TORRES, J. G., R. Sánchez, H. M. Zúñiga y L. E. Leyva (1995), "Cálculo de confiabilidad de generación termoeléctrica", XVIII Taller Internacional de Capacitación en Calderas, Recipientes a Presión, Temas Afines y Exposición Industrial, AMIME.

