

**MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA LA PLANTA DE
INYECCIÓN DE AGUA CAMPO TELLO, BASADO EN ESTUDIOS DE
CONFIABILIDAD**

**GERMÁN ARENAS PARRADO
HUGO ANDRÉS DELGADO CUERVO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2008**

**MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA LA PLANTA DE
INYECCIÓN DE AGUA CAMPO TELLO, BASADO EN ESTUDIOS DE
CONFIABILIDAD**

**GERMÁN ARENAS PARRADO
HUGO ANDRÉS DELGADO CUERVO**

Monografía de grado presentada como requisito para optar el Título de
Especialista en Gerencia en Mantenimiento

Director: Ignacio Antonio Gutiérrez Cuevas
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2008**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CAMPO TELLO Y SU ENTORNO	3
1.1 LOCALIZACIÓN	3
1.2 RESEÑA HISTÓRICA	3
1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL	4
1.4 MANTENIMIENTO ACTUAL	5
1.5 EQUIPOS CAMPO TELLO	6
1.6 DIAGNÓSTICO DEL MATENIMIENTO ACTUAL	7
1.7 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.8 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	8
1.9 OBJETIVOS DEL PROYECTO	9
1.9.1 Objetivo General	9
1.9.2 Objetivos específicos	9
2. ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD	10
2.1 RCM PROCESO Y METODOLOGÍA	10
2.1.1 Equipo de trabajo	11
2.1.2 Pasos Análisis de RCM	12
2.2 CARACTERIZACIÓN DE PLANTAS, EQUIPOS Y COMPONENTES	13
2.3 ANÁLISIS FUNCIONAL	14
2.4 DIAGRAMA DE ENTRADA FUNCIONES SALIDAS	15

2.5	ANÁLISIS DE LOS MODOS Y EFECTOS DE FALLA (FMEA)	17
2.6	ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ DE LAS FALLAS (RCFA)	23
2.7	COMFORMACIÓN DEL EQUIPO RCFA	28
2.8	DEFINICIÓN DE TIPOS DE FALLAS	28
2.9	VISIÓN GENERAL DEL ANÁLISIS DE WEIBULL	29
2.9.1	Método de Weibayes	32
2.9.2	Datos Weibull	32
2.9.3	Interpretación de los factores y parámetros	34
2.9.4	Lineamientos en Weibull que pueden ser cubiertos	35
2.9.5	Pronósticos de fallas o análisis de riesgos.	36
3	DESARROLLO DEL MODELO DE GESTIÓN	39
3.1	EVALUACIÓN PRELIMINAR DE CONDICIONES	39
3.2	ANÁLISIS DE CRITICIDAD	40
3.3	CREACIÓN DEL EQUIPO RCM	43
3.4	ANÁLISIS FUNCIONAL DE LA PIA – TELLO	43
3.5	PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN	46
3.6	MEDICIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL ANÁLISIS DE LOS DATOS	47
3.7	DIAGNÓSTICO DE LOS MODOS DE FALLAS PIA-TELLO	57
3.8	MODELAMIENTOS DE LOS MOTORES DE LAS UNIDADES DE INYECCIÓN	66
3.9	ANÁLISIS DE FALLAS	68
3.9.1	Análisis de Modos y Efectos de Falla FMEA	68
3.9.2	Definición del equipo RFCA	71
3.9.3	Análisis de falla basado en las causas raíz	72

3.9.4	Reporte final del RCFA	73
3.9.5	Presentación del reporte final RCFA al grupo implementador	74
3.9.6	Presentación del reporte final RCFA A LA GERENCIA	74
3.9.7	Implementación de las recomendaciones del RCFA.	74
3.10	ANÁLISIS DEL COSTO DE FALLAS EN PIA - TELLO	75
3.11	CÁLCULO DE TIEMPO ÓPTIMO DE MANTENIMIENTO	77
4.	RECOMENDACIONES PARA EL GERENCIAMIENTO DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO	79
4.1	SISTEMA DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD	79
4.2	SISTEMAS DE INFORMACIÓN KPIS	80
4.3	METODOLOGÍA	80
4.4	IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA	82
4.5	MEDICIÓN DE RESULTADOS DE ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS	83
5.	CONCLUSIONES	84
	BIBLIOGRAFÍA	85
	ANEXOS	87

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación Geográfica campo Tello	3
Figura 2. Estructura de mantenimiento	4
Figura 3. Distribución planta	6
Figura 4. Diagrama de flujo del RCM	10
Figura 5. Equipo de trabajo	12
Figura 6. Estructura de RCFA	26
Figura 7. Datos Weibull	30
Figura 8. Tiempo óptimo de mantenimiento	31
Figura 9. Curva de la Bañera	34
Figura 10. Planta de Inyección de Agua campo Tella	44
Figura 11. Modos de fallas Planta de inyección de agua por costos	47
Figura 12. Confiabilidad unidad A	48
Figura 13. Confiabilidad unidad B	50
Figura 14. Confiabilidad unidad C	52
Figura 15. Confiabilidad unidad D	53
Figura 16. Confiabilidad unidad E	55
Figura 17. Confiabilidad unidad F	57
Figura 18. Instrumentación y control PIA – TELLO	58

Figura 19. Confiabilidad de PLUNGERS	59
Figura 20. Válvulas de admisión y descarga	60
Figura 21. Confiabilidad de PACKING	61
Figura 22. Confiabilidad FLUID END / TAPAS	62
Figura 23. Confiabilidad DAMPENERS de Succión y Descarga de la Bomba	63
Figura 24. Confiabilidad cajas lubricadoras y lubricantes	64
Figura 25. Rotura de empaques	65
Figura 26. Cajas Reductoras	66
Figura 27. Motores WAUKESHA H24 GL	67
Figura 28. Motores CAT G398 DPC	68
Figura 29. Matriz para definir tipo de análisis de falla a ejecutar	70
Figura 30. Flujo del proceso de análisis de fallas	71
Figura 31. Operación y mantenimiento general de MASA 2006	77
Figura 32. Costos PIA – TELLO	77
Figura 33. Tiempo óptimo de mantenimiento general	78
Figura 34. Estrategia para el gerenciamiento del proceso RCM	81

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis Dofa del Mantenimiento	7
Tabla 2. Índices de ocurrencias	20
Tabla 3. Índices de detección	20
Tabla 4. Evaluación para las bombas reciprocantes	40
Tabla 5. Efectos de las Fallas	41
Tabla 6. Frecuencia de Falla	41
Tabla 7. Probabilidad de falla	42
Tabla 8. Criticidad del sistema	42
Tabla 9. Diagnóstico de confiabilidad unidad A	48
Tabla 10. Modos de falla más significativos unidad A	49
Tabla 11. Diagnóstico de confiabilidad unidad B	50
Tabla 12. Modos de falla más significativos unidad B	50
Tabla 13. Diagnóstico de confiabilidad unidad C	51
Tabla 14. Modos de falla más significativos unidad C	52
Tabla 15. Diagnóstico de confiabilidad unidad D	53
Tabla 16. Modos de falla más significativos unidad D	54
Tabla 17. Diagnóstico de confiabilidad unidad E	54
Tabla 18. Modos de falla más significativos unidad E.	55
Tabla 19. Diagnostico de Confiabilidad Unidad F	56
Tabla 20. Modos de Falla mas Significativos Unidad F	57
Tabla 21. Costos de mantenimiento	76

Tabla 22. Indicadores de gestión	80
Tabla 23. Optimización de Rutinas Propuestas	82

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Tablas de Evaluación de Condiciones

Anexo B. Reportes y depuración de fallas

Anexo C. Formatos TPM

RESUMÉN

TÍTULO: MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA LA PLANTA DE INYECCIÓN DE AGUA CAMPO TELLO, BASADO EN ESTUDIOS DE CONFIABILIDAD*

AUTOR(ES): GERMAN ARENAS PARRADO, HUGO ANDRÉS DELGADO CUERVO**

PALABRAS CLAVES: Confiabilidad, mantenimiento, fallas, RCFA, FMECA

En general el proyecto presentado se enfoca en el estudio basado en confiabilidad de los equipos funcionales de la planta de inyección de campo Tello, partiendo de una evaluación preliminar de la mantenibilidad de los equipos a analizar, conformando un grupo multidisciplinario, encargado de recolección de datos, análisis y seguimiento a las estrategias planteadas.

Se realiza un análisis del equipo funcional, estableciendo las funciones, parámetros y las fronteras del equipo funcional, tomando como referencia, el histórico de falla, donde se analizan las más recurrentes en los componentes operativos, y que han generado fallas en su funcionalidad. Por lo tanto, se determina aplicar el método de análisis basados en estudios de confiabilidad, teniendo como referencia el RCM, y varias de sus herramientas, FMECA y RCFA, donde se discrimina paso a paso los ítem a desarrollar para determinar el diagnóstico de las fallas que se presentan en cada unidad funcional, y su estatus se determina mediante el análisis de la distribución de Weibull donde nos muestra la zona en que se encuentra el componente o equipo.

Igualmente, se plantea las alternativas a tomar, para mejorar la estrategia de mantenimiento aplicada, y así, mejorar la confiabilidad de los equipos funcionales en la planta de inyección mediante su aplicación y seguimiento por los indicadores propuestos.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Director: Ignacio Antonio Gutiérrez Cuevas, Ingeniero Mecánico.

SUMMARY

TITLE: MODEL OF ADMINISTRATION OF MAINTENANCE FOR THE PLANT OF INJECTION OF WATER CAMP TELLO, BASED IN STUDIES OF RELIABILITY*

AUTHORS: GERMAN ARENAS PARRADO, HUGO ANDRÉS DELGADO CUERVO**

KEY WORDS: Reliability, maintenance, failures, RFCA, FMECA

In general, the presented project draft focuses on a reliability study based on maintenance management model for functional equipments of the water injection plant of Tello field, based upon a preliminary maintainability assessment of the equipment to be analyzed, forming a multidisciplinary group, responsible for data collection, analysis and monitoring of the raised strategies of the study.

We carried out an analysis of functional equipment, establishing roles, parameters and boundaries of functional equipment, taking as a reference the historical failures, analyzing the most recurring ones on the operating components, and which have generated failures in its functionality. Hence, is determined to apply a method of analysis based on studies of reliability, based on the RCM, and several of its tools, FMECA and RCFA. The items to determine the diagnosis of failures are elaborated step by step to for each functional unit, and their status is determined by analyzing the Weibull distribution which shows the area in which the component or equipment are.

In addition, strategies or alternatives to be taken are proposed, in order to improve the current maintenance strategy, that also contribute to improving the reliability of functional equipments in the injection plant, by implementing and monitoring the proposed indicators.

* Monograph

** School of Mechanical Engineering Management Specialization. Director: Director: Ignacio Antonio Gutiérrez Cuevas, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

La Estación de recibo de crudos Batería Tello de ECOPETROL ubicada en el departamento del Huila a 7 Km de la ciudad de Neiva, perteneciente al municipio de Tello (ver figura 1); está dentro de un programa de mejoramiento productivo de la SOH que obligan a un redireccionamiento hacia el aumento de su rentabilidad después de la reversión del 14 de febrero del año 2006.

Es por lo tanto común que en el lenguaje diario de este Campo petrolero se hable de productividad, confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, optimización, mejoramiento continuo, medio ambiente, indicadores económicos, programas de producción, mantenimiento proactivo, clientes y proveedores, estandarización, certificación de procesos, mejoramiento del clima laboral y tantos otros conceptos que ahora son imprescindibles en cualquier empresa que quiera asegurar su futuro en el mercado y estar dentro de los márgenes de “Clase Mundial” operando bajo el contexto de la excelencia.

Producto de la necesidad de asegurar que lo que hoy se tiene exista mañana y en mejores condiciones, han surgido diversos procesos que buscan el mejoramiento de la situación de la empresa y otorgarle las herramientas necesarias para poder afrontar esa voraz realidad de la globalización de la economía, que ineludiblemente está eliminando del mercado las empresas que no son capaces de ser competitivas bajo las exigencias del mercado.

ECOPETROL S.A., al ser una Sociedad Económica Mixta, de carácter comercial organizada bajo la forma de Sociedad Anónima del orden Nacional y socialmente responsable se encuentra en un proceso de expansión a nivel internacional, de tal manera que se dispone de cada vez mas fondos para realizar las actividades propias de su funcionamiento y, por obvias razones, de muchos mas fondos para invertir en programas de inversión en nuevas plantas o reposición de equipos, es por esto que en Ecopetrol, uno de los procesos que se está tratando de implantar, es la definición de programas que estén respaldados por evaluaciones económicas, con el fin de destinar los recursos de la manera más rentable posible.

Uno de estos procesos es el denominado RCM (Reliability Centered Maintenance), mediante el cual se pretende obtener un programa óptimo de mantenimiento preventivo para cada una de las plantas de proceso que hay en los diferentes campos. Pero debemos tener muy claro que no basta con definir un nuevo programa de mantenimiento sin generar una serie muy importante de recomendaciones orientadas a la actualización y optimización de sus procesos administrativos sobre la operación, reflejados claro está en las consecuentes modificaciones a la estructura orgánica utilizada para la operación y

mantenimiento de los procesos industriales, así como de las requeridas para brindar soporte administrativo.

En el presente estudio se ha tomado como punto de partida el listado de actividades de mantenimiento preventivo encaminadas a combatir los modos de falla dominantes de la planta de Inyección de Agua, definido en un análisis RCM, pero que hasta el momento no se ha traducido en la realización sistemática de programas de mantenimiento y desarrollo del Gerenciamiento.

Es por lo tanto, que a partir del modelo de gestión de mantenimiento se ha elaborado un análisis de la situación operacional actual, y un esquema que asegure la ejecución de los programas de mantenimiento en estas unidades de proceso, y un seguimiento de forma gerencial para medirlos mediante Kpis (Key Performance Indicador) para la toma de decisiones.

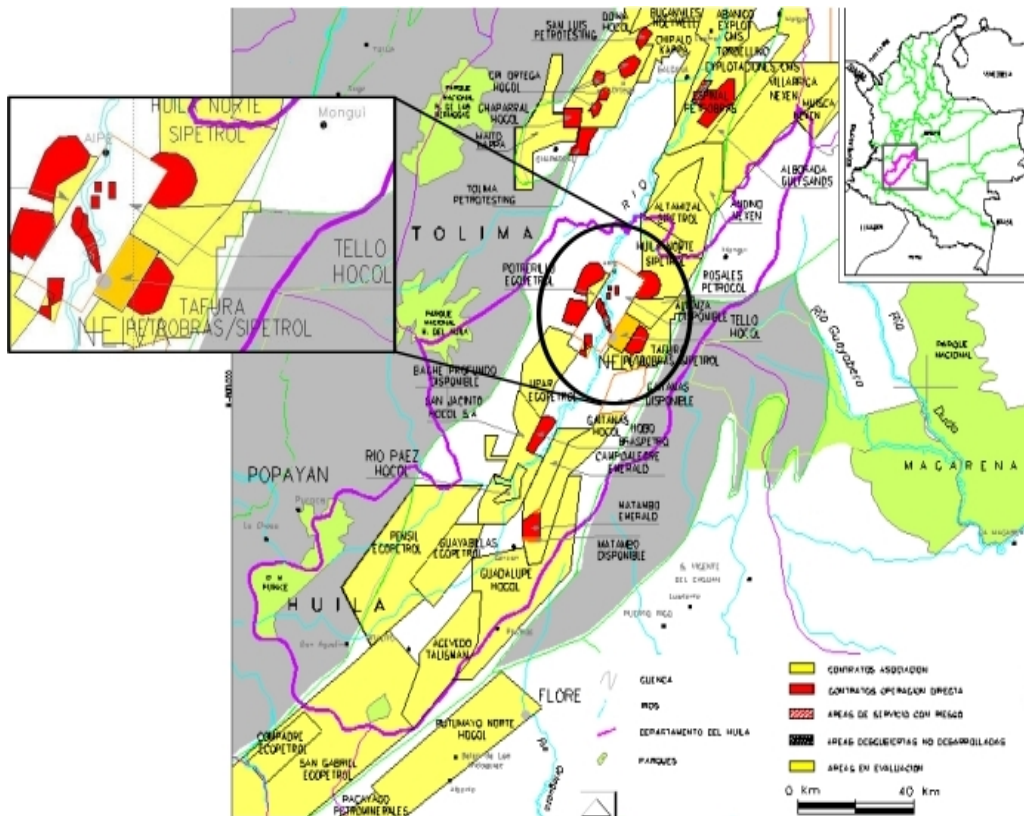
Podrá encontrarse en este estudio la recomendación sobre el proceso de mantenimiento de las instalaciones productivas y su respectivo Gerenciamiento.

1. CAMPO TELLO Y SU ENTORNO

1.1 LOCALIZACIÓN

Campo Tello está ubicado en el Valle Bajo del Río Ceiba, en las inmediaciones Nororientales de la ciudad de Neiva, capital del Departamento del Huila y tiene una extensión de aproximadamente 113 Km² (11.250 Ha), abarcando terrenos del Municipio de Neiva, corregimiento de Fortalecillas, vereda El Venado, sector El Venadito, sector Llanitos, vereda La Jagua, vereda Ceibas Afuera, vereda La Mojarra, vereda La Mata y vereda El Centro.

Figura 1. Ubicación Geográfica campo Tello



Fuente: Archivos Hocol S.A

1.2 RESEÑA HISTÓRICA

Las actividades tendientes a la explotación y producción petrolera iniciaron bajo la Concesión Campo Tello 1161 en Diciembre 31 de 1971, fecha en que el Ministerio de Minas y Energía firman el contrato que así lo define, otorgando a Tennessee

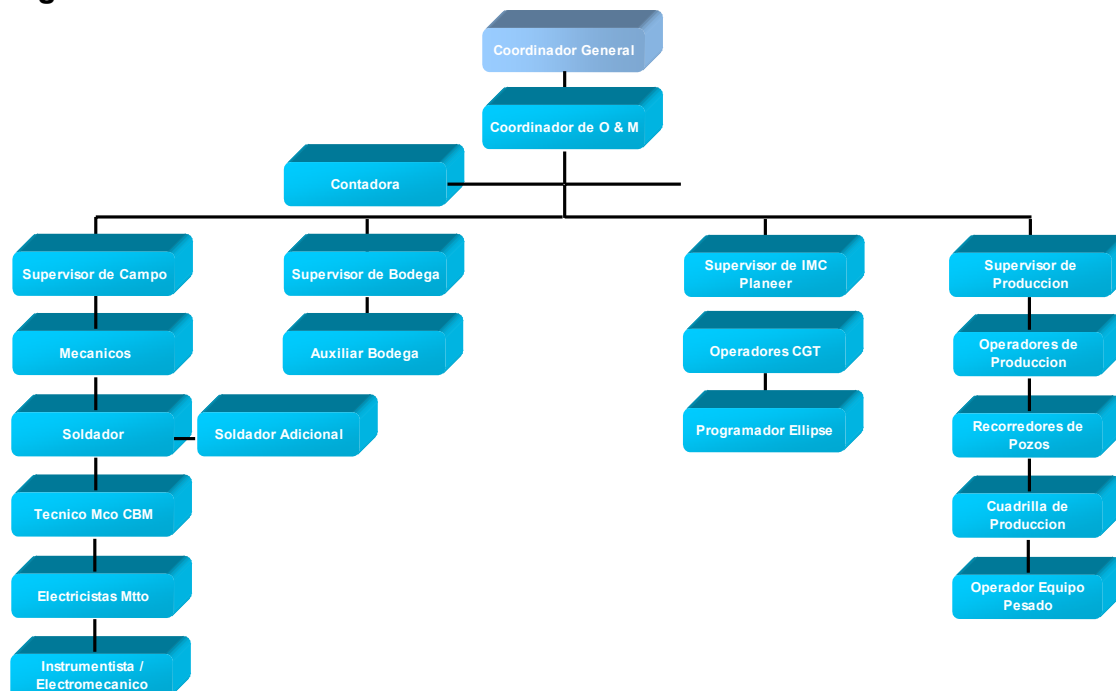
Colombia S.A un área total de 24998 Ha, la cual el 19 de Junio de 1978 se reduce al área actual del contrato (11250 Ha). A partir de 1979 el área de concesión es asumida por HOCOL S.A. hasta el día 13 de Febrero de 2006, donde revierte a la Agencia Nacional de Hidrocarburos y comienza a ser operada por ECOPETROL S.A.

El descubrimiento del campo data del año 1972 cuando la compañía Petróleos Colombo Brasileños (COLBRAS) perforó el pozo exploratorio Tello-1, en el cual se probaron las areniscas de la formación Monserrate con una tasa de producción de 800 BPD. La presión inicial fue de 3484 psi @ 6300 ft BNM y la del punto de burbuja 846 psi, por lo que se clasificó como un yacimiento subsaturado, donde la producción es controlada por el mecanismo de gas en solución, en menor grado por segregación gravitacional y un moderado empuje hidráulico.

Luego de alcanzar una producción máxima de 14000 barriles de petróleo por día en el año de 1985, con el fin de reducir la declinación de la presión, retrasar el tiempo de llegada del punto de burbuja, la cual en algunos sectores del campo ya se había alcanzado, y mejorar la eficiencia de barrido, en Octubre de 1997 se inicio el proyecto de recobro mejorado con inyección de agua, así como el desarrollo de la zona norte del campo y la perforación infill, lo que incrementó notablemente la producción y las reservas, alcanzando en Abril de 2001 una producción máxima de 15552 barriles por día

1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

Figura 2. Estructura de mantenimiento



Fuente: Organigrama operativo 2006 Mecanicos Asociados S.A.

1.4 MANTENIMIENTO ACTUAL

El mantenimiento esta orientado a la prevención y detección temprana de fallas. Con programas de mantenimiento preventivo, predictivo basado en condición, correctivo, inspección, remedial y mantenimiento por Campaña, los cuales aseguran:

- Integridad de la planta, Equipos y personas.
- Maxima disponibilidad de los equipos.
- Máxima producción.
- Cero fallas con perdida de tiempo y equipos.
- Reducción de costos de mantenimiento.
- Cumplimiento de las normas ambientales.
- Extensión a la vida útil del equipo.

El tipo o tipos de mantenimiento a ser realizado en los Equipos son definidos de acuerdo con los siguientes criterios:

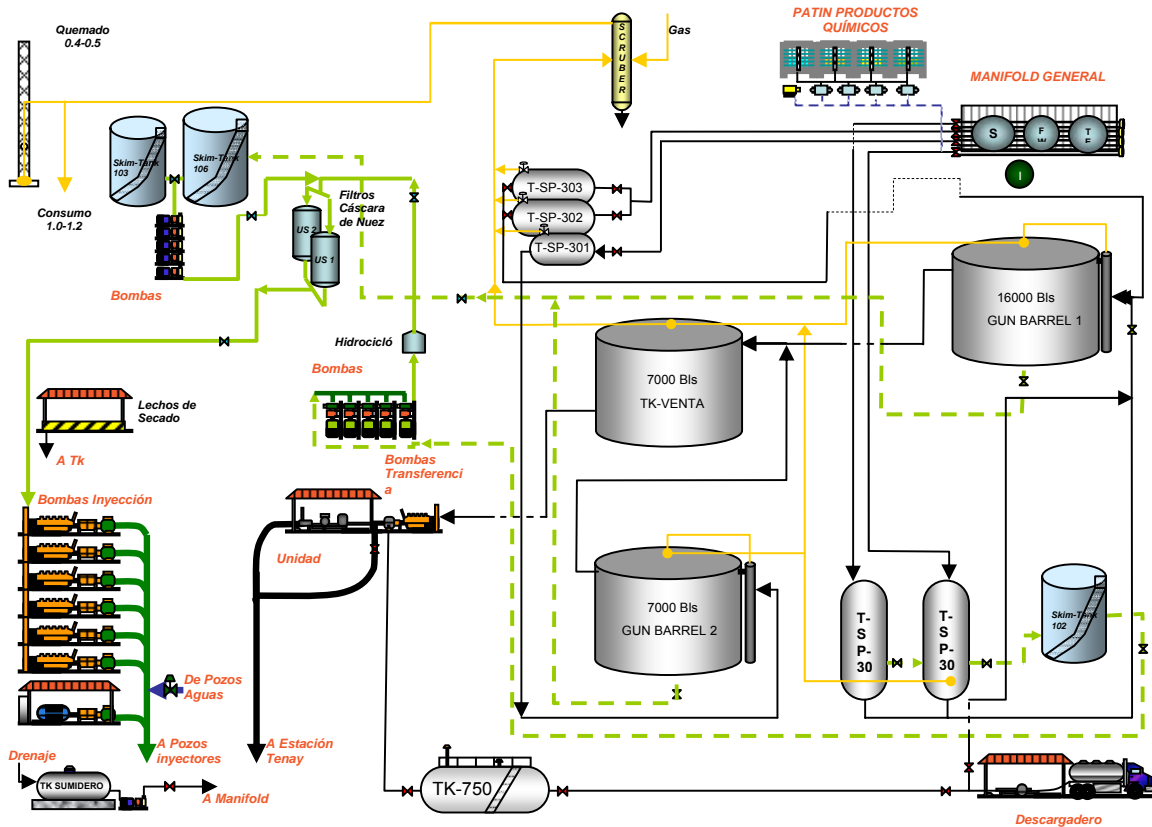
- Clase de Equipo
- Impacto en la integridad de la planta
- Importancia del Equipo dentro del proceso productivo.
- Recomendación del fabricante
- Manejo de garantías.
- Relación costo / beneficio.
- Experiencia operacional (Historial).
- Análisis del mantenimiento.

Los tipos de análisis para la gestión del mantenimiento se manejan evaluando los siguientes criterios:

- Reporte mensual del mantenimiento, mostrando los principales indicadores de gestión del desempeño del mantenimiento como son: Disponibilidad, confiabilidad, porcentaje de ordenes de trabajos ejecutadas, % horas hombre ejecutadas vs planeadas, costos, etc.
- Revisión periódica de la forma de ejecución del mantenimiento vs costos usando la técnica de Reliability Management
- Revision de las fallas crónicas o recurrentes de los equipos usando la técnica de análisis de fallas para su identificación de la causa raíz.
- Análisis de las fallas esporádicas que hallan afectado la integridad de los equipos, producción y/o personas, usando la técnica de análisis de causa raíz de fallas.
- Análisis estadística de la ejecución del mantenimiento en el CMMS.
- Análisis de los informes de los mantenimientos predictivos.

1.5 EQUIPOS CAMPO TELLO

Figura 3. Distribución planta



Fuente: Arenas / Delgado

La capacidad nominal de los diferentes subsistemas de la planta se resume a continuación:

- Bombeo a filtros: 56 KBPD (5 bombas en operación y 2 bombas en “standby”)
- Filtros: 76 KBPD máximo (suponiendo que cada filtro se lava al menos una vez al día).
- Retrolavado: 103 KBPD (no se tiene bomba de “standby”)
- Inyección agua: 52 KBPD (5 bombas en operación y 1 bomba en “standby”)

KBPD = miles de barriles por día

1.6 DIAGNÓSTICO DEL MANTENIMIENTO ACTUAL

Tabla 1. Análisis Dofa de Mantenimiento

PERFIL INTERNO DE DEBILIDADES Y FORTALEZAS

A. CAPACIDAD GERENCIAL			
INDICADORES INTERNOS	DEBILIDAD	NEUTRO	FORTALEZA
Indicadores de gestión AO&M			X
Descentralización y delegación.			X
Control de la documentación	X		
Procedimiento comunicación	X		
Cumplimiento de MASA en entrega.			X
Sistema seguimiento actividades O&M			X
Estandarización de reportes	X		
Seguimiento de acciones	X		
Permisos de trabajo			X
B. CAPACIDAD DE TALENTO HUMANO			
INDICADORES INTERNOS	DEBILIDAD	NEUTRO	FORTALEZA
Experiencia en plantas.			X
Multidisciplinariedad del grupo			X
Plan de Capacitación			X
Entrenamiento específico en planta	X		
Orientación a la calidad del trabajo			X
Estudio de los procedimientos de planta	X		
C. CAPACIDAD FINANCIERA			
INDICADORES INTERNOS	DEBILIDAD	NEUTRO	FORTALEZA
Sistema de información contable			X
Presupuestación y costos AO&M	X		
Capacidad de nuevas inversiones		X	
D. CAPACIDAD TECNOLÓGICA			
INDICADORES INTERNOS	DEBILIDAD	NEUTRO	FORTALEZA
Falta conexión con la red Nacional	X		
Equipos comunicación (celular, Avantel)			X
Software para seguimiento O&M			X
Sistematización de información O&M			X
Sistema web y emial			X
Procedimientos internos	X		

1.7 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro del proceso de extracción y producción de crudo en los campos petroleros; la inyección de agua se ha convertido en uno de los procesos mas críticos de la operación, ya que de este, depende en muchos casos la producción de crudo de un campo petrolero; las repetidas fallas en motores, bombas, reductores, válvulas de succión y descarga, Plunger, parking, filtros, bombas de transferencia, etc., se han convertido en el problema cotidiano de este proceso.

Es por esto que la aplicación basada en estudios de confiabilidad, para el mantenimiento de plantas de inyección de agua en campos petroleros, constituye

un proceso eficaz y eficiente de mejora para asegurar la confiabilidad de los sistemas. Con la optimización de los recursos e incrementando las estrategias de mantenimiento proactivo y mitigando las reactivas, se aseguran la ejecución de actividades, que aumentan la confiabilidad de los equipos, con lo que conlleva a que mejore la inyección del agua y la producción del campo.

La aplicación de este proceso tal como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) se ha convertido en los campos petroleros de Colombia, en una necesidad inevitable para asegurar la funcionalidad de los equipos y la optimización de sus procesos; donde existen continuas fallas en los sistemas operacionales. Por ello las nuevas técnicas aplicadas para el mantenimiento, han cobrado una gran popularidad y muchas organizaciones se han decidido a tomar el camino de implementarlas.

El desarrollo de este proceso del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es una de las grandes alternativas que la operación y mantenimiento de Bombas de inyección de agua en campos petroleros, puede tomar para el fortalecimiento de sus procesos productivos; de esta manera se asegura su producción, sostenimiento y crecimiento

1.8 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Existen diversas metodologías para la implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), y se considera que la interacción y el reconocimiento frente a las operaciones y mantenimientos de plantas de inyección de agua en campos petroleros., confrontada con la documentación existente, es un inicio primordial e importante dentro de todo el proceso.

La documentación es el soporte del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), pues en ella se plasman no sólo las formas de operar y mantener un campo petrolero, sino toda la información que permite el desarrollo y seguimiento de los procesos y la toma de decisiones, relacionando todas las fallas y averías que pueden incurrir en un sistema operacional.

La metodología que se quiere proponer cumple el objetivo de servir como base para implementar el Modelo de Gestión de Mantenimiento basado en un estudio de Confiabilidad. Las tareas que se relacionan en cada etapa contribuyen al logro de los objetivos planteados y algunas pueden ser desarrolladas paralelamente, de acuerdo con la dinámica del propio proceso de implementación.

Será constituido en etapas, que cuentan con objetivos, (general y específicos) y siguen un orden cronológico. Los requisitos relacionados en cada etapa deben cumplir con el logro de los objetivos.

1.9 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.9.1 Objetivo general

Desarrollar un Modelo de Gestión de Mantenimiento para la planta de inyección de agua Campo Tello, basados en estudios de confiabilidad.

1.9.2 Objetivos específicos

- Analizar y evaluar el sistema operacional de la planta.
- Proponer grupo interdisciplinario de mejoramiento continuo.
- Calcular la confiabilidad de todos los equipos mayores que conforman las bombas de inyección de agua (PIA-TELLO).
- Replantear la estrategia de mantenimiento soportada en los resultados obtenidos en el estudio de confiabilidad de las bombas de inyección de agua (PIA-TELLO).
- Establecer indicadores de seguimiento del modelo de gestión.
- Establecer las pautas para la implementación de los documentos pertinentes al modelo de gestión.

2. ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

2.1 RCM PROCESO Y METODOLOGÍA

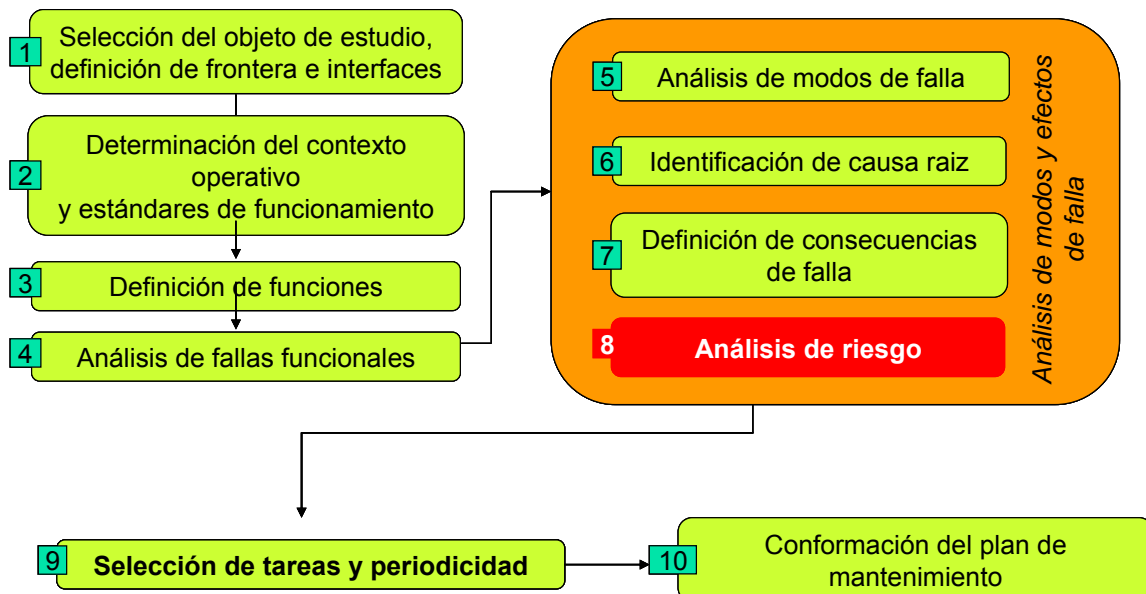
El análisis RCM es un Método sistemático y lógico con el cual se analizan las funciones, modos de fallas de las funciones y acciones preventivas para estos modos de falla. El análisis RCM valida la criticidad del equipo y se basa en el uso del análisis de los modos y efectos de falla (FMEA).

Desarrollada por la United Airline de Estados Unidos, el RCM analiza cada sistema y cómo puede fallar funcionalmente. Los efectos de cada falla son analizados y clasificados de acuerdo al impacto en la seguridad, operación y costo. Estas fallas son estimadas para tener un impacto significativo en la revisión posterior, para la determinación de las raíces de las causas.

El RCM se basa en las siguientes premisas, como lo muestra la figura 4:

- Análisis enfocados en funciones
- Análisis realizados por equipos naturales de trabajo (operaciones mantenimiento, especialistas técnicos) conducidos por un facilitador experto en la aplicación de la metodología.

Figura 4. Diagrama de flujo del RCM



Fuente: Daniel Ortiz Plata

El proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad se divide en dos grandes pasos, uno inicial llamado taller de RCM, que cubre la parte de información de los activos o equipos que pertenecen a la función o funciones a analizar, los análisis de RCM, identificación los modos de fallas dominantes, sus efectos y consecuencias (análisis del riesgo) para determinar su criticidad, posteriormente definir las tareas de prevención o mitigación costo-efectivas.

Una segunda fase, que contempla la consolidación de todas las tareas para facilidad de su planeación, su programación y ejecución, para su posterior análisis del desempeño de las mismas y determinar los ajustes necesarios al análisis inicial.

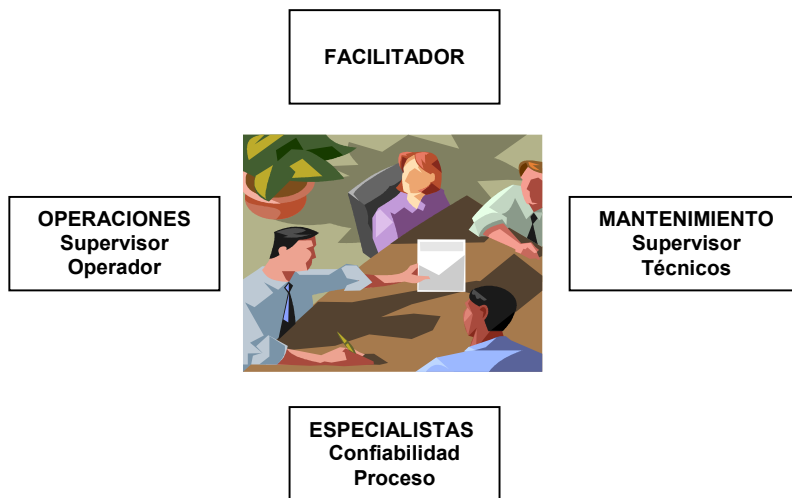
Una metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad, requiere contestar las siguientes preguntas sobre los activos (SAE JA 1011):

- ¿Cuales son las funciones y los estándares de desempeño del activo en su contexto operativo actual?
- ¿De que manera el equipo de cumplir sus funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional?
- ¿Cuál es el impacto de cada falla funcional?
- ¿Qué se puede hacer para prevenir cada falla funcional?
- ¿Qué debería hacerse si no se pueden hallar tareas preventivas aplicables?

2.1.1 Equipo de trabajo. El mantenimiento Centrado en Confiabilidad tiene en cuenta la experiencia de todos los involucrados en la gestión de los activos de una empresa, desde el diseño, construcción, operación mantenimiento, basados en las funciones de los sistemas y su contexto o ambiente operacional, para desarrollar las estrategias de mantenimiento adecuadas para los activos. A partir de este principio, el mantenimiento estará lógica y económicamente justificado, resultado de un consenso entre operaciones, mantenimiento, ingeniería, seguridad, ambiente, con el fin de lograr los mejores beneficios por el buen funcionamiento de los equipos.

- *Operaciones:* Representado por un supervisor y/o operador, aportan el conocimiento sobre el efecto y consecuencia de la falla.
- *Mantenimiento:* Representado por los supervisores o técnicos de las especialidades respectivas, aportan las causas y soluciones a las fallas de los equipos.
- *Especialistas:* Pueden ser los ingenieros de soporte de confiabilidad o ingenieros de proceso, aportan conocimiento de causas. La participación de los ingenieros de proceso normalmente se hace bajo requerimiento para resolver inquietudes o alguna controversia.
- *Facilitador:* Es la persona experta en la metodología de RCM y su labor consiste en fijar reuniones de análisis y asegurar que los análisis del equipo de trabajo se hagan de acuerdo a la metodología.

Figura 5. Equipo de trabajo



Fuente: Risk AM

2.1.2 Pasos Análisis de RCM. Los pasos para el análisis de RCM se puede describir en los siguientes pasos:

○ **Falla Funcional:**

- División de la planta en sistemas funcionales.
- Descripción de las funciones y fallas funcionales.
- Identificación de los equipos asociados a cada función.
- Definición de los modos de falla y sus causas para cada tipo de equipo.
- Análisis de las características de los modos falla.

○ **Evaluación de la criticidad:**

- Tiempos estimados de falla.
- Efectos para cada modo de falla.
- Criticidad del modo falla.

○ **Evaluación de la criticidad:**

- Tareas de mantenimiento potenciales.
- Tiempo estimado de falla con equipo mantenido.
- Análisis costo beneficio.
- Selección de tareas.
- Racionalización de tareas.
- Análisis de efectividad de las tareas.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE PLANTAS, EQUIPOS Y COMPONENTES

- **Generalidades.** Toda administración de mantenimiento debe tener este concepto fundamental y la estructura de la base de datos de las plantas y sus elementos debe obedecer a una adecuada caracterización de sus equipos y componentes para una efectiva gestión de activos.

Este registro de plantas y equipos se debe mantener al día, debido a que es la base de todos los sistemas de gestión de mantenimiento. Es importante definir con proyectos y las dependencias involucradas, los nuevos registros de las nuevas instalaciones, las modificaciones y las situaciones, actualizándose la base de datos de los equipos con el control de cambios debido.

- **Códigos de Identificación.** Hay dos conceptos que se deben manejar, o códigos que se manejan en confiabilidad:

Equipo, o TAG de identificación contractual o el que se utiliza en el diseño y construcción de las plantas.

Componente, o número de identificación para trabajos, WIN code, del inglés, Works Identification Number. Los nombres pueden variar, pero estos son los más comunes que se usan.

- **Definición de Equipo.** Un tema que ha de enfocarse con cuidado al recopilarse los registros de planta, es la determinación de los que constituye un equipo. Estos equipos o la mayoría de ellos pueden estar interconectados entre sí de alguna manera, por ejemplo, el caso de una planta petroquímica o en un submarino nuclear.

La identificación o TAG de un equipo identifica una función de proceso y están dados en los diagramas de tubería e instrumentación, P&IDs (Piping and Instrument Diagrams), durante el diseño, selección de equipos, compra e instalación o montaje.

- **Definición de Componente.** Se ha hablado de la definición de equipo, el cual es específico de una función operacional; la definición de componente, es específico a la máquina.

Un componente se define como una pieza individual y normalmente sustituible de un equipo y cuyos campos de información relacionada serían datos específicos de diseño. Si estos componentes son excepcionalmente grandes o complejos, se pueden considerar como equipos.

Las fallas deben registrarse contra ambos códigos, equipo y un código asociado al componente. Algunas fallas son relacionadas al proceso, ejemplo, corrosión por H₂S, H₂, etc., mientras otras son relacionadas a la máquina o componente, como deficiencias estructurales.

- **Estructura de Equipos y Componentes de una Planta.** Si el equipo es muy grande o complejo, es difícil analizar los modos y las consecuencias de las fallas, haciendo igualmente difícil de determinar los requisitos de mantenimiento. Para estos casos, es mejor dividir los equipos en unidades lógicas precisando en la mayoría de los casos, un enfoque estructurado o jerárquico de equipos o componentes.

Factores que inciden en la estructura o jerarquía de la planta:

- Grado de interdependencia de los equipos de la planta.
 - Tamaño de la planta, si la planta es pequeña, la estructura puede ser sencilla.
 - Mezcla entre los elementos estáticos, móviles y transportables. Para los elementos móviles y transportables, la función asume un papel más importante.
 - Centro de costos.
- **Jerarquía de Equipos.** Son un grupo de equipos de planta que son interdependientes y adyacentes los unos a los otros. Una característica, es que la mayoría de los equipos que la componen están interconectados, ya sea eléctricamente, por control o líneas de proceso, y cualquier falla de alguno de ellos afectará directamente la operación de la unidad o sus posibilidades potenciales.

Una vez definidos los términos principales, podemos establecer la jerarquía de equipos.

2.3 ANÁLISIS FUNCIONAL

Las fallas de los equipos pueden tener diferentes efectos en una unidad de proceso. Algunas fallas no se afectan directamente la disponibilidad de la planta o proceso, requiriéndose solo un proceso. Otros modos de falla pueden tener efectos sobre la salud o seguridad de las personas o equipos, el ambiente o sobre la capacidad de producción afectando la confiabilidad y disponibilidad de la planta de manera diferente.

Por lo anterior, para establecer los correctivos adecuados sobre los activos, la unidad de proceso se subdivide en sistemas con grupos de de equipos pertenecientes a cada uno de ellos. Cada sistema representa lógicamente una función de proceso, que normalmente corresponden a subprocesos de todo el proceso general. Cada sistema funcional debe tener una función primaria y cada una de estas funciones, tener asociada una ecuación de pérdida de producción para las consecuencias económicas en los eventos de pérdida de esta función.

Durante el análisis de funcional, se definen las funciones de plantas/sistemas/equipos, y elabora unos diagramas que permiten una fácil

interpretación de los mismos. Estos diagramas son el diagrama de entrada funciones salida, EPS, y el listado de los equipos de protección asociados a cada sistema o equipo.

2.4 DIAGRAMA DE ENTRADA FUNCIONES SALIDA

Los diagramas EFS permiten una fácil visualización de un proceso que puede ser complejo en extremo, pero que resulta reducido a una simple caja negra con entradas, funciones y salidas, con ciertas características, las cuales pueden ser:

- Fácil visualización del proceso.
- Fácil entendimiento del proceso
- Identificación rápida de las variables de control.
- Centra la atención del equipo de trabajo para análisis.

El trabajo comienza con identificación de las fronteras del sistema en estudio.

➤ Definir entradas

- De ser posible especificar los rangos de operación normal
- No exagerar en detalle de entrada para no recargar el diagrama y perder una fácil visualización del mismo. Indicar las entradas que influyan directamente en el proceso.
- Las entradas pueden venir o no, de otros sistemas.
- Las entradas pueden estar conectadas a sistemas de distribución, como de tuberías, cableados, etc. O ser suministradas manualmente. Si existen entradas solo relacionadas con subsistemas internos usarlas preferiblemente únicamente al analizar dicho subsistema.

➤ Definir salidas

- Las salidas deben especificar los intervalos de operación. Solo indicar valores que sean medidos durante la operación normal del sistema, dicha medición puede ser manual, automática, continua o no. La razón de esto es que se define como falla operacional de la desviación de dichos intervalos de operación y dicha medición de identificar el disparo que genera las acciones a tomar.
- Los intervalos de operación serán, valores absolutos y por lo tanto tendrán un valor máximo y mínimo, en algunos casos basta con especificar un limite superior o inferior, ya que el otro limite esta limitado por capacidades de diseño.
- Las mediciones sobre las salidas pueden ser ejecutadas fuera o dentro del sistema de análisis.
- Cada salida debe estar relacionada con una función, y debe existir una función por cada salida.

➤ **Definir funciones**

- Usar frases sencillas como verbos en infinitivo, como calentar, enfriar, separar, elevar presión. La frase más común es enviar.
- No confundir la función con el equipo que la ejecuta.
- Relacionar una función y solo una función con el equipo que la ejecuta.
- Las funciones a nombrar son las funciones primarias del sistema.
- Las funciones primarias están relacionadas con los productos primarios, secundarios y desechos.

➤ **Estándares de desempeño.** Todos los estándares de desempeño deben ser incluidos en las declaraciones de las funciones del sistema, logrando de esta manera especificar claramente lo que se desea con la existencia del sistema en particular. Si es necesario se debe incluir estándares sobre calidad, seguridad, energía, eficiencia, normativas ambientales que se deben cumplir, etc. Estos estándares deben ser fijados por personal de mantenimiento y operaciones en conjunto avalados por especialistas de ser requeridos.

➤ **Criterios de funcionamiento.** El equipo puede satisfacer las necesidades operativas de acuerdo a su confiabilidad inherente, por lo cual fue diseñado y seleccionado. Cuando se requiere que se satisfaga condiciones más allá de lo que es capaz de hacer, con mantenimiento no se puede obtener, requiriéndose de un mayor análisis y definir una función de rediseño si es necesario, inclusive, cuando el equipo opera en condiciones por debajo de su diseño, puede generar problemas que con programas de mantenimiento no se solucionan.

➤ **Funciones dentro del contexto operativo.** El medio donde opera el equipo, la calidad de entradas (insumos, energía, servicios), la calidad y el servicio al cliente son posibles variables del contexto operativo, que pueden cambiar de un sitio a otro influyendo directamente en la forma de operación y mantenimiento del equipo, por lo tanto, el mantenimiento para componentes idénticos pueden ser muy diferentes, si estos operan en diferentes contextos operativos.

➤ **Diagrama funcional.** Se realiza para las plantas o cuando el sistema es demasiado complejo, y consiste en un diagrama de bloques del sistema o planta de análisis.

No se puede confundir las funciones de cada bloque, con el equipo que las ejecuta.

➤ **Identificación de equipo de cada función.** Una vez definidas las funciones a analizar se les asocia cada uno de los equipos o componentes. Un equipo solo

puede pertenecer a una función, y los modos de fallas que pueden presentarse en cada uno de ellos pueden afectar la función en análisis.

2.5 ANÁLISIS DE LOS MODOS Y EFECTOS DE FALLA (FMEA)

El FMEA es un análisis inductivo en el cual se hace la relación entre los sistemas y los componentes en su contexto operacional y se realiza identificando las posibles consecuencias a través de ¿qué pasa si...?, las recomendaciones realizadas son hechas por eliminación, prevención y mitigación de los efectos de las fallas.¹

La técnica del análisis RCM brinda al equipo de trabajo la revisión de los sistemas y fallas de los componentes y acciones definidas para crear los programas de mantenimiento preventivo y mantenimiento predictivo, optimizando los existentes hasta en un 40%. Define las barreras administrativas y físicas para prevenir errores humanos, estudiando cambios en el diseño e incrementando la participación de empleado y propietario en el mejoramiento de los procesos de la planta.²

Para el estudio se requirió la formación de un grupo de trabajo multidisciplinario conformado por operarios, supervisores, personal de mantenimiento y gerencia de producción, entre ellos se asigna un líder de RCM.

Con la definición de este grupo se realizó el plan de pre-análisis que comprende la recolección de la información sobre aspectos como:

- Información de fallas
- Plano general para determinar los subsistemas
- Listado de las fallas.
- Descripción del proceso o equipo.
- Análisis de fallas.

El análisis de los modos y de los efectos de fallo (FMEA) es metodología para analizar problemas potenciales de la confiabilidad temprano en el ciclo de desarrollo donde está más fácil tomar acciones. FMEA se utiliza para identificar modos de fallo potenciales, para determinar su efecto sobre la operación del producto, y para identificar acciones para atenuar las faltas.

El Análisis de Modos y Efectos de Fallos es una herramienta de planificación de la calidad que de forma sistemática y analítica pretende identificar y eliminar los posibles problemas potenciales asociados con el diseño y la fabricación de un producto. Responde a las siglas FMEA, que corresponden a las iniciales de su nombre en inglés: Failure Modes & Effects Analysis.

¹ BLANCHARD, Benjamín S. Ingeniería logística. Isdefe. Madrid. 1995, P. 70-77.

² AMENDOLA, Luis A. Gestión de proyectos de manufactura. Upv. Valencia. 2002, P. 73

El FMEA puede aplicarse al diseño de los productos, con el fin de mejorarlo, o a los procesos de fabricación, con el fin de eliminar posibles defectos que tienen lugar en la fabricación de los productos. El procedimiento es similar en ambos casos, pero en el primero se parte de fallos potenciales de los diseños que tienen efectos directos sobre los consumidores y, en el segundo, de fallos potenciales de los procesos que tienen efectos internos dentro de la instalación productiva.

Aplicar el FMEA consiste básicamente en la construcción de un documento que de forma sistemática refleja los pensamientos generados por el personal directamente implicado en el diseño o el proceso estudiado sobre los efectos de consecuencias de determinados fallos. Este documento servirá para determinar qué fallos y qué causas de estos fallos deben ser eliminados con mayor prioridad y permite controlar los avances realizados al respecto.

No obstante, como en otras herramientas de la calidad, lo que importa es conocer la idea básica que se pretende poner en marcha, puesto que la aplicación práctica varía considerablemente de unas empresas a otras.

A continuación se muestran los pasos a tener en cuenta para desarrollar un análisis de modos y efectos de fallos FMEA:

PASO 1: Determinar la función (descripción y propósito) del componente, producto, servicio o proceso.

Se debe partir de un componente, producto o servicio en el caso de aplicar el FMEA al diseño, o de un proceso en el caso de aplicar el FMEA a los procesos. Es importante tener clara la función que deben desempeñar estos productos y procesos, es decir, que necesidades deben satisfacer. Esto permite identificar los distintos modos de fallo que pueden aparecer.

PASO 2: Identificar los posibles modos de fallo.

Para cada producto o proceso analizado deberán identificarse los posibles modos de fallo. Por ejemplo, si se estudia el diseño de una lata de cerveza, podrían considerarse los siguientes modos:

- Se rompe el anillo antes de conseguir abrirla.
- Se vierte el contenido al intentar beber directamente de la lata.
- Salpica al verter el contenido de la lata en un vaso.
- Se genera mucha espuma al abrir la lata.
- La lata tiene poca estabilidad y se cae fácilmente.

PASO 3: Determinar el posible efecto de los fallos. Evaluar Severidad.

El siguiente paso consiste en determinar el posible efecto de cada fallo. Este efecto se produce sobre los clientes en caso de tratarse de productos o servicios, o sobre los productos fabricados en caso de tratarse de procesos.

Más que el propio efecto, lo que resulta importante es determinar la gravedad que puede tener. Esto se mide a través de índice de SEVERIDAD (S) que utiliza una escala de 1 a 10 para puntuar la gravedad de las consecuencias de este efecto. Es importante tener definido a priori los criterios que se siguen para aplicar una u otra puntuación. Un modelo de escala puede ser el siguiente:

Mínima: Es poco razonable esperar que este tipo de fallo cause algún efecto real sobre el funcionamiento del producto. El cliente ni siquiera será capaz de detectarlo. Se califica como 1

Baja: El fallo causa sólo ligeras molestias a los clientes. Estos detectarán sólo ligeros inconvenientes en el funcionamiento del producto. Se califica 2 y 3

Moderado: El fallo genera cierta insatisfacción en los clientes. Estos se sienten molestos y se percatan rápidamente del problema. Se califica 4, 5 y 6

Alto: Alto grado de insatisfacción de los clientes. Gran degradación del producto debido a este fallo. Se califica 7 y 8.

Muy alto: El fallo puede tener consecuencias catastróficas. El producto se ve seriamente o completamente dañado por el fallo. Se califica 9 y 10.

PASO 4: Identificar las causas más probables para cada fallo. El siguiente paso consiste en determinar, para cada modo de fallo, las causas más probables que lo producen. Si en el ejemplo de la lata de cerveza consideramos el primer modo de fallo, la anilla se rompe antes de conseguir abrir la lata, podremos identificar diferentes causas:

- El metal de algunas anillas es demasiado débil y se parte
- El trozo de chapa que debe desprenderse no está bien perfilado y resiste más que la anilla
- No cabe el dedo en el agujero de la anilla, lo que obliga a tirar en un ángulo poco adecuado
- Para cada fallo habrá diferentes causas que tendrán que ser estudiadas por separado.

PASO 5: Evaluar la OCURRENCIA de cada fallo por efecto de cada causa concreta.

Para cada una de las causas identificadas en el paso anterior habrá de valorar las probabilidades que tienen de aparecer. Es decir, en qué medida es frecuente que aparezca el fallo como consecuencia de esta causa concreta.

Se trata, por lo tanto, de asignar un índice de OCURRENCIA (O), comprendido entre valores 1 y 10. Al igual que para el índice de Severidad, es importante tener definidos unos criterios previos de valoración. Podría, por ejemplo, aplicarse la siguiente escala:

Tabla 2. Índices de ocurrencias

Remota	Fallo improbable	1	< 1 por millón
Baja	Muy pocos fallos	2	1 por 20000
		3	1 por 4000
Moderada	Fallos ocasionales	4	1 en 1000
		5	1 en 400
		6	1 en 80
Alta	Fallos frecuentes	7	1 en 40
		8	1 en 20
Muy alta	Fallo casi inevitable	9	1 en 8
		10	1 en 2

Es importante tener en cuenta que se asigna un índice de severidad por modo de fallo, pero varios índices de ocurrencia, uno por cada posible causa identificada.

PASO 6: Especificar los controles actuales para cada causa de fallo. Evaluar DETECCIÓN.

El siguiente paso consistirá en especificar los controles utilizados en la actualidad para detectar la existencia de cada posible causa y, una de dos, evitar que el producto alcance al cliente o que el cliente provoque la aparición del fallo.

En el ejemplo de la lata de cerveza, se especificarán los controles realizados para detectar las latas cuya anilla sea demasiado débil (primera causa), para detectar que el tapón esté mal perfilado (segunda causa), o para advertir al cliente el ángulo en que debe tirar de la anilla (evitando así que las personas con dedos grandes lo hagan mal y rompan la anilla –tercera causa-).

La efectividad de los controles utilizados para cada causa debe ser valorada mediante un índice de DETECCIÓN (D) entre 1 y 10. Una posible escala de valoraciones es la siguiente:

Tabla 3: Índices de detección

Muy alta	Los controles actuales detectarán prácticamente todos los fallos de este tipo.	1
		2
Alta	Los controles actuales tienen una probabilidad elevada de detectar los fallos.	3
		4
Moderado	Los controles actuales pueden detectar algunos de los fallos	5
		6
Bajo	Los controles actuales tiene pocas posibilidades de detectar los fallos.	7
		8
Muy bajo	Los controles actuales muy probablemente no detectarán el fallo.	9
Certeza	Los controles actuales son incapaces de detectar el fallo. No existen controles en este sentido	10

Fuente: Oliverio Garcia Palencia

El índice de Detección, al igual que el índice de Ocurrencia, va asociado a cada causa. Por lo tanto, dentro de cada fallo tendremos que determinar varios índices de Detección (uno para cada causa)

PASO 7: Asignar prioridades. Calcular el RPN.

Una vez determinados los índices de Severidad, Ocurrencia y Detección, podemos establecer una clasificación de causas posibles del fallo, ordenándolas según su importancia. Para ello se calcula, para cada causa, el ÍNDICE DE RIESGO (RPN, Risk Priority Number) multiplicando los tres índices calculados. ($RPN = S \times O \times D$) Tiene sentido pensar que la causa más problemática será aquella que resulta más difícil de detectar, que ocurre más frecuentemente, y que produce un fallo más severo. Luego, para optimizar el empleo de recursos, la empresa debe esforzarse en eliminar aquellas causas con mayor RPN.

Es frecuente fijar un nivel máximo de RPN y tomar medidas sobre todas aquellas causas potenciales de fallos que tengan un RPN superior.

PASO 8: Recomendar acciones para resolver el problema y asignar responsabilidades. El siguiente paso consistirá en recomendar acciones correctoras para evitar cada posible causa y asignar responsables (personas o departamentos) que se encargarán de poner en marcha estas acciones.

El mayor esfuerzo debe ponerse en las causas que presenten mayores RPNs.

Paso 9: Anotar las acciones puestas en marcha y recalcular el RPN para ver los efectos.

Transcurrido un tiempo, deben anotarse las acciones que finalmente se han puesto en marcha y recalcular de nuevo los índices de severidad, ocurrencia y detección. Al igual que antes, el índice de severidad será el mismo para cada causa, puesto que está asociado al fallo que todas ellas producen.

Las fallas de cada función identificadas en el análisis funcional son iniciadas en el FMEA, con el propósito de analizar cada componente del subsistema contra la función identificada para determinar si la falla del componente podría resultar en la falla del sistema para el desempeño de la función. Para desarrollar el FMEA es simplemente un proceso de preguntarse y documentar las siguientes preguntas³:

- ¿Que pasa si falla?
- ¿Cómo el componente puede fallar?
- ¿Que causa que falle?
- ¿Que tan frecuente falla?
- ¿Que pasa cuando falla?

³AMENDOLA, Luis A. Gestión de proyectos de manufactura. Upv. Valencia. 2002, P. 66 – 69.

Con la complementación del documento FMEA el equipo de RCM tiene disponible la siguiente pregunta, ¿qué podríamos nosotros realizar para prevenir y mitigar o eliminar la falla?

Dado que Modo de falla según Luis A. Amendola el “*paso de identificación de las causas con mayor probabilidad de fallo para perder la función del proceso*”⁴, es decir, es se considera a la característica de pérdida de condición y funcionalidad de un equipo, componente o proceso, por lo que se puede afirmar que no todos los modos de falla de los componentes resultan en un efecto significativo, por lo cual el resultado final del FMEA debe focalizar el modo de falla que determine mayor significación o factor de criticidad.

Los mecanismos de falla o causa de la falla son una descripción de la secuencia de eventos que apuntan hacia el modo de falla ocurrido. Con los mecanismos de falla se describe suficientemente el modo de falla y normalmente es la causa raíz de los problemas.

El FMEA se desarrolló en la industria aeroespacial y fue modificado para uso industrial, se utiliza para analizar el costo y clasificar los problemas en orden de importancia económica.

El FMEA utiliza la regla 80-20 (Análisis de Pareto), en el cual el 80% de los costos de las fallas son causados por el 20% de las fallas totales.

Por ello, el enfoque de la solución de una falla reporta “Pocas fallas Críticas”, cuando el 80% de los costos de las fallas son el 20% de las fallas.

Es extremadamente disciplinado, con un alto nivel de atención a los detalles y “Muchas fallas no críticas”, cuando el 20% de los costos de las fallas son el 80% de las fallas.

Los pasos mediante los cuales el FMEA determina las fallas son⁵:

Paso 1. Trabajo preliminar: para el cual es necesaria la definición de la falla, de los diagramas de flujo del proceso y realizar el análisis de brechas.

Paso 2. Recolección de datos: básicamente sobre costos de ordenes u horas de trabajo, MTBF (tiempo promedio entre fallas), tiempo improductivo de la unidad, incidentes ambientales o de seguridad industrial, etc., que puede implicar entrevistas al personal.

⁴Ibid., Pág. 80-84

⁵ MURILLO, William M. Gerencia de mantenimiento. Cap. 5, Soluciones y manejo de confiabilidad. Cali. 2003.

Paso 3. Resumen de datos y clasificación: Se determinan las “pocas fallas críticas” (regla 80-20) y se verifican los resultados, para luego emitir un informe y un comunicado de los mismos.

Paso 4. Determinación de las “Pocas Fallas críticas”: Se clasifican los eventos totalizados en orden descendente, por costo y se multiplica la pérdida total por 80% (0.8). Esta es la pérdida de “pocas fallas críticas”. Así mismo, se calculan las pérdidas acumuladas por ítem, hasta que la suma sea aproximadamente igual al costo de las “pocas fallas críticas”. Esto puede hacerse en forma de cuadro o gráfica.

Paso 5. Emitir un informe: Éste debe incluir la explicación de la técnica de análisis, la definición de la falla utilizada en el análisis, la hoja de cálculo o resultados gráficos que identifican las “pocas fallas críticas.”, y las recomendaciones de las fallas a las cuales se le debe hacer seguimiento con el proceso.

2.6 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ DE LAS FALLAS (RCFA)

El RCFA es un riguroso método de solución de problemas, para cualquier tipo de falla, que utiliza la lógica sistemática y un árbol de causas raíz (fallas). Usando la deducción y la verificación de los hechos que conduce a las causas originales. Es una técnica sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición, para poder mitigarlas o eliminarlas.

El RCFA es una herramienta de la ingeniería de confiabilidad utilizada para determinar hasta tres niveles de causas raíz para cualquier evento específico de falla. La metodología para seguir esta herramienta son:

- Definición del problema
- Efectuar análisis del problema
- Identificar soluciones efectivas
- Implementar las soluciones

Es una técnica de análisis que permite aprender de las fallas y eliminar las causas, en lugar de corregir los síntomas.⁶

Metodología del RCFA

Para aplicar un RCFA se debe tener una definición clara del sistema, para comprender la interrelación existente entre los diversos niveles de un proceso, o que nos permite a la hora de realizar un estudio, considerar todos los factores,

⁶ PROCESS-RELIABILITY-CONCEPTS-SAE 2000. Houston. 2000.

aspectos y condiciones que están presentes en un entorno, ya que cualquiera de ellos puede generar una falla.

La metodología para implementar un sistema RCFA esta definida por un procedimiento de trabajo de seis pasos. Este proceso inicia preparando la investigación a realizar y termina con un reporte de los hallazgos:

Paso 1: Identificar los eventos más significativos

En este paso se recolecta la información, se definen las fallas y se calculan las pérdidas debido a las fallas ocurridas. El objetivo es determinar cuales son los eventos y las fallas más importantes. Esta información se utiliza para analizar los costos de las fallas en una instalación y clasificar los problemas encontrados en orden de importancia económica.

Lo primero que se debe hacer es identificar los problemas específicos que dan mejor retorno a la inversión. Hay dos tipos de problema básicos: esporádicos y crónicos. Los problemas o eventos esporádicos son aquellos que causan una cantidad considerable de caos cuando aparecen, tienen ciertas características que son importantes y por la naturaleza del problema capturan la atención de todos; individualmente son los más costosos.

La herramienta apropiada es el análisis de pareto, que afirma que el 80% de los costos de las fallas son causados por el 20% de las fallas totales. Estas se designan como “las pocas fallas críticas” y son identificadas para los análisis de RCFA.

Paso 2: Preservar las evidencias de las fallas

Es la parte en la que se comienza a analizar un problema específico. La recolección de datos es una parte integral del Análisis Causa Raíz. Sin la información de la falla, es virtualmente imposible descubrir las causas raíz.

La metodología de la 5P's se ha desarrollado con un medio de ayuda al analista para recolectar los diferentes tipos de datos. Las 5 P's es una sigla para Partes, Posición, Personas, Papel y Paradigmas.

- Partes: Equipo o componente que fallo. Rodamientos, tuberías, sellos, instrumentos, cables, motores, bombas, herramientas, etc.
- Posiciones: Ubicación físicas del equipo o componente en falla. Posición física de las máquinas, de los equipos, de los instrumentos, nivel de presión, personal en la hora de la ocurrencia, información ambiental, etc.
- Personal: Entrevistas al personal involucrado en la falla. Entrevistas al personal de mantenimiento, operaciones, administración, manejo, calidad, etc.
- Papel: Todos los reportes escritos relacionados con la falla. Reportes de mantenimiento, políticas, planos, cuarto de control, procedimientos,

especificaciones, entrenamientos, documentación del fabricante, históricos, etc.

- Paradigmas: Frases comunes como que el personal de operaciones usa para evitar investigaciones o desarrollar alguna actividad de mejora. “No tenemos tiempo para una RCFA”, “Hemos tratado de resolverlo desde hace muchos años”, “Es un equipo viejo y por supuesto falla”, “Siempre ha funcionado así”, “Esto es imposible de resolver “, etc.

Pasó 3: Ordenar el Análisis

Es la organización del equipo de trabajo y el procedimiento. La forma convencional de formar un equipo de análisis es mediante la asignación de un grupo de personas, que deben ser expertos y tener conocimientos relacionados directamente con los problemas a analizar. El RCFA debe ser dirigido por un facilitador, quien tenga entrenamiento específico en la metodología rifa. El resto del equipo lo conforma un grupo multifuncional que varía entre un problema y otro.

El equipo RCFA, por lo regular debe incluir:

- El facilitador que dirige el proceso
- Un operador familiarizado con el proceso operativo
- Un técnico de mantenimiento (en equipos mecánicos, eléctricos o de instrumentación)
- Un supervisor de primera línea
- Un ingeniero (mecánico, eléctrico o de otra especialidad).

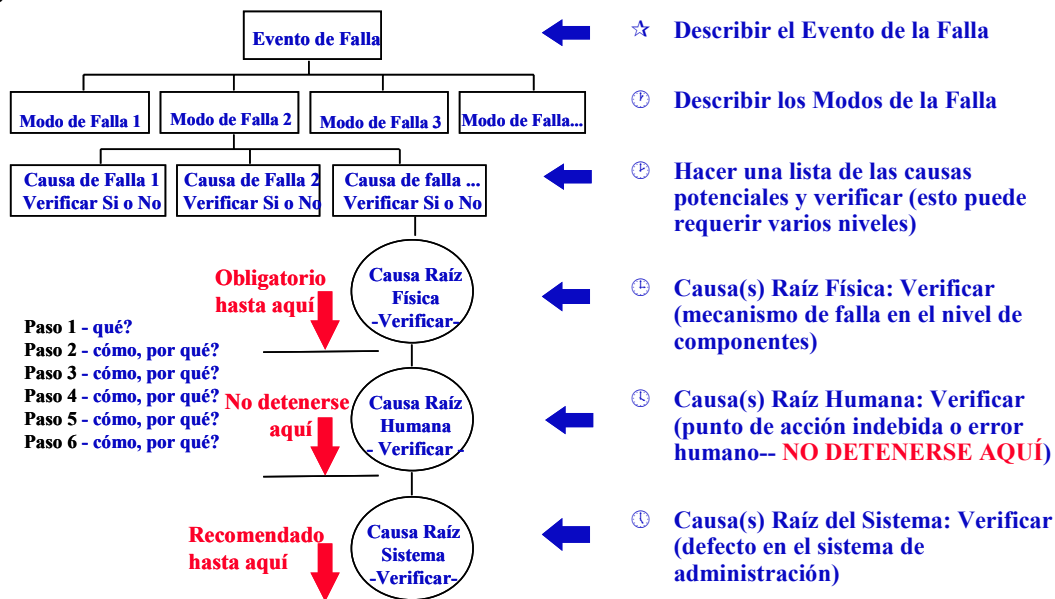
El facilitador NO debe estar familiarizado con el evento que se está analizando. Lo único en lo que el analista principal debe ser un experto es en facilitar el análisis. Además debe ser un individuo TENAZ. Los facilitador exitosos son siempre aquellos que facilitan el RCFA, sin ser dominantes y sin permitir para el proceso.

En ocasiones el equipo debe incluir especialitas tales como inspectores, especialistas de proceso, especialistas de equipo rotativos o proveedores. A menudo es necesario involucrar a los altos niveles y medios de la administración. Los expertos vendedores y contratistas son generalmente irremplazables para generar las hipótesis. Por los menos debe haber una persona que ignore los eventos de fallas y sirva como crítico constructivo.

Paso 4: Construir el Árbol Lógico de Fallas

El análisis debe continuar con la construcción estructurada del árbol lógico de fallas con niveles de causa y efecto. El árbol lógico trata estrictamente con datos reales y utiliza la lógica deductiva para trabajar sistemáticamente a través del problema, para llegar a la causa raíz real. Los pasos para construir un “árbol lógico de fallas” en la aplicación de un proceso RCFA, que se muestran en la Figura 6, son:

Figura 6. Estructura de RCFA



Fuente: William Murillo

- Describir el evento de falla
- Describir los modos de falla
- Hacer una lista de las causas potenciales de falla y verificarlas
- Determinar y verificar las causas raíz físicas
- Determinar y verificar las causas raíz humanas
- Determinar y verificar las causas raíz del sistema (latentes)

Los dos primeros niveles del árbol lógico consideran todos los “hechos conocidos” del problema a analizar. Estos dos niveles conforman la Caja Superior y representan la definición de la falla. El primer nivel es la declaración del evento, la razón por la que se está analizando el problema. El segundo nivel representa los modos del problema. Se pueden analizar los modos de falla como las causas aparentes del evento. En el tercer nivel se procede a hipotetizar “como” pudo haber ocurrido. La clave es ser amplio e incluir todo lo posible en la hipótesis. La idea es agrupar las razones (o causas) en categorías generales. En esencia, el árbol lógico debe ir de lo general a lo específico, aplicar la lógica deductiva.

El siguiente paso el más crítico, es la verificación de la hipótesis. Se debe verificar cada hipótesis para ver cual es la verdadera y cuales no lo son. La verificación de la hipótesis da la confianza necesaria para llegar a las causas raíz correctas. Este proceso de lógica deductiva y verificación se reitera una y otra vez hasta que todas las raíces se determinan acertadamente.

Paso 5: Comunicar los resultados y las recomendaciones

El análisis de fallas y la verificación de la causas raíces, determinan las causa raíz físicas, humanas y del sistema, para cualquier tipo de falla. Comunicar los

resultados es el paso esencial para documentar los hallazgos en las investigaciones de RCFA y las recomendaciones asociadas. Estos hallazgos se deben analizar con el personal apropiado y pueden requerir de reuniones con la alta gerencia.

Para que el analista tenga éxito comunicando sus resultados y haciendo recomendaciones a la administración sobre causas identificadas, primero debe darse cuenta de la posición de la administración con respecto al resultado del análisis. La administración debe ser conciente de la responsabilidad financiera de la empresa.

Un informe formal por lo general ayuda a obtener el compromiso de la gerencia para resolver las fallas concentrándose en las causas raíz determinadas en la investigación. El costo de implementar los resultados se debe comparar con los costos de las fallas. Se debe tener en cuenta que las causas raíz identificadas no son negociables. Sin embargo, las recomendaciones pueden ser diseñadas para cumplir los criterios de aceptación establecidos.

Se debe tener en cuenta que una de las metas principales de la Confiabilidad operacional es incorporar RCFA como una parte de la Cultura Organizacional. Esto facilitaría el análisis y la deducción lógica del por qué de los problemas. Para lograr el apoyo masivo de la organización en el proceso, se requiere que participe tanta gente como sea posible y que sean reconocidas ampliamente sus contribuciones.

Paso 6: Hacer seguimiento a los resultados

Parte de la responsabilidad que asume el facilitador del sistema es analizar la implantación de las recomendaciones y realizar el seguimiento de su ejecución. Los resultados pueden ser comparados y medidos mediante la reducción en los costos de mantenimiento, el mejoramiento en las tasas de producción, la reducción de las tasas de falla, etc.

El RCFA sería una actividad sin valor agregado si no se actúa sobre las recomendaciones y las soluciones no son implementadas en el tiempo establecido. Después de todo, es demasiado frustrante dar recomendaciones para la solución de problemas, asignar responsabilidades para la implementación, y establecer un plan de actividades para su realización, y aún así no ver el fruto de los esfuerzos.

Por lo tanto es primordial que se tome el control de las operaciones en vez de permitir que la operaciones tomen el control de la organización. Para poder obtener los recursos necesarios para dedicar el trabajo futuro, sea trabajo de mejora, corrección, o rediseño, se debe analizar los problemas hasta las causas raíz y actuar de acuerdo con sus resultados.

2.7 CONFORMACIÓN DEL EQUIPO RCFA

El RCFA es dirigido por un facilitador, quien ha recibido entrenamiento específico en la metodología RCFA. El resto del equipo lo conforma un Grupo multifuncional que varía entre un problema y otro. El equipo RCFA, por lo regular, podrá incluir:

- Un operador familiarizado con el proceso operativo
- Un técnico (sí se trata de equipos mecánicos, eléctricos, o de instrumentación)
- Un supervisor de primera línea
- Un ingeniero (químico, eléctrico, mecánico, o de otra especialidad)
- En ocasiones incluye especialistas tales como metalúrgicos, inspectores, especialistas de proceso, especialista de equipos rotativos, o proveedores
- Una persona que desconoce los eventos de fallas y sirve como crítico constructivo al análisis.

La conformación del equipo varía según la falla que se investiga.

2.8 DEFINICIÓN DE TIPOS DE FALLAS

En una instalación en operación, por lo regular se dedica más tiempo a resolver fallas esporádicas que fallas crónicas. Esto se debe a que, por lo regular, se coloca la falla en un rango aceptable de operación.

Existe un sentido de reconocimiento en el trabajo, hay retroalimentación inmediata después que se resuelve la falla.

- **Una Falla Esporádica:** es una falla repentina, dramática e inesperada que algunas veces lleva todo el proceso a detenerse y, con frecuencia, es altamente visible dentro de la unidad de negocios o de la compañía, por lo general tiene un costo muy alto.

Se adelanta una investigación formal o informal de la causa.

Esto incluye elementos tales como fugas importantes en el proceso, explosiones, incendios, incidentes ambientales graves, muertes o lesiones graves y paradas de emergencia en las instalaciones.

- **Una Falla Crónica:** es la falla típica repetitiva que puede afectar las operaciones en el corto plazo o las actividades de mantenimiento, pero, no resulta dramática, y no es necesariamente difícil de arreglar (pero puede ser difícil de encontrar la causa raíz).

Por ejemplo, las fallas que se presentan en los rodamientos, los sellos, las correas, los engranajes, los apagados del sistema de control, etc. En el nivel de “operación aceptable”, se cumple la operación a pesar de estas fallas.

Tiene un impacto relativamente bajo, cuando se totalizan en el transcurso de un año, llegan a un alto porcentaje del presupuesto general de mantenimiento y a la pérdida de ingresos debido a la baja utilización.

Cuando se han resuelto las fallas crónicas (la causa raíz es identificada y eliminada), el nivel de "operación aceptable" comienza a elevarse, se reduce el tiempo improductivo y los costos de reparación. La producción total de la instalación aumenta y puede mejorarse considerablemente la rentabilidad general.

2.9 VISION GENERAL DEL ANÁLISIS DE WEIBULL

Prevé un simple y poderoso gráfico, medición de vida, arranques, paradas, la operación, ciclos de misión vs. % acumulativo de fallas. Los parámetros β (Beta, o pendiente de la curva) proveen una filosofía de falla y η (ETA, característica de vida) tiempo de falla Weibull, cuyo análisis está relacionado con el MTBF. En principio, se puede utilizar cualquier función de distribución para crear un modelo de duración de equipos.⁷

En la práctica, las funciones de distribución que tienen funciones de riesgo monótonicas parecen más realistas y, dentro de esta clase, existen unas pocas que son consideradas como aquellas que proporcionan los modelos más razonables de confiabilidad de dispositivos.

Esta es un modelo de fiabilidad de dispositivos tan popular porque es sencillo algebraicamente y por tanto tratable y se considera representativo del intervalo de vida funcional del ciclo de vida del dispositivo.

Algunas personas creen que las empresas gestionan sus componentes o dispositivos envejeciéndolos a lo largo del ciclo de vida inicial antes de ponerlos en servicio.

Se espera que los dispositivos estén obsoletos antes de llegar al período de desgaste, de forma que un modelo apropiado de confiabilidad de dispositivos es uno que tiene un riesgo constante. Este punto de vista es controvertido. No obstante, se utiliza mucho el modelo exponencial.

➤ **Distribución de fallas.** La pendiente de gráfica Weibull y su β (Beta) indica para la distribución Weibull, el parámetro de forma que determina la función de riesgo.

Crece cuando $\beta > 1$, decrece cuando $\beta < 1$, y es constante cuando $\beta = 1$.

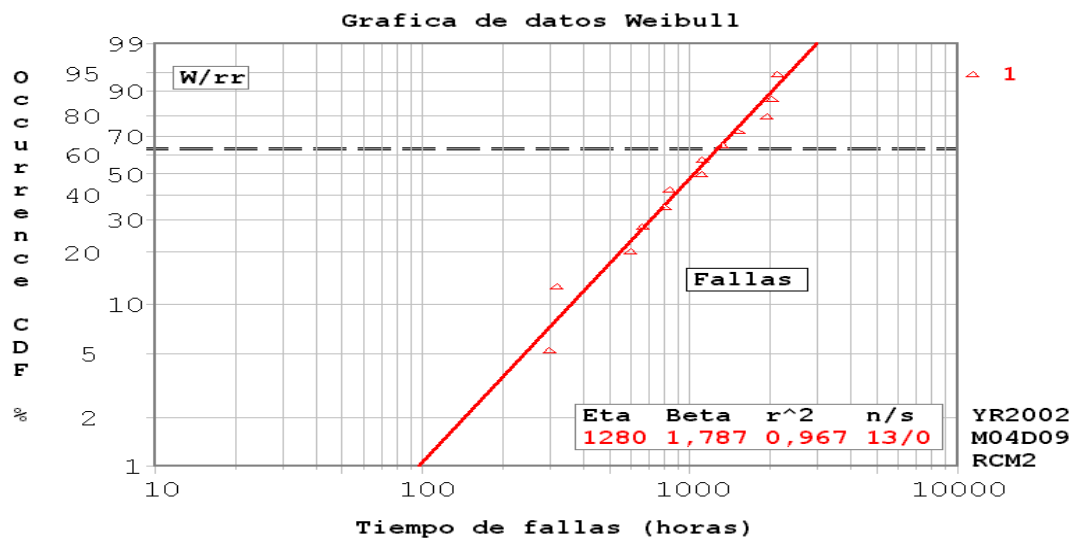
⁷ NACHLAS, Joel. Fiabilidad. Isdefe, Madrid. 1995. P. 39-45.

Obsérvese que el caso en que $\beta = 1$, no sólo da un riesgo constante, sino que implica también que la función de distribución se reduce a la distribución exponencial.

La interpretación de los factores β para el caso de la aplicación de ingeniería de confiabilidad es el siguiente:

- $\beta < 1.0$ indica mortalidad infantil
- $\beta = 1.0$ significa falla aleatoria
- $\beta > 1.0$ indica falla por desgaste.

Figura 7. Datos Weibull.



Fuente: Process-Reliability-Concepts-Sae2000.

La característica η (Eta) es definida como la edad a la cual el 63.2% de las unidades podrían fallar, entonces se determina como $\beta 63$, significando esto el limite donde se empieza a detectar la pérdida de las condiciones normales de funcionamiento de las maquinas.

En la figura 7, se muestra una distribución Weibull con $\beta=1.787$, falla por desgaste, siendo un ejemplo de la medición de parámetros.

- **Pronóstico y predicción de fallas.** Cuando las fallas ocurren en servicio es una predicción del número de fallas que podrían ocurrir en un próximo periodo de tiempo es deseable calcular.

Algunos problemas comunes en gráficos erróneos Weibull son el resultado de información mal recogida:

- Mezcla de modos de falla
- Problemas con el origen de la falla

- Datos manuales donde las edades de las partes son desconocidas
- Construcción de curvas Weibull donde no existan fallas.

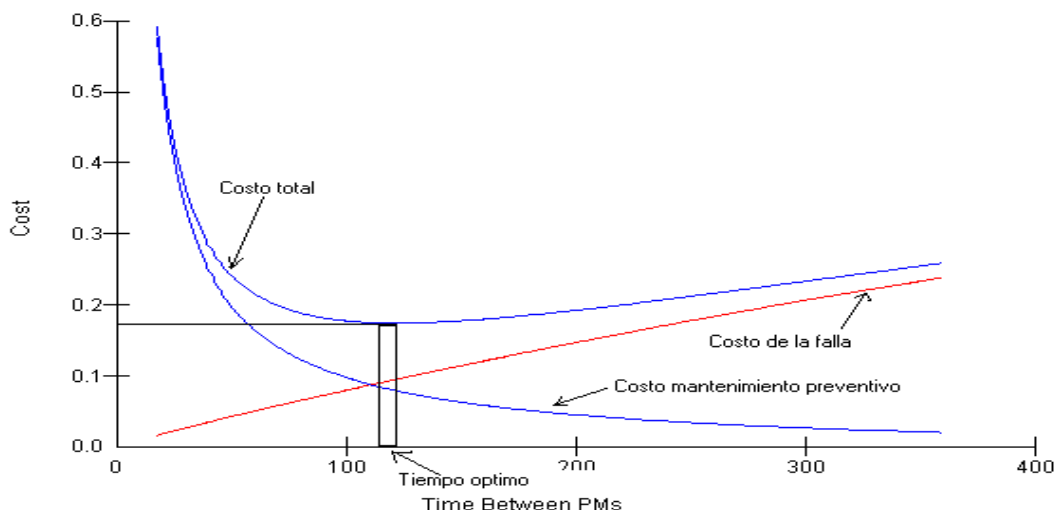
La distribución Weibull provee con mayor frecuencia los mejores cálculos de la vida de los componentes, esto es debido al rango amplio de los parámetros y la familia de distribuciones que cubre, incluyendo la distribución exponencial, normal y poisson.

Log-normal no esta dentro de la familia de Weibull y es él más significativo competidor para comparar sus cálculos.⁸ El análisis por logaritmo normal es escogido para deterioro por sistema de aceleración, materiales no lineales y ratas de crecimiento en grietas.

➤ **Planeación del mantenimiento.** La distribución Weibull es usado para la planeación del mantenimiento, particularmente en el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. β (Beta) nos dice si o no las inspecciones son programadas o los overhauls son necesarios.⁹

- $\beta < 1$ los overhauls e inspección programados son de costo económico no efectivo.
- $\beta > 1$ periodo de overhauls o programa de inspección pueden ser apreciados directamente desde el gráfico, calculando la probabilidad aceptable de las fallas.

Figura 8. Tiempo óptimo de mantenimiento.



⁸ Ibid. P 62.

⁹ BLANCHARD, Benjamín S. Ingeniería Logística. Isdefe, Madrid, 1995. P 101-110.

Para modos de falla por desgaste, si el costo de una falla sin planear es mayor que el costo de un reemplazo planeado, el intervalo del tiempo óptimo del mantenimiento o reemplazo es calculado a costo mínimo.

La distribución Weibull puede optimizar los intervalos y los costos del mantenimiento.

Usando el predictor de fallas Weibull, cuantitativamente se puede:

- Programar o no programar el mantenimiento
- Hacer inspecciones no destructivas vs. Reemplazo de partes
- Estimar mantenimiento correctivo vs. Nada de mantenimiento
- Calcular diferentes tiempos entre overhauls
- Calcular Intervalos óptimos del reemplazo.

Los planes de mantenimiento cíclicos son cambiados por las ratas de falla. Los ciclos son también afectados por las interacciones entre los ciclos de vidas y los modos de falla de los sistemas, la disminución del parámetro de comportamiento β , periodos de inspección y el reemplazo de partes por el cumplimiento de su ciclo de vida.

2.9.1 Método Weibayes. La distribución Weibull no sirve cuando no han ocurrido fallas. El método llamado Weibayes puede servir para estimar nuevos valores, si el número de fallas es extremadamente pequeño y se conoce el parámetro β y η . Weibayes es más preciso que el Weibull cuando se conoce el parámetro β .

2.9.2 Datos Weibull. Los datos precisos para una distribución Weibull son las “edades” de las partes, componentes o sistemas que fallan, estos datos pueden ser:

- Tiempos de operación de equipos (horas, días, kilómetros, etc)
 - Arranques y paradas
 - Lanzamientos de aviones o equipos militares
 - Tiempos de almacenamiento
 - Ciclos de fatiga
 - Ciclos de alto stresses
 - Altas temperaturas y muchos otros parámetros
- η (ETA) & β (BETA); Los parámetros β & η de la distribución Weibull son los valores usados para el análisis de vida de los componentes.

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} \quad \text{Ecuación (1)}$$

La función de distribución Weibull esta ilustrada en la ecuación (1) donde:

F(t) = Función de distribución acumulativa

t	=	Tiempo de falla
η	=	Característica de vida, parámetro escala
β	=	parámetro de forma o pendiente.
e	=	2.718281828, base del logaritmo natural.

El parámetro β muestra la clase de falla como son mortalidad infantil, aleatoria, o desgaste, tan bien es llamado el parámetro de forma porque determina la familia o el tipo de distribución.

El parámetro η es el parámetro de vida y es igual al tiempo promedio para la falla "Mean Time To Failure" (MTTF) cuando β es igual a 1. La relación entre η y el MTTF es la función gamma de β .

$$MTTF = \eta \Gamma (1 + 1 / \beta) \quad \text{Ecuación (2).}$$

- Cuando $\beta = 1.0$, $MTTF = \eta$, es una distribución exponencial
- Cuando $\beta > 1.0$, $MTTF$ es menor que η
- Cuando $\beta < 1.0$, $MTTF$ es mayor que η
- Cuando $\beta = 0.5$, $MTTF = 2\eta$.

El parámetro η (ETA) es definido o se calcula de la forma con la siguiente ecuación:

$$F(t = \eta) = 1 - e^{-\left(\frac{\eta}{\eta}\right)^\beta} = 1 - e^{-1} = 1 - 1/e = 0.632 \quad \text{Ecuación (3)}$$

- **Pruebas de inspección o suspensión.** Son un modo diferente de falla, porque son una interrupción que no afectan las condiciones de la maquina, sin embargo, son considerados como falla porque hay una interrupción en el tiempo de operación de la máquina, proceso, componente o dispositivo. Estos datos no pueden ser ignorados, pero, los tiempos de interrupción de las unidades pueden o no ser incluidos para el cálculo de la confiabilidad.

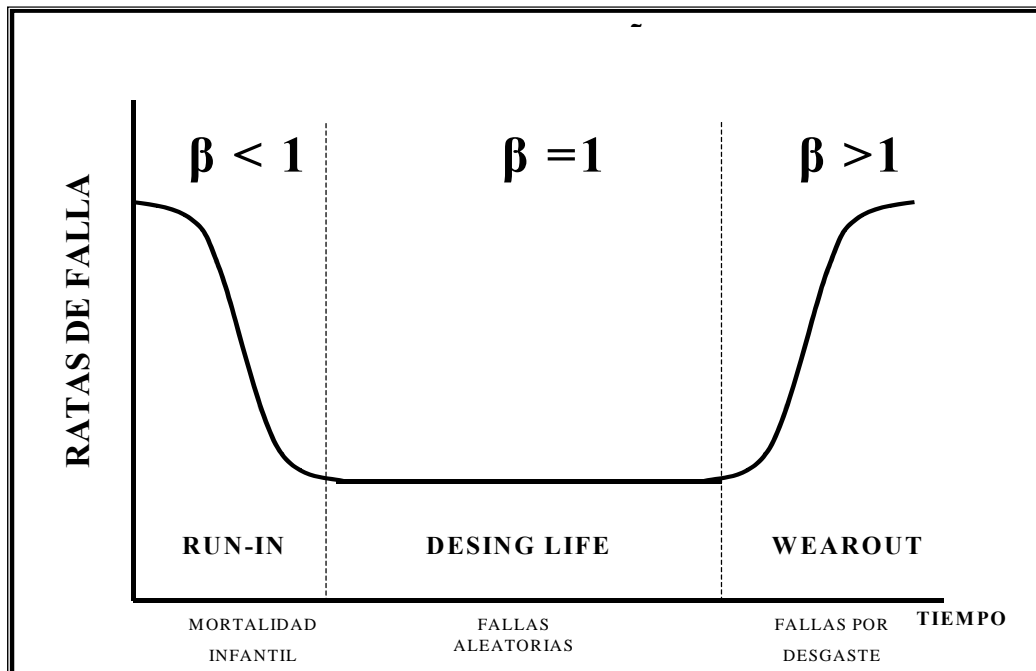
El mayor efecto de las interrupciones o inspecciones es el incremento de η (Eta) y no afecta a β (Beta).

- **Interpretación del Gráfico Weibull.** La curva de la bañera puede ayudar a entender la relación entre β y los mecanismos de falla a través de la vida de un componente.

El análisis de Weibull provee una pista acerca de los mecanismos de falla, con las diferentes pendientes o parámetros de forma, implicando en las diferentes formas

de falla, en la figura 9, se muestra la curva de la bañera y la relación existente con el comportamiento de las fallas y los parámetros de confiabilidad.

Figura 9. Curva de la Bañera



Fuente: Process-Reliability-Concepts-

2.9.3 Interpretación de los factores y parámetros de forma.

- **β < 1. Mortalidad infantil.** Los equipos electrónicos y mecánicos pueden iniciar con una alta tasa de fallas en el arranque de proyectos, plantas o nuevos diseños, estas fallas se pueden catalogar como modos de falla de prearranque o de primer tiempo, y están caracterizadas por:
 - Inadecuado burn-in o fuerzas y presiones ocultas
 - Problemas de Producción
 - Problemas de Operación y Mantenimiento
 - Problemas de Control de Calidad
 - Problemas de Overhalls
 - Fallas en Componentes Eléctricos.

- **β = 1 Falla aleatoria.** Falla independiente del tiempo o aleatoria y es igual a una distribución exponencial, donde los modos de fallas no están ligados a comportamientos de condición de las maquinas y presentan una relación estocástica. Estos tipos de falla se pueden presentar por:

- Errores de mantenimiento / errores humanos
 - Fallas debido a naturaleza, daños u objetos desconocidos, rayos
 - Mezcla de datos desde 3 o más modos de falla
 - Intervalos entre Fallas
 - Overhauls no apropiados.
- **$1 < \beta < 4$ Falla por deterioro temprano.** Si esta falla ocurre dentro del diseño del ciclo vida de la maquina es una desagradable sorpresa. Estas son algunas fallas de modo mecánicos que obedecen a esta clase:
- Bajo ciclo de fatiga
 - Muchas fallas de balineras
 - Corrosión
 - Erosión
 - Overhauls o partes reemplazadas con un bajo β son de costo no efectivo.
- **$\beta > 4.0$ Deterioro rápido por edad de uso.** Estos típicos modos de falla con edades muy viejas de sus componentes y rápidas salidas de funcionamiento por uso, también incluyen un deterioro de las condiciones de funcionamiento por un encontrarse en un estado no adecuado y prolongado de operación, pueden ser:
- Corrosión por esfuerzo
 - Propiedades de los materiales
 - Materiales como cerámicas
 - Algunas formas de erosión

2.9.4 Lineamientos en Weibull que pueden ser cubiertos. Es necesario tener en cuenta que una máquina puede presentar varias fallas concatenadas, lo cual quiere decir que la segunda nunca podría ocurrir sin la primera, por tanto, no puede ser eliminada la segunda sin haber corregido la causa de la primera. A esto lo definen varios autores como la causa original o madre a un modo de falla cover (falla dominante de un sistema en la situación de operación).

Los modos de falla siguientes son desconocidas, por tal razón, garantizan la ocurrencia de eventos no programados que no pueden ser detectados por estar inmersos dentro de la primera falla. A esta falla se les suele llamar “Up down”.

2.9.5 Pronósticos de fallas o análisis de riesgos.

- **Situación.** El significado de falla tiene su incidencia en el servicio de operación del proceso, por ello envuelve perdidas financieras y riesgos en la seguridad de

la operación, esto motiva un manejo responsable, lo cual demanda de un pronóstico del número de fallas esperado que puedan ocurrir en el futuro en su operación, para este control se necesita hacer las preguntas de rigor.

¿Cuántas fallas se podrían presentar en el próximo mes, en los próximos seis meses y en el próximo año? El pronóstico de las fallas prioriza y localiza las acciones correctivas para evitar estas fallas. Este análisis del riesgo y la predicción de la magnitud del problema aclaran la visión del futuro.

“Riesgo” es empleado como un sinónimo de “pronóstico de falla”, la estadística llama a esto el “Análisis de la Predicción”.

- **Definición.** Un análisis de riesgo o un pronóstico de falla facilitan la predicción del número de incidentes que pueden ocurrir en un periodo específico de tiempo.

- **Técnicas de pronóstico.** La distribución de fallas en el tiempo es determinada desde la falla y desde los datos en suspensión, es decir, los reportes de parada por verificación, chequeo de estándares de operación ó paradas programadas. Pero, además de esto, el pronóstico requiere una entrada adicional de información cronológica sobre datos muy específicos del equipo como son:
 - La edad del componente en servicio
 - Uso de tasas por unidad mensual, anual o diaria
 - Introducción de ratas de nuevas unidades (modo de falla)
 - Partes dañadas son reemplazadas con partes tiempo cero.

Con esta información se puede determinar el pronóstico de una falla.

Las técnicas usadas para pronóstico de fallas varían desde el cálculo simple a un complicado análisis de “SIMULACIÓN MONTE CARLO”, que es un tipo de análisis de comprobación de parámetros de las unidades, que requiere de un análisis continuo y riguroso en un tiempo no menor a 18 meses de seguimiento de los datos.¹⁰

- **Pronóstico de fallas esperadas.** El primer paso para el cálculo de número de fallas esperadas en un tiempo T_i , si pertenecen a una población de N ítems y cada ocurrencia tiene T_i horas o ciclos, el número de fallas esperadas de esta población es la probabilidad de falla por un tiempo inicial T_i , sobre el número de unidades N , incluyendo fallas y suspensiones (interrupciones o inspecciones).

¹⁰ Process – Reliability-Concepts – Sae 2000. Houston

El número esperado de fallas es:

$$\text{Fallas Esperadas} = \sum F(t_i) = \sum_{i=1}^N (1 - e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta}) \quad \text{Ecuación (4)}$$

Si la expectativa de la falla es mucho más grande que la observada en el número de fallas, La distribución Weibull puede no aplicar para la población entera.

Este es un problema “batch” o discontinuidad en la curva de tendencia, en otras palabras son puntos que no siguen el comportamiento de los históricos de la maquina, la detección de problemas batch es una razón para el cálculo de expectativa de falla presentes.

- **Análisis y resumen de pronósticos de falla (PF).** La expectativa de las fallas sobre una población de equipos o misiones, sumando fallas más suspensiones:

$$\text{Expectativas de Fallas} = \sum (F(t_i)) \quad \text{Ecuación (5)}$$

El pronóstico de una falla futura es sumando todas las fallas sobre el riesgo (unidades con suspensiones o baches) solamente:

$$\text{Pronóstico de Fallas} = \sum \frac{F(t_i + u) - F(t_i)}{1 - F(t_i)} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Cuando las unidades son reemplazadas la ecuación para el cálculo de la distribución Weibull es:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Ecuación (7)}$$

- **Intervalo óptimo para el mantenimiento vs. Costo.** El costo de unas fallas sin planeación es más grande que el costo de reemplazos planeados. Si el intervalo es muy corto, el costo del reemplazo es muy alto; si este es muy largo, el manejo de la falla no planeada total es muy alto.

La distribución Weibull tiene una estrategia para encontrar el intervalo del costo efectivo para el reemplazo del componente.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Ecuación (8)}$$

El óptimo reemplazo en un intervalo es la edad con el mínimo radio del costo promedio para el MTBF, $C(t)$.

$C(t)$ = Costo por unidad
 U = Costo de un reemplazo no planeado.
 P = Costo de un reemplazo antes de la falla, $P < U$

El costo por unidad de tiempo es la relación del costo promedio para el MTTF. La función puede ser expresada como sigue en la ecuación (9).

$$C(t) = \frac{PxR(t) + Ux[1 - R(t)]}{\int_0^t e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} dx} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Cuando t se reemplaza en un periodo x .

El primer término en el numerador es el costo del reemplazo planeado, multiplicado por una fracción del periodo t , lo cual quiere decir, que el costo no tendrá ningún valor por encima del costo no planeado. Este término tiene un decrecimiento con el tiempo.

El segundo término en el numerador es el costo del reemplazo no planeado multiplicado por la inconfiabilidad durante el periodo de tiempo de estudio, que debe ser igual al multiplicado en el primer término. El término se incrementa a través del tiempo.

El denominador es el MTTF (el área bajo la curva de la confiabilidad en un intervalo de tiempo de 0 a t).

En este sentido, el estudio se basa en el diagnóstico y resultados que se presentan en el desarrollo del modelo de gestión. Para tal fin, todos los cálculos se realizan con la herramienta del SOFTWARE RELIABILITY MAINTENANCE ANALYST, teniendo en cuenta que la clasificación, organización, y estudio de los reportes de las hojas de vida de las unidades son realizadas por los analistas, ahorrando con ello gran cantidad de tiempo para estimar los cálculos requeridos.

3. DESARROLLO DEL MODELO DE GESTIÓN

3.1 EVALUACIÓN PRELIMINAR DE CONDICIONES

Como primer paso se realizó una evaluación preliminar, para indagar el estado de mantenibilidad del equipo que se quiere intervenir y mejorar su condición. De los cuales se desarrollaron formatos, para el seguimiento de las condiciones y características tanto de la empresa como de los equipos objeto del análisis.

Dicho estudio preliminar se basó en el planteamiento de JG FARLO, en el documento para plantas de refinería HC CHEVRON SERVICE HOUSTON - TEXAS, retomando como formatos de evaluación las tablas de condición de máquina, de áreas de trabajo y de desempeño general, (ver Anexo A), los cuales fueron modificados y ajustados a las condiciones y características tanto de la empresa como de la maquinaria objeto de estudio. Estas se constituyeron en el primer aporte novedoso para el programa de mantenimiento por lo cual se aprobaron para implantar inmediatamente.

Se aplicaron los formatos del anexo A (A.1, A.2 y A3), donde representan una serie de preguntas dirigidas a evaluar las condiciones en las que se encuentran los equipos sometidos al estudio, el formato del Anexo A.1 evalúa las condiciones de la máquina, el formato del Anexo A. 2 tiene en cuenta las condiciones del área de trabajo, el formato del Anexo A. 4, tasa el desempeño en general.

Al aplicar los formatos del anexo A y teniendo en cuenta las respuestas afirmativas o negativas se obtuvo la tabla 4.

En la tabla 4 de la evaluación, los equipos se encontraron en el rango 30 – 39, donde la máquina presentaba una condición crítica y bajo desempeño, muy por debajo del aceptable.

Según la tabla de evaluación que se tiene para los equipos reciprocantes, el resultado de la evaluación preliminar muestra que el estado y las condiciones de las unidades son muy críticas:

La acción inmediata fue realizar el estudio y calcular las fallas más representativas en el desempeño de las unidades y su respectivo impacto en el mantenimiento, garantizando toda la infraestructura organizativa que esto demandaría. En los siguientes numerales se podrá apreciar lo anteriormente expuesto.

Tabla 4. Evaluación para las bombas reciprocantes

CUANTIFICACIÓN	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS
40 +	La condición de las bombas y desempeño son muy pobres. La actuación está por debajo de la equivalencia. La acción inmediata se necesita.
30 – 39	La condición de las bombas es pobre y desempeño malo, esta en una condición crítica de operación. Usted necesita dirigir una acción urgentemente.
20 – 29	Usted ha entendido la importancia de la condición de las Bombas y ha realizado alguna acción. Más progreso puede hacerse, mejorar la actuación y desempeño de maquina.
10 – 19	Progreso significativo se ha hecho, o puede ser el énfasis en el mejoramiento de condición de las bombas. Mantenga el trabajo bueno y diríjase el 'sí.
1 < 10	Bien hecho! Usted está en buen camino de perfeccionamiento de la condición y operación. Trabaje hacia el cero de “SÍ” y de las Averías.

Fuente: Arenas / Delgado

3.2 ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Para determinar la importancia de una máquina en el proceso productivo se realizó una evaluación de las consecuencias que implicaría la falla del equipo en servicio (análisis de criticidad).

La matriz de criticidad envuelve aspectos gerenciales y criterios de decisión, contiene elementos englobando:

- Estrategia del negocio
- Misión de la planta
- Costo del mantenimiento
- Pérdidas de producción
- Riesgos involucrados (humano, seguridad, etc.)

Se analiza cada activo dentro del estudio, en siete “Áreas de Impacto”:

- Seguridad y Salud
- Medio Ambiente
- Calidad
- Productividad
- Producción
- Tiempos Operacionales
- Tiempos y Costos de Reparación

Tabla 5. Efectos de las Fallas

EFFECTOS DE LAS FALLAS		
CODIGO	EFFECTO DE LA FALLA	
A	Produccion	Perdida de produccion > 50.000 us (>12 horas)
	Seguridad	Perdidas de vida, partes del cuerpo, incapacidad
	Ambiental	No cumplimiento de requerimiento regulatorios Ambientales
	Mantenimiento	Daño de equipo, reparacion > 10.000 us
B	Produccion	Perdida de produccion entre 10.000 us y 50.000 us (6 y 12 horas)
	Seguridad	Herida menor, primeros auxilios o medico
	Ambiental	Imminente no cumplimiento de requerimiento ambientales
	Mantenimiento	Daño de equipo, reparacion entre 5.000 y 10.000 us
C	Produccion	Perdida de produccion entre 2.500 y 10.000 us (2 y 6 horas)
	Seguridad	Potencial de herida a persona
	Ambiental	Potencial de no cumplimiento de requerimientos regulatorios
	Mantenimiento	Daño de equipo, reparacion entre 1.000 y 5.000 us
D	Produccion	Perdida de produccion < 2.500 US (< 2 horas)
	Seguridad	Herida superficial
	Ambiental	No hay problemas de seguridad ambiental
	Mantenimiento	Daño de equipo, daño colateral otro equipo, reparacion < 1.0000 us
M	Produccion	Ningun Efecto
	Seguridad	Ningun Efecto
	Ambiental	Ningun Efecto
	Mantenimiento	Ningun Efecto

Fuente: Arenas / Delgado

Se establece la matriz de los efectos de las fallas, dependiendo el impacto que genere, se les asigna un código (ver tabla 5), en este caso tenemos A, B, C, D, M.

Tabla 6. Frecuencia de Falla

Probabilidad de falla	Frecuencia de falla
REMOTA	Fallas mayores de 3 años
MUY BAJA	Fallas entre 1 a 3 años
BAJA	Fallas entre 6 meses a 1 año
MODERADA	Fallas entre 3 meses y 6 meses
ALTO	Fallas entre 1 mes y 3 meses
MUY ALTA	Fallas entre 1 semana y 1 mes
EXTREMA	Falla todos los dias

Fuente: Arenas / Delgado

La tabla 6, muestra la clasificación de las frecuencias de fallas, dependiendo de la probabilidad y frecuencia de falla.

La tablas 7, muestra la matriz de la probabilidad de falla, de forma cuantificada dependiendo del efecto de falla, en la tabla 8, se muestran el análisis de criticidad de la planta de inyección de agua, donde los equipos más críticos son las bombas de inyección.

Tabla 7. Probabilidad de falla

Efecto	Probabilidad de falla						
	Extremo	Muy Alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy bajo	Remoto
A	12	11	10	9	8	6	4
B	11	10	9	8	5	5	3
C	10	8	7	6	5	3	2
D	9	6	5	4	3	2	1
M	6	5	4	3	2	1	1

1	Prioridad alta
2	Prioridad Media
3	Prioridad Baja

Fuente: arenas / Delgado

Tabla 8. Criticidad del sistema

EQUIPOS PIA TELLO	PROBABILIDAD DE FALLA	EFECTO	CRITICIDAD
Bomba Aurora A (transferencia agua)	BAJA	M	1
Bomba Aurora B (transferencia agua)	BAJA	M	1
Bomba Aurora C (transferencia agua)	BAJA	M	1
Bomba Aurora D (transferencia agua)	BAJA	M	1
Filtro Auto Shell #1	BAJA	M	1
Filtro Auto Shell #2	BAJA	M	1
Bomba Iny #1 (Waukesha)	ALTO	A	10
Bomba Iny #2 (Waukesha)	ALTO	A	10
Bomba Iny #3 (Waukesha)	ALTO	A	10
Bomba Iny #4 (CAT G398)	ALTO	A	10
Bomba Iny #5 (CAT G398)	ALTO	A	10
Bomba Iny #6 (CAT G398)	ALTO	A	10
Bomba PAF-101A (filtrado)	BAJA	M	1
Bomba PAF-101B (filtrado)	BAJA	M	1
Bomba PAF-101C (filtrado)	BAJA	M	1

Fuente: arenas / Delgado

3.3 CREACIÓN DEL EQUIPO RCM

Con el fin de tener más argumentos de juicio para la disertación, de los análisis de los modos de falla, se plantea conformar un equipo reducido interdisciplinario, para obtener información de forma sistemática al conocimiento y experiencia de cada miembro del grupo, sino además reparte de forma extraordinaria los problemas del mantenimiento y sus soluciones.

El grupo es dirigido por un Facilitador, quien ha recibido entrenamiento específico en la metodología RCFA (Causa Raíz de Fallas), quien se encargara de llevar toda la dirección y puntualiza sobre los aspectos críticos del análisis en cuestión. El resto del equipo lo conforma un grupo multifuncional.

El equipo RCFA, por lo regular, puede incluir:

Un operador familiarizado con el proceso operativo de la inyección de agua (PIA-TELLO), un técnico (sí se trata de equipos mecánicos, eléctricos, o de instrumentación)

Un supervisor del área a tratar o de la disciplina, un ingeniero invitado (químico, eléctrico, mecánico, o de otra especialidad).

La conformación del equipo varía según la falla y el impacto que tenga en la producción y la operación de la batería **TELLO**. El grupo interdisciplinario para la evaluación y análisis de los modos de falla de las bombas de PIA-TELLO es:

- Facilitador del Proceso RCM
- Supervisor de mantenimiento mecánico
- Grupo RAM o grupo de ejecución técnica (técnicos especialistas en diversas Especialidades)
- Ingeniero invitado
- Ingeniero Supervisor de Mantenimiento Basado en Condición. (CBM).

3.4 ANÁLISIS FUNCIONAL DE LA PIA – TELLO

➤ **Nombre del sistema. PLANTA DE INYECCIÓN DE AGUA - TELLO**

- **Función.** Sistema de inyección de agua de formación y agua dulce entre 1400 psi y 2000 psi con un flujo de 400 galones / hora, entre 8 y 10 ppm de aceite. El agua de formación llega de 36 pozos y el agua dulce llega de los pozos Agua No1 y No 2 a una presión de 150 psi y se inyecta a 8 pozos inyectoros. El sistema de inyección de agua cuenta con 6 unidades (A, B, C, D, E, F) con un arreglo motor-bomba de la siguiente manera, con 3 motores CATERPILLAR G398 a una velocidad de 1100 RPM y 3 motores WAUKESHA HGL 24 con velocidad de 1800 RPM, y cuenta cada uno de estos motores con bombas

WHEATLEY GASSO MODELO Q-7600AL que bombean 14.000 BWPD a 2000 psi como máximo. Y se dispone en operación una bomba de stand by y cinco unidades. Trabajando, ver figura 10

Figura 10. Planta de Inyección de Agua campo Tello



Fuente: arenas / Delgado

- **Límites.** Manifold ó campo de entrada o succión y manifold (campo) de salida o descarga.
- **Entradas.** Agua de producción asociada (agua de formación y agua dulce), gas a 30-50 psi para los motores.
- **Salidas.** Agua mezclada y vapores de exhostos.
- **Características operacionales :** Setting por Baja succión 30 psi, alta presión de descarga 2050 psi, bajo nivel de aceite volumétrico en los motores, alta vibración en motores, engranajes y bomba, sobrévelocidad mayor de 1800 o 1100 RPM, alta temperatura de motor, bomba y engranaje, nivel de agua en las facilidades de la batería Tello.
- **Subsistemas Identificables.**
 - Sistema de bomba
 - Sistema de lubricación

- Sistema de motor
- Sistema reductor
- Sistema succión y descarga.

Análisis funcional de los subsistemas representativos tomados para el estudio de confiabilidad fueron seleccionados por el mayor número de fallas de operación y de equipos.

➤ **Nombre del Subsistema 1. SISTEMA DE BOMBA**

- **Función:** Bomba Reciprocante Quíntuplex Marca WHEATLEY-GASSO modelo Q-7600AL con 5 pistones, bombea agua entre 1400 psi y 2000 psi, con un flujo de 450 barriles / hora.
- **Límites:** Manifold de entrada y Manifold de salida.
- **Componentes Identificables:** Cigüeñal, 5 bielas, 5 plungers, 5 pony rod, 4 rodamientos.
- **Entradas:** Agua de producción asociada y aceite de lubricación.
- **Salidas:** Agua de inyección asociada.
- **Características operacionales:** Temperatura de aceite, nivel de aceite, presión de aceite, vibración en el manifold y en el power end.

➤ **Nombre del subsistema 2. SISTEMA DE LUBRICACIÓN**

- **Función:** Lubricar, limpiar y refrigerar internamente los componentes del motor y de la bomba
- **Componentes Identificables:** Bomba de aceite, enfriador, filtro de aceite, válvula de alivio, bombas de inyección de lubricantes.

➤ **Nombre del subsistema 3. SISTEMA MOTOR**

- **Función:** Mover la unidad de bombeo de inyección de agua a 320 RPM después del reductor.
- **Componentes Identificables:**
 - Sistema de enfriamiento : Bomba de agua, termostatos, radiador y refrigeración,
 - Sistema de lubricación: Bomba de aceite, difusores de aceite.
 - Sistema eléctrico: protecciones, arranque, batería, cargador, bujías, bobinas, magneto, instalación de alta, modulo de ignición.
 - Sistema mecánico: Culatas, pistones, bielas, cigüeñal, bloque, Carter, embrague, turbo, tapas, balancines, múltiple, enfriador de aceite, enfriador de aire, volante, seguidores de levas, piñones de repartición, filtro de aceite, filtro de aire y gas.

- **Entradas:** Gas, aire, agua y aceite.
- **Salidas:** Potencia mecánica y gases de combustión.
- **Características Operacionales:** Presión de aceite, temperatura del refrigerante, temperatura del aceite, baja presión de gas consumo motor, nivel de agua del motor, nivel de aceite, vibración del motor, sobre velocidad.

3.5 PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La información que se aplica para estimar y alimentar el software de confiabilidad y el análisis de Weibull, fue proporcionada por el sistema de información y plataforma interactiva de DATASTREAM, (Masa - Hocol), base de datos en Excel e Información del software Ellipse aplicado en Ecopetrol.

Los datos están clasificados por tiempos de intervención y llamados por fallas o correctivos de emergencia para el sistema analizado, que en nuestro caso son las bombas de inyección de agua de la PIA-TELLO.

Se clasificaron o depuraron los datos según tipos de fallas, criticidad, importancia e impacto en las pérdidas de producción, por unidad de bombeo en su simplicidad y en el conjunto de las seis unidades. **Ver anexo B.**

En el análisis y diagnóstico de las unidades se encuentran especificadas los tiempos de las fallas y de los modos de fallas.

El tiempo que se obtuvo como base para realizar el estudio fue la información analizada de 12 meses que comprenden (Diciembre del 2005 a Diciembre del 2006),

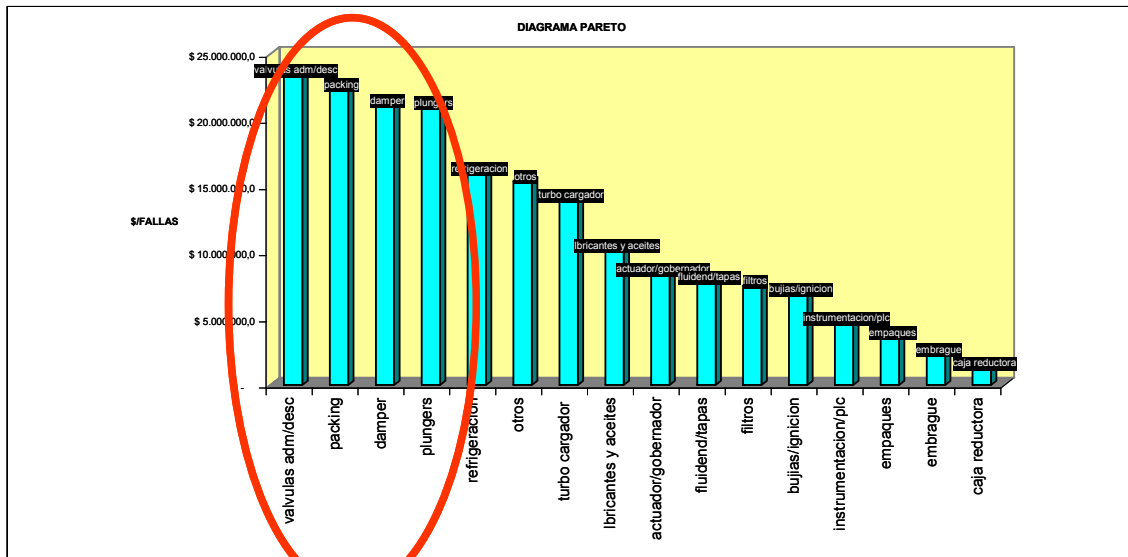
La información de entrevistas totalmente informales con el personal técnico de mantenimiento y de operaciones, apoyaron muchas de las inquietudes y criterios de decisión para sugerir recomendaciones.

Los criterios que se tuvieron en cuenta para clasificar las fallas fueron los siguientes:

- **El tiempo real de operación hasta la falla,**
- **Los tipos de fallas mas frecuentes**
- **Los de mayor impacto en la producción y operación.**

Así se clasificaron más de 250 reportes escritos, haciendo una previa depuración con los filtros de los Software y base de datos expuestos. Al final se obtuvieron 90 reportes significativos de las fallas de las bombas de inyección.

Figura 11. Modos de Fallas Planta de inyección de agua por costos



Fuente: Arenas / Delgado

3.6 MEDICIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL ANÁLISIS DE LOS DATOS

El diagnóstico general de las unidades es a continuación el siguiente:

➤ **Diagnóstico de la Unidad “A”.**

Descripción Equipo:

Motor: WAUKESHA H24GL

Bomba: WHEATLEY-GASSO Q-7600AL.

El diagnóstico de confiabilidad realizado con el software REALIABILITY MAINTENANCE ANALYSIS para el conjunto motor-bomba para la planta de inyección de agua es el siguiente:

- Parámetro β : 1,046 (mortalidad por desgaste temprano)
- Parámetro η : 458
- MTBF: 458 horas.

Como se observa los valores de los parámetros están ligados a fallas por deterioro temprano y se puede visualizar con el valor tan estrecho de tiempo promedio entre fallas, que solo alcanza a tener un ciclo de operación normal sin ningún evento igual a 20 días, esto traduce el dato calculado de 458 horas.

Si este tipo de fallas se encuentra dentro de este intervalo, tiene las características de:

- Bajo ciclo de disponibilidad
- Muchas fallas por componentes mecánicos móviles

- Corrosión
- Vibración y desbalance de componentes
- Overhaul's o mantenimientos no asegurados por partes remplazadas con un ciclo de vida no efectivo
- Condiciones de operación afectadas por otros procesos ligados a la inyección de agua.

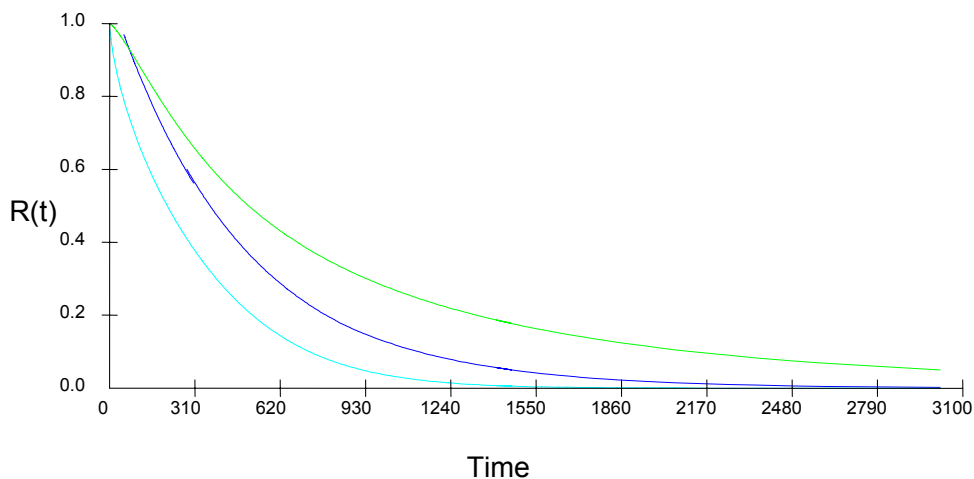
La confiabilidad prevista para mantener sus condiciones optimas de operación en un intervalo de tiempo de 6 meses y predecir las fallas del equipo es muy pobre.

Tabla 9. Diagnóstico de confiabilidad para la Unidad A.

PERIODO DE TIEMPO	NIVEL DE CONFIABILIDAD
4320 hrs. – 180 días	Menor al 1% de no confiabilidad
2160 hrs. – 90 días	Intervalo de no confianza
1080 hrs. – 45 días	8% progreso de confianza
540 hrs. – 22 días	30% de confiabilidad
225 hrs. – menos de 10 días	62% de confiabilidad
113 hrs. – menos de una semana	79% de confiabilidad

Fuente: Arenas / Delgado

Figura 12. Confiabilidad Unidad A.



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

La confiabilidad modelada o grafica de predicción de fallas en ese tiempo promedio de fallas es la que se encuentra en la figura 12.

La tabla 10 muestra un análisis de las cuatro fallas mas criticas en esta unidad.

Estos modos de falla son las más críticas en esta unidad y la mayor parte de fallas se presentan en la bomba WHEATLEY-GASSO Q-7600AL teniendo como falla más común la fuga de agua por los pistones, (cambio de empaques).

Tabla 10. Modos de falla más significativos en la Unidad “A”

MODOS DE FALLA			
Packing. $\beta = 0,759$ falla prematura. MTBF 883 horas o 37 días para presentarse la rotura.	Válvulas Adm./Des. $\beta = 0,655$ prematura o infantil. MTBF 3889 horas/5 meses para evidenciar la falla.	Plungers. $\beta = 0,575$ infantil MTBF 1707 horas/72 días para manifestarse la falla.	Instrumentación. $\beta = 5,536$ desgaste excesivo. MTBF 1141 horas/48 días para presentarse falla en el control.

Fuente: Arenas / Delgado

➤ **Diagnóstico de la Unidad “B”.**

Descripción Equipo:

Motor: WAUKESHA H24GL
 Bomba WHEATLEY-GASSO Q-7600AL.

Los parámetros obtenidos mediante el cálculo de confiabilidad del equipo motor-bomba para la unidad B son los siguientes:

- Parámetro β : 0,894 (mortalidad infantil o prematura)
- Parámetro η : 360,7
- MTBF: 360 hrs.

Como se observa el equipo presenta registros en los históricos una tasa de fallas muy eventuales en tiempos de operación muy cortos y sus cálculos entre fallas muestra un evento cada 15 días, que es lo significativo del valor MTBF. Por encontrarse el parámetro BETA menor que 1, se cataloga como un comportamiento de falla infantil o prematura y se puede explicar de la siguiente forma:

- Problemas en los Overhaul's o mantenimientos no apropiados para el equipo
- Errores humanos / Errores de mantenimiento
- Inadecuada carga de trabajo
- Procedimientos de operación externos de otros procesos.

Igualmente como en la unidad A, tiene el mismo tiempo de operación y funcionamiento, pero en la batería Tello solo tienen 7 años de operación.

A continuación mostraremos la confiabilidad prevista que tendrá esta unidad de inyección para los siguientes 6 meses.

Tabla 11. Diagnóstico de confiabilidad para la unidad B.

PERIODO DE TIEMPO	NIVEL DE CONFIABILIDAD
4320 hrs. 180 días de operación	Confiabilidad menor del 1%
2160 hrs. 90 días	El mismo comportamiento
1080 hrs. 45 días	7% confiable en sus condiciones
540 hrs. 22 días	23% de confiabilidad
225 hrs. 10 días	51% de confiabilidad
113 hrs. 1 semana de operación	70% confiable

Fuente: Arenas / Delgado

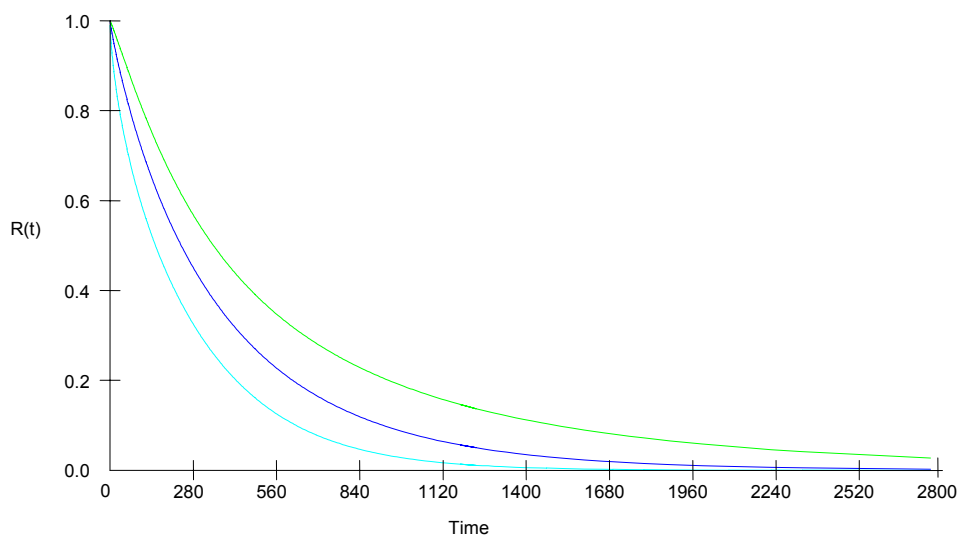
A igual que la unidad anterior mostramos la misma incidencia de los cuatro modos de falla que presenta la unidad "A".

Tabla 12. Modos de falla más significativos en la unidad B.

MODOS DE FALLA			
Packing $\beta = 1,326$ falla por desgaste. MTBF 1144horas o 48 días para presentarse la rotura.	Válvulas adm /descar $\beta = 2,88$ excesivo deterioro. MTBF 1663 horas o 70 días para evidenciar la falla.	Plungers $\beta = 1,53$ desgaste. MTBF 734 horas/1 mes para la falla.	Instrumentación $\beta = 2,793$ desgaste excesivo. MTBF 1554 horas/65 días para presentarse falla en el control.

Fuente: Arenas / Delgado

Figura 13. Confiabilidad unidad B



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

La mayor parte de las fallas se presentan en la bomba WHEATLEY-GASSO como un patrón de conducta de reiteración de fallas en las válvulas de succión y descarga.

➤ **Diagnóstico de la unidad “C”.**

Descripción equipo:

Motor: WAUKESHA H24GL

Bomba: WHEATLEY-GASSO Q-7600AL.

Los siguientes son los valores arrojados por el modelamiento del software para el conjunto de la unidad C:

- Parámetro β : 0,939 (mortalidad infantil)
- Parámetro η : 266,9
- MTBF: 266 hrs.

Por encontrarse el valor de beta menor que 1, la clasificación y característica del comportamiento de fallas es infantil, teniendo alguna diferencia pequeña con el comportamiento de la unidad B que son:

- Problemas en overhaul's
- Problemas en control de calidad de los repuestos y materiales
- Fallas de des-ensamblé
- Fallas en componentes mecánicos móviles.

Predicción de confiabilidad a 6 meses según datos aportados por información procesada.

Tabla 13. Diagnóstico de confiabilidad para la unidad C.

PERIODO DE TIEMPO	NIVEL DE CONFIABILIDAD
4320 hrs. 180 días	Confiabilidad menor al 1%
2160 hrs. 90 días	Cercano al 1% de confiabilidad
1080 hrs. 45 días	2% de confiabilidad
540 hrs. 22 días	14% de confiabilidad
225 hrs. 10 días	42% de confiabilidad
113 hrs. una semana de operación	64% de confiabilidad

Fuente: Arenas / Delgado

Tenemos el cuadro de los modos de fallas más representativos para el mantenimiento de la unidad C, terminando así las unidades con el arreglo motor WAUKESHA y bomba WHEATLEY-GASSO.

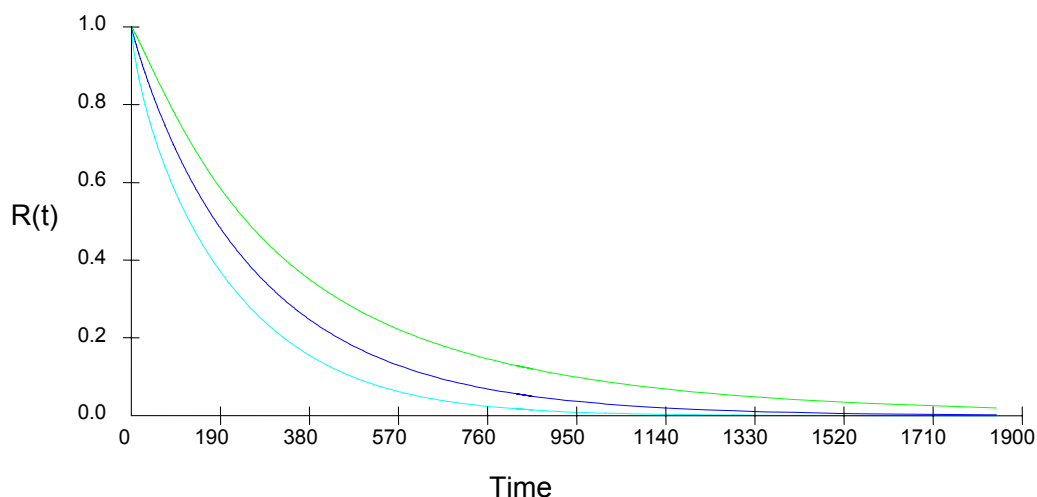
A continuación la tabla 14 muestra los modos de la unidad C.

Tabla 14. Modos de falla más significativos en la unidad C.

MODOS DE FALLA			
Packing. $\beta = 0,812$ falla prematura. MTBF 1203 horas o 50 días para presentarse la rotura.	Válvulas adm/des. $\beta = 1,293$ desgaste prematuro. MTBF 2404 horas/100 días para evidenciar la falla.	Plungers. $\beta = 2,47$ excesivo MTBF 1480 horas/62 días para manifestarse la falla.	Instrumentación. $\beta = 2,48$ desgaste excesivo. MTBF 1807 horas/75 días para presentarse falla en el control.

Fuente: Arenas / Delgado

Figura 14. Confiabilidad unidad C



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

➤ **Diagnóstico de la unidad "D".**

Descripción equipo:

Motor: CATERPILAR G398-DPC
Bomba: WHEATLEY-GASSO Q-7600AL.

Los siguientes valores son los que corresponden a los parámetros de medición de confiabilidad del conjunto motor-bomba:

- Parámetro β : 1,194 (mortalidad por deterioro temprano)
- Parámetro η : 277,4
- MTBF: 277 hrs.

Como puede apreciarse los tiempos promedios entre fallas han venido decayendo con una razón inversamente proporcional al aumento del parámetro beta, explicando las posibles razones de fallas que presentan muy a menudo las dos últimas unidades de bombeo.

A continuación tenemos las razones de fallas reales expuestas:

- Demasiadas fallas por strees
- Elementos mecánicos fallando (bujes, plunger, etc.)
- Corrosión y erosión de piezas
- Bajo ciclo de fatiga de piezas
- Overhauls no efectivos.

Se muestra una tabla de confiabilidad de la unidad a 6 meses que es lo más representativo del estado en que se encuentra el equipo:

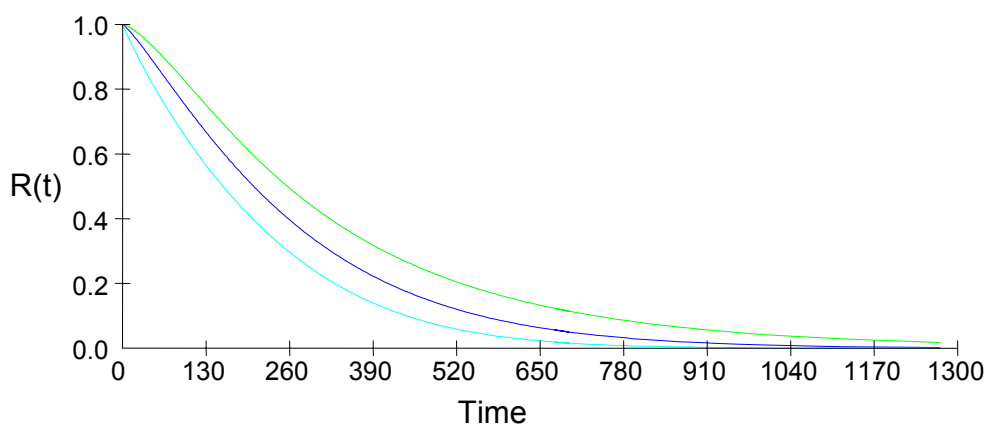
Tabla 15. Diagnóstico de confiabilidad para la unidad D.

PERIODO DE TIEMPO	NIVEL DE CONFIABILIDAD
4320 hrs. 180 días de operación	Confiabilidad no existe.
2160 hrs. 90 días de operación	Confiabilidad cercana al cero.
1080 hrs. 45 días de operación	0,6% de confiabilidad
540 hrs. 22 días de operación	11% de confiabilidad.
225 hrs. 11 días de operación	46% de confianza
113 hrs. una semana de operación	71% de confiabilidad.

Fuente: Arenas / Delgado

Se encuentra una respuesta pobre en el sostenimiento de las condiciones de operación de la unidad D, en la grafica se observa las tendencias de confiabilidad.

Figura 15. Confiabilidad unidad D



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

A continuación se presenta la tabla de estudio de los cuatro modos de fallas significativos que presentan en conjunto la unidad D.

Tabla 16. Modos de falla más significativos en la unidad D.

MODOS DE FALLA			
Packing. $\beta = 4,41$ excesivo desgaste. MTBF 1731 horas o 73 días para presentarse la rotura.	Válvulas adm/des. $\beta = 1,549$ desgaste prematureo. MTBF 1474 horas/64 días para evidenciar la falla.	Plungers. $\beta = 0,38$ falla prematura MTBF 2292 horas/96 días para manifestarse la falla.	Instrumentación. $\beta = 3,02$ desgaste excesivo. MTBF 2073 horas/87 días para presentarse falla en el control.

Fuente: Arenas / Delgado

➤ **Diagnóstico de la unidad "E"**

Descripción equipo:

Motor: CATERPILAR G398-DPC
Bomba: WHEATLEY-GASSO Q-7600AL.

Los siguientes valores son los que corresponden a los parámetros de medición de confiabilidad del conjunto motor-bomba:

- Parámetro β : 1,202 (mortalidad por deterioro temprano)
- Parámetro η : 267,4
- MTBF: 277 hrs.

Como puede apreciarse los tiempos promedios entre fallas han venido decayendo con una razón inversamente proporcional al aumento del parámetro beta, explicando las posibles razones de fallas que presentan muy a menudo de igual manera la unidad D.

Tabla 17. Diagnóstico de confiabilidad para la unidad E.

PERIODO DE TIEMPO	NIVEL DE CONFIABILIDAD
4320 hrs. 180 días de operación	Confiabilidad no existe.
2160 hrs. 90 días de operación	Confiabilidad cercana al cero.
1080 hrs. 45 días de operación	0,6% de confiabilidad
540 hrs. 22 días de operación	11% de confiabilidad.
225 hrs. 11 días de operación	46% de confianza
113 hrs. una semana de operación	71% de confiabilidad.

Fuente: Arenas / Delgado

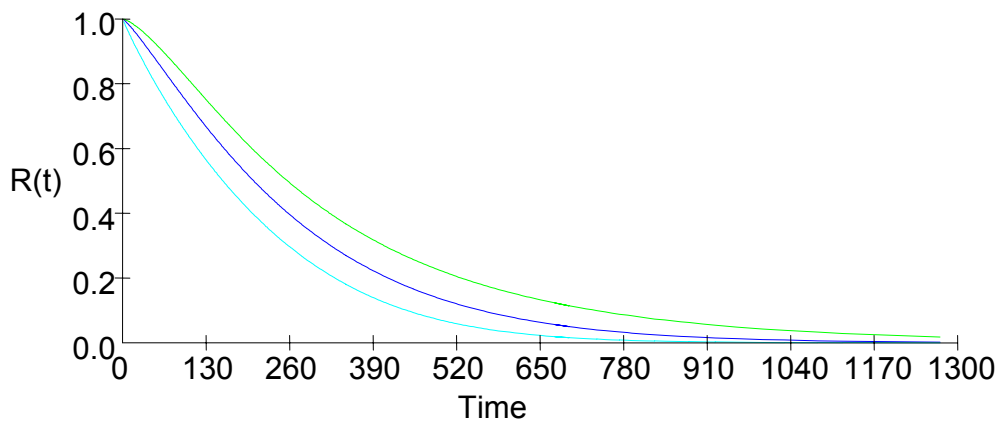
A continuación tenemos las razones de fallas reales expuestas:

- Demasiadas fallas por strees
- Elementos mecánicos fallando (bujes, plunger, etc.)
- Corrosión y erosión de piezas
- Bajo ciclo de fatiga de piezas
- Overhauls no efectivos.

Se muestra una tabla de confiabilidad de la unidad a 6 meses que es lo más representativo del estado en que se encuentra el equipo:

Se encuentra una respuesta pobre en el sostenimiento de las condiciones de operación de la unidad E, en la grafica se observa las tendencias de confiabilidad.

Figura 16. Confiabilidad unidad E



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

A continuación se presenta la tabla de estudio de los cuatro modos de fallas significativos que presentan en conjunto la unidad E.

Tabla 18. Modos de falla más significativos en la unidad E.

MODOS DE FALLA			
Packing. $\beta = 4,41$ excesivo desgaste. MTBF 1731 horas o 73 días para presentarse la rotura.	Válvulas adm/des. $\beta = 1,569$ desgaste prematuro. MTBF 1474 horas/64 días para evidenciar la falla.	Plungers. $\beta = 0,38$ falla prematura MTBF 2292 horas/96 días para manifestarse la falla.	Instrumentación. $\beta = 3,02$ desgaste excesivo. MTBF 2073 horas/87 días para presentarse falla en el control.

Fuente: Arenas / Delgado

➤ **Diagnóstico de la unidad "F".**

Descripción equipo:

Motor: CATERPILLAR G398 DPC y

Bomba: WHEATLEY-GASSO Q-7600AL.

Las condiciones de operación de esta bomba son muy particulares, por estar siempre en stand by presenta un recorrido de horas de operación pequeño a comparación con las cuatro unidades anteriormente expuestas.

La unidad F presenta los siguientes valores de medición de confiabilidad para un periodo monitoreado de 8 meses de registros de fallas.

- Parámetro β : 1,228 (falla por deterioro temprano)
- Parámetro η : 225,9
- MTBF: 225 hrs.

La explicación a su bajo desempeño y tener un estado de operación mínimo, es el desconocimiento de un histórico detallado y acciones de intervención que se ha hecho en el conjunto motor-bomba.

El diagnóstico generado a este equipo es el siguiente:

- Ciclo de vida útil puede estar finalizando
- Niveles de fatiga y corrosión altos
- Pérdida de algunas propiedades de los materiales
- Algunas formas de erosión.
- Inadecuado sistema de operación (régimen de trabajo).

Tabla 19. Diagnóstico de Confiabilidad para la Unidad F.

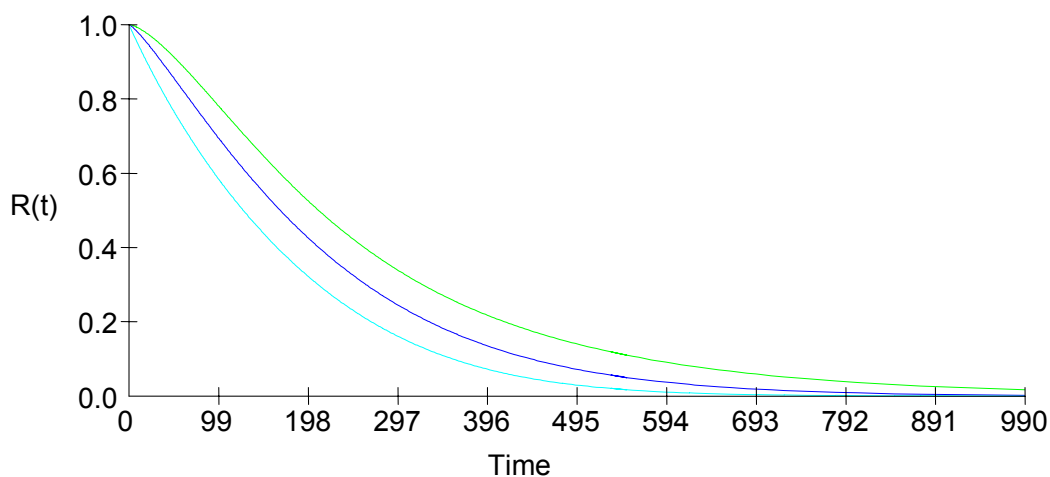
PERIODO DE TIEMPO	NIVEL DE CONFIABILIDAD
4320 hrs. 180 días de operación	Confiabilidad no existe.
2160 hrs. 90 días de operación	Alguna reacción pobre en condiciones.
1080 hrs. 45 días de operación	0,1% de confiabilidad.
540 hrs. 22 días de operación	5,6% de confiabilidad
225 hrs. 10 días de operación	36% de confiabilidad.
113 hrs. una semana de operación	65,2% de confiabilidad.

Fuente: Arenas / Delgado

Se tiene como referencia estos modos de fallas como los más recurrentes y perjudiciales en la condición de las máquinas.

Para estos resultados obtenidos de MTBF, se sugiere tener tiempos de inspecciones y verificaciones más cortos, que son una base para apuntar tareas efectivas y focalizadas en optimizar las intervenciones en el futuro plan de mantenimiento.

Figura 17. Confiabilidad unidad F



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

Tabla 20. Modos de falla más significativos en la unidad F.

MODOS DE FALLA			
Packing. $\beta = 4,82$ excesivo desgaste. MTBF 1224 horas o 51 días para presentarse la rotura.	Válvulas Adm/Des. $\beta = 2,891$ desgaste prematureo. MTBF 2126 horas/3 Meses para evidenciar la falla.	Plungers. $\beta = 7,345$ falla por deterioro excesivo MTBF 3510 horas/150 días para manifestarse la falla.	Instrumentación. $\beta = 1,4$ desgaste prematureo. MTBF 911 horas/38 días para presentarse falla en el control.

Fuente: Arenas / Delgado

3.7 DIAGNÓSTICO DE LOS MODOS DE FALLAS PIA-TELLO

- **Descripción de falla.** Instrumentación y control. La definición de esta falla es muy ambigua pero el concepto que se registro dentro de la operación durante el año fue el de ausencia de los mecanismos de protección y control de operación de las unidades. Ejemplos de fallas en los transmisores de presión, salidas de parámetros de arranque. Las diferentes formas de fallo de este modo son:

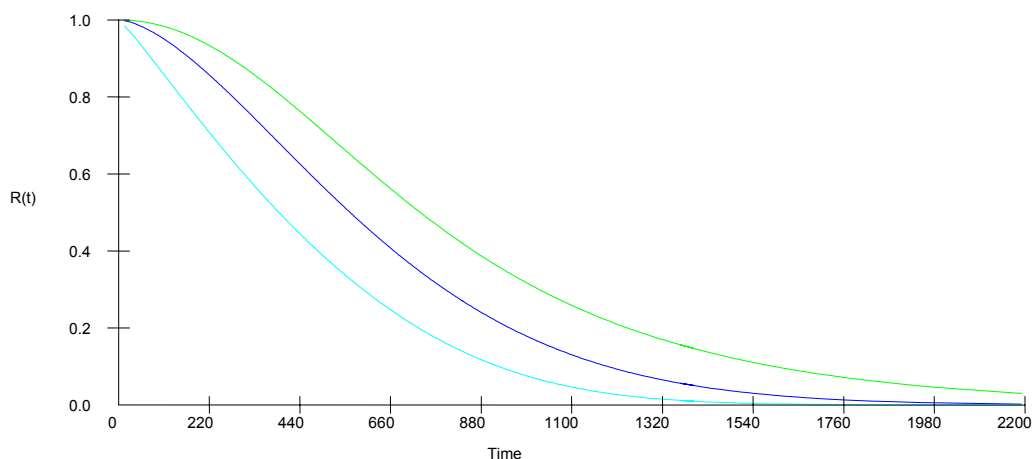
- Sobre tensión o cortos circuitos – evento poco probable
- Interrupción por ruido en la señal
- Relés de protección del circuito de control.(accionamientos eléctricos)
- Contactos no operando
- Setting en las variables de control
- Descalibración en los actuadores y sensores
- Daño del sensor de control en el sitio de medición.

- Situaciones atmosféricas inapropiadas. (Tormentas eléctricas o problemas de tierras).

La figura 18 muestra el comportamiento de la confiabilidad esperada por “instrumentación y control” en las unidades de inyección de agua es la siguiente con sus factores de beta y tiempo esperado de falla.

- Parámetro β : 1,606 (falla por deterioro temprano)
- Parámetro η : 705,9
- MTBF: 632,7 hrs.

Figura 18. Instrumentación y control PIA-TELLO



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

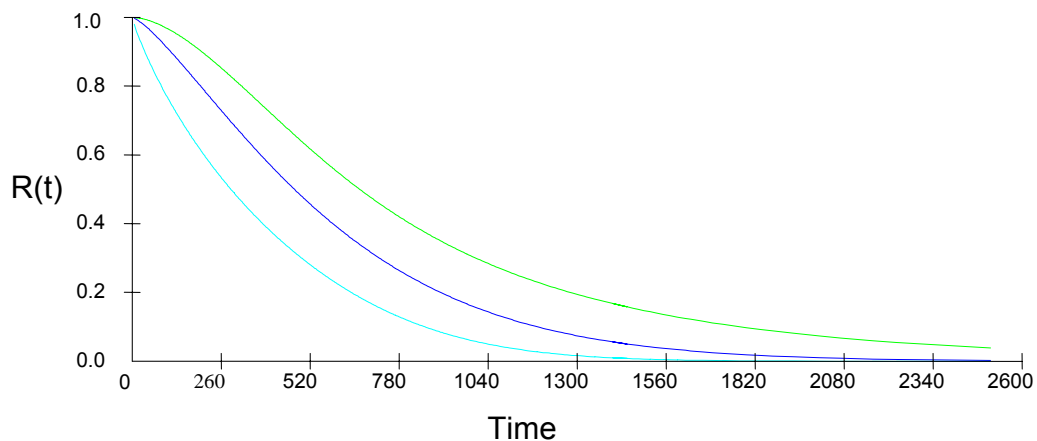
• **Descripción de falla:** Rotura de plungger. La falla en que nos encontramos describiendo obedece a los desgastes que presentan las camisas donde se encuentra el stuffing box de cada línea de compresión, las causas del modo de falla en cuestión son las que se enumeran a continuación:

- Fatiga del material
- Sobre esfuerzo de la pieza
- Cavitación en la bomba.
- Alta vibración y desalineación de centralizador
- Diseño del componente, variables no controladas
- Rotura de componente adicional por operación
- Corrosión y erosión de la pieza
- Camisa en mal estado (stuffing) por ralladuras, fisuras y desgaste natural.

Los factores encontrados y evaluados para la confiabilidad de operación de los equipos en cuestión con este caso en particular donde interactúan tantos componentes móviles y se desarrolla la mayor actividad mecánica en la bomba son:

- Parámetro β : 1,311 (falla por deterioro y desgaste temprano)
- Parámetro η : 626,3
- MTBF: 577,5 hrs.

Figura 19. Confiabilidad PLUNGERS



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

● **Descripción de falla:** válvulas de admisión y descarga. Este modo es muy difícil de pronosticar, pero sus causas más frecuentes y los comportamientos que presentan son:

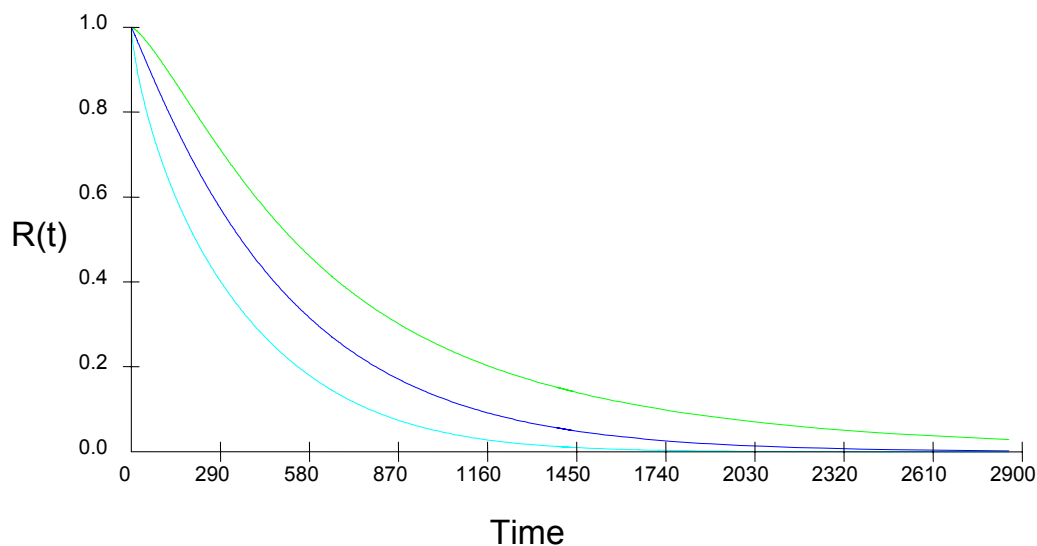
- Fatiga del material y de los componentes móviles de la válvula (asientos de válvulas, resorte antagonista, soporte, etc.)
- Esfuerzos de compresión por encima de diseño
- Presión de operación alta por Cavitación en la admisión o en la descarga
- Cumplimiento del ciclo de vida
- Medio altamente corrosivo. (Fluido muy pesado)
- Rompimiento por componentes internos en falla, packing, plunger, etc.

Los factores de comportamiento de la función de distribución Weibull son:

- Parámetro β : 1,051 (falla por deterioro aleatorio y proceso fuera de control)
- Parámetro η : 506,1
- MTBF: 496,3 hrs.

La mayor consecuencia de este modo, es la causa de pérdida del sistema de medición de presión en tiempos de operación y el no actuar del sistema de protecciones de vibraciones

Figura 20. Válvulas de admisión y descarga



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

▪ **Descripción Falla.** PACKING O EMPAQUES STUFFING BOX

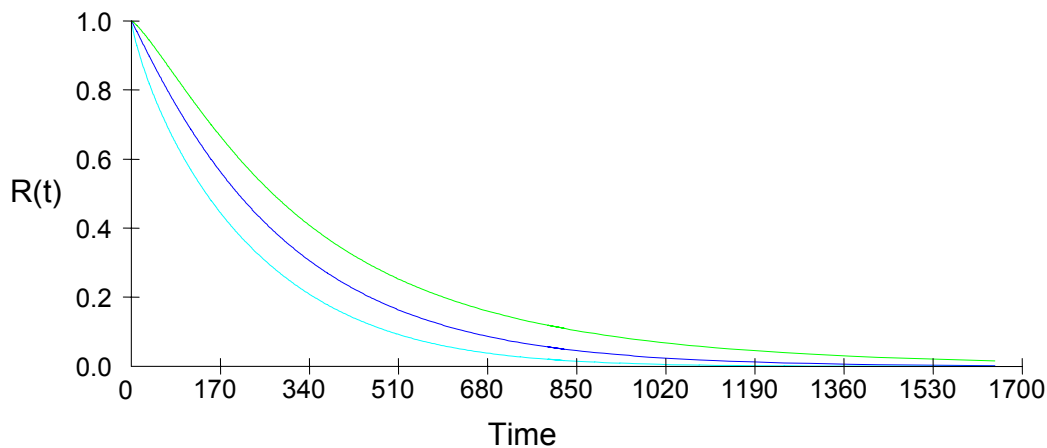
Esta definido por la pérdida de la función de sellar y aislar el fluido en la camisa del plungers, las causas de este comportamiento de falla son:

- Cristalización del material por falta de lubricación.
- La capacidad de dilatación y compresión mecánica del material es insuficiente por falta de lubricación.
- Fisura y fatiga del material
- Presión excesiva de succión/descarga
- Golpes por otros elementos en estado de falla y elementos abrasivos.

Los factores que se dan a conocer son los del sistema completo y su relación de operación conjunta.

- Parámetro β : 1,042 (falla por deterioro aleatorio y ciclo de vida bajo)
- Parámetro η : 289
- MTBF: 284 hrs.

Figura 21. Confiabilidad PACKING



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

▪ **Descripción falla. FLUID END / TAPAS**

Se define por la pérdida de rendimiento en la compresión e inyección de agua en sus recamaras de succión y descarga, tiene asociada todas las repercusiones que afecten los sistemas y componentes alrededor de la bomba. Las causas del modo son:

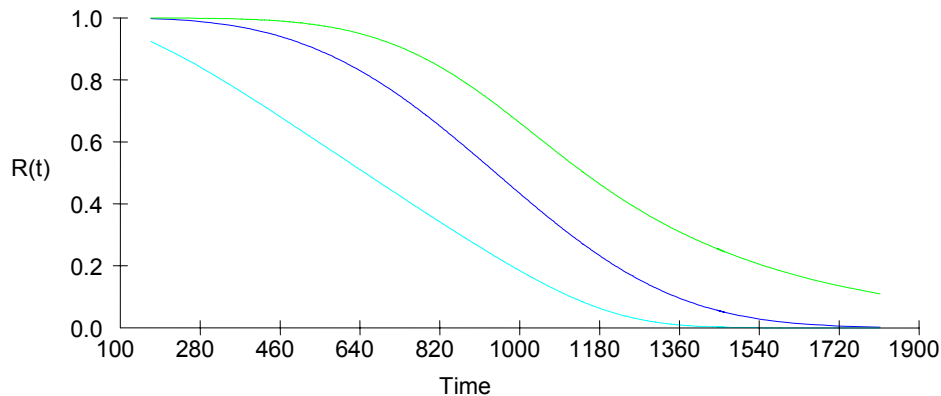
- Fatiga mecánica del material, tiempo de vida útil por encima de operación
- Tener ciclo de vibraciones igual excesivo
- Cargas repetitivas de presión y Cavitación
- Golpes por roturas de otro componente en falla.

Los valores calculados para su función de densidad Weibull y diagnostico son:

- Parámetro β : 3,362 (falla por deterioro normal por cumplimiento de ciclo)
- Parámetro η : 1055
- MTBF: 947,2 hrs.

La grafica o ilustración mostrara el comportamiento de confiabilidad de este modo de falla importante para la correcta operación de elevar las presiones, es aquí donde se presentan grandes problemas de cavitación entre las recamaras de succión y descarga.

Figura 22. Confiabilidad FLUID END / TAPAS



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

▪ **Descripción falla.** ROTURA DE DAMPENER DE SUCCIÓN / DESCARGA

Se define por ser un elemento de amortiguación de las vibraciones que presenta el fluido en su succión y descarga en la bomba.

Causas del modo:

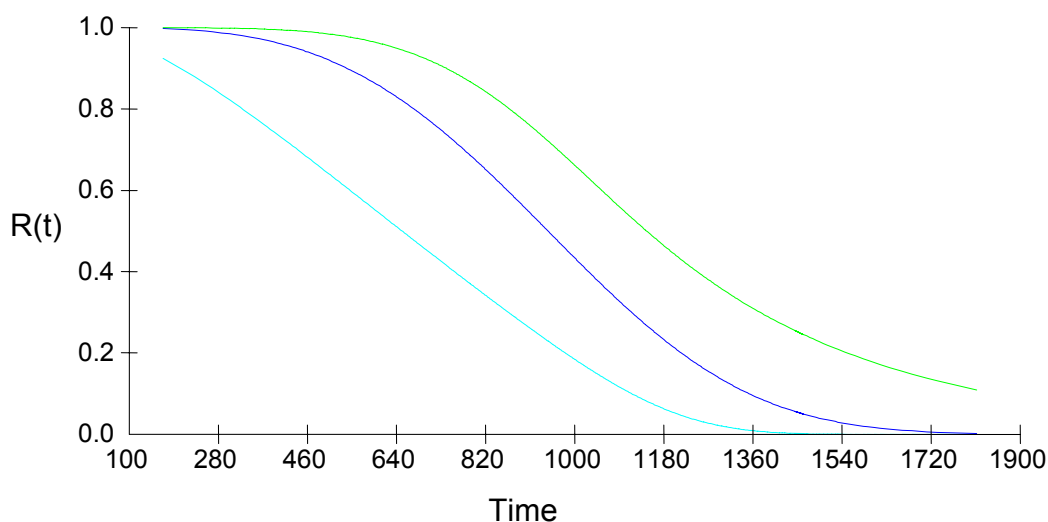
- Ciclo de vibraciones por cavitación
- Fatiga y pérdida de propiedades mecánicas
- La cristalización de la soldadura y pérdida de su rigidez mecánica
- Presión de succión / descarga por fuera del Setting de operación
- Mala operación de las válvulas de alivio o seguridad de las respectivas líneas.

Los valores de confiabilidad, usando la función de densidad Weibull para el caso descrito anteriormente son los siguientes:

- Parámetro β : 1,898 (falla por deterioro normal e inapropiado diseño)
- Parámetro η : 1170
- MTBF: 1038 hrs.

La importancia de este modo de falla es el incremento de las pérdidas en producción y el atraso en la restauración del proceso.

Figura 23. Confiabilidad DAMPERS de Succión y Descarga de la Bomba.



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

▪ **Descripción falla.** CAJA LUBRICADORA Y COMPONENTES.

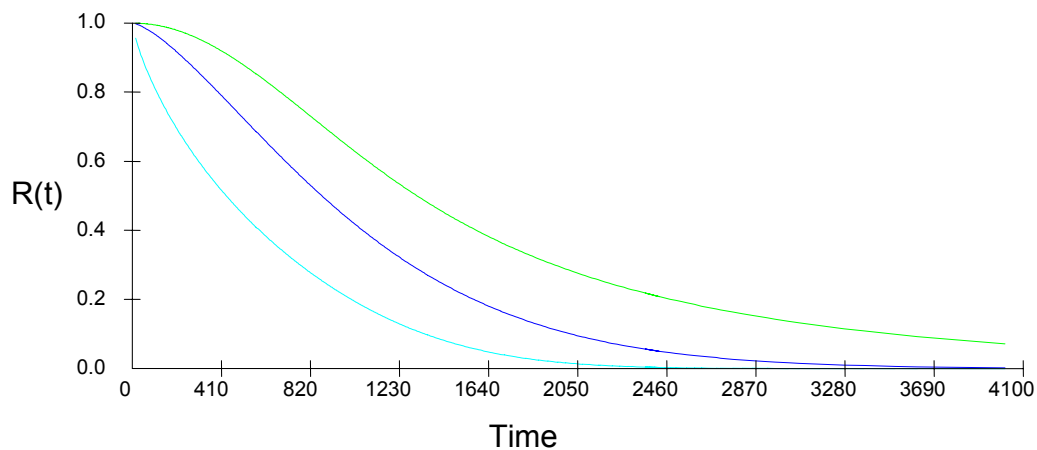
En este momento las fallas en descripción son poco probables o tienen tiempos de fallas calculados bien distanciados, pero tienen grandes impactos en la disponibilidad de las unidades, las causas de las fallas son las siguientes:

- Boquillas de Lubricación en mal estado.
- Mangueras rotas, cumplimiento de vida útil
- Filtros en mal estado
- Desgaste en cuñero polea.
- Desgaste de correa
- Válvulas de admisión obstruidas
- Fisura de caja almacenadota.

Los parámetros medidos para las cajas lubricadoras y los componentes son:

- Parámetro β : 1,431 (falla por deterioro anormal y aleatorio)
- Parámetro η : 1127
- MTBF: 1024 hrs.

Figura 24. Confiabilidad DE CAJA LUBRICADORA Y LUBRICANTES



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

▪ **Descripción falla. ROTURA DE EMPAQUES**

No es una falla común pero es considerable su impacto en la operación de las unidades de inyección.

Las posibles causas de las fallas de este tipo son las siguientes:

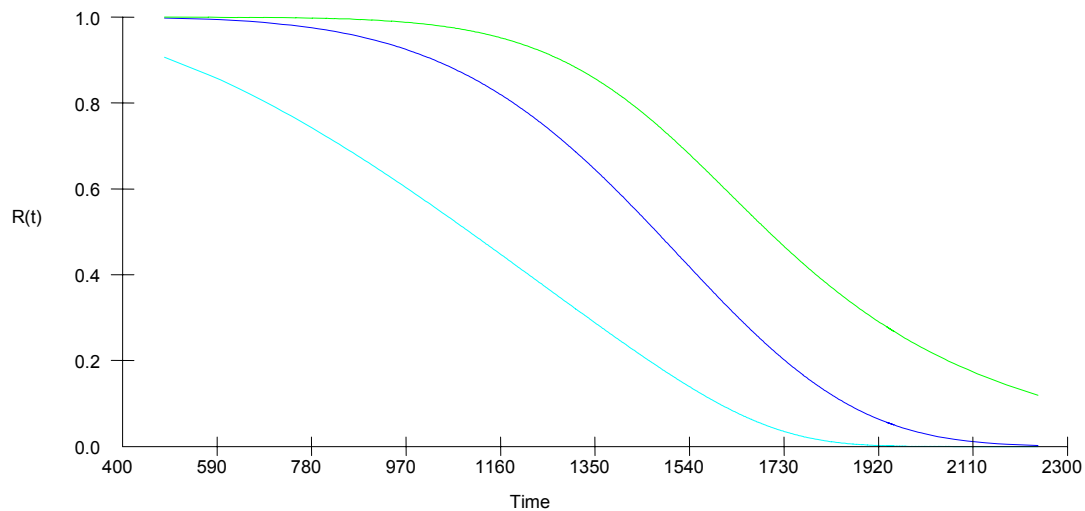
- Alta vibración y desalineación
- Mal funcionamiento del sistema de lubricación
- Erosión y corrosión de los sellos.(fluido muy pesado y corrosivo)
- Ciclo de vida y fatiga del componente
- Esfuerzos de compresión por encima de diseño.

Esta falla se encuentra ligada al cambio y monitoreo de aceites, lubricantes y refrigerantes en el conjunto motor-bomba.

Los factores o parámetros de importancia son:

- Parámetro β : 5,216 (falla por deterioro normal del ciclo de vida)
- Parámetro η : 1581
- MTBF: 1455 hrs.

Figura 25. Roturas de Empaques



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

▪ **Descripción falla.** CAJA REDUCTORA

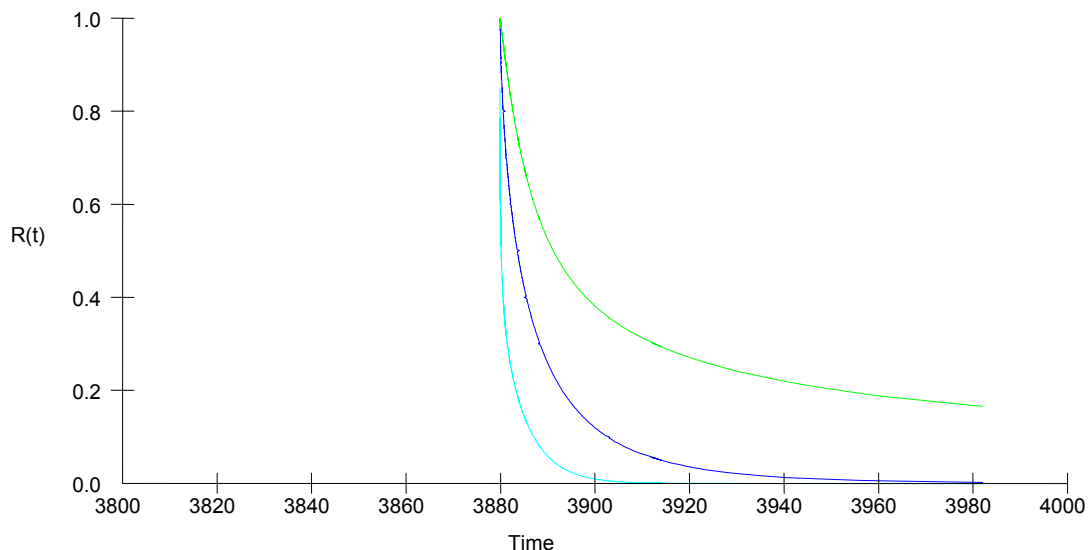
En esta sección se presentan los siguientes tipos de fallas:

- Desgaste por fricción de los dientes en los piñones
- Lubricación no adecuada
- Falla por fatiga y rigidez mecánica de los piñones y platos
- Bujes y rodamientos desgastados por fricción
- Alineación, desbalance y vibración en el eje impulsor
- Cuñas y topes de protección inadecuados o rotos
- Fatiga del material
- Perdida de propiedades mecánicas (elasticidad, dilatación, etc.)
- Anclajes.

Los tiempos de falla para las cajas reductoras son muy distantes entre fallas y los valores de los parámetros son muy grandes y amplios.

- Parámetro β : 0,655 (falla por deterioro temprano de piezas)
- Parámetro η : 6,358
- MTBF: 3889 hrs.

Figura 26. Caja Reductora



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

Se sugiere que a partir del conocimiento de estos tiempos promedios de fallas se realicen inspecciones, monitoreos y chequeos de componentes antes de cumplir estos intervalos.

Estas practicas evitan las ocurrencias de fallas en las unidades y alargan el tiempo de disponibilidad de las maquinas y el mejoramiento del proceso de inyección.

3.8 MODELAMIENTOS DE LOS MOTORES DE LAS UNIDADES DE INYECCIÓN

Motores WAUKESHA H24 GL y CAT G398 DPC

La descripción general de las fallas originadas por los motores en las unidades de inyección, son bajas al compararlas con las fallas de las bombas; son fallas de frecuencia muy baja y de poca representatividad, se indican a continuación sin enumerar sus posibles causas.

Pero el desempeño de las tres unidades que tienen el arreglo con motores WAUKESHA con respecto a los motores CATERPILLAR es muy superior, no con esto decir que los motores caterpillar no funcionen en condiciones adecuadas de servicio, sino que merecen mas atención y cuidados de parámetros de servicio, ya que no permiten cambios bruscos en las variables de operación, como

temperatura ambiente y de trabajo, presión de gas de admisión, vibraciones y demás parámetros de verificación para su buen desempeño.

Las fallas mas representativas en los motores de las unidades de inyección durante el periodo de análisis y que son muy esporádicas durante el año 2005 y 2006 son las siguientes:

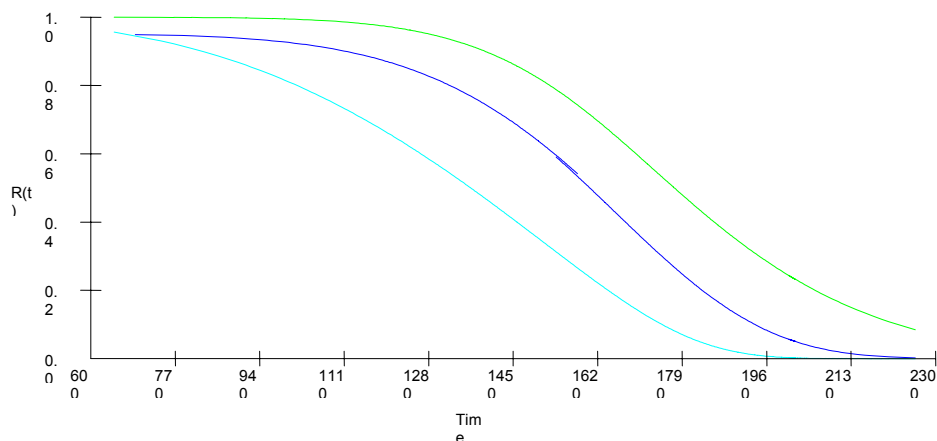
- Bancada y biela del pistón
- Niveles y calidad de aceite
- Bujías y sistema de ignición
- Fatiga y fisura del bloque de culatas
- Turbo-cargador
- Actuador, gobernador y tarjeta electrónica de control.
- Sistema de enfriamiento
- Sistema del radiador
- Filtros de alimentación de gas y de aceite.

Se entregan los modelamientos con los parámetros calculados por separados para los motores, ya que no presentan comportamientos críticos como las bombas WHEATLEY GASSO.

Motores WAUKESHA H24 GL (unidades A, B y C).

- Parámetro BETA: 6,384 (falla por deterioro normal de piezas)
- Parámetro η : 1699
- MTBF: 1582 hrs.

Figura 27. Motores WAUKESHA H24 GL



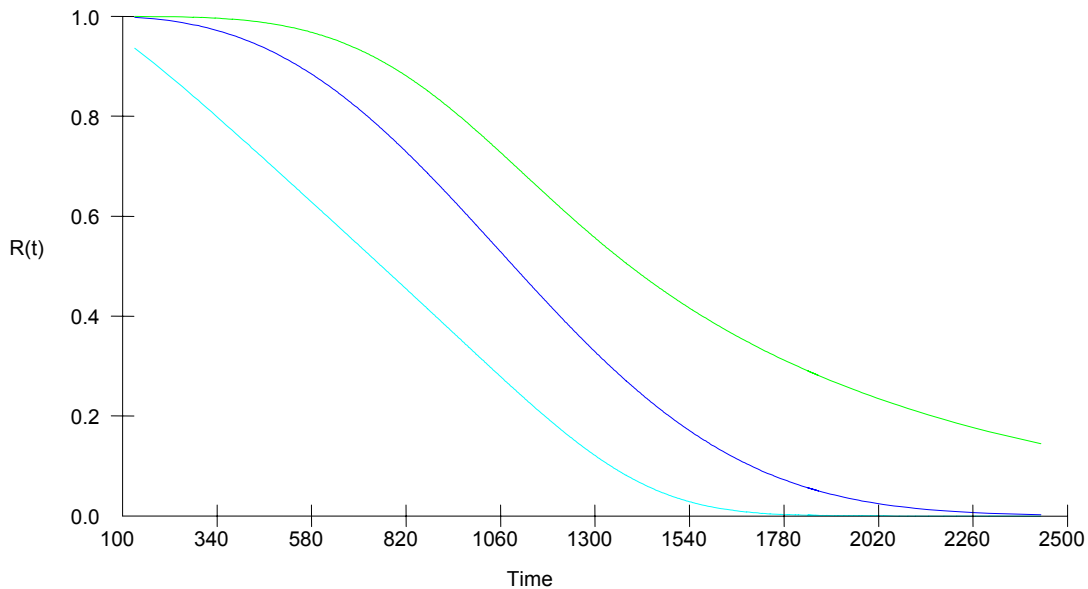
Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

Motores CAT G398 DPC (unidades D y E)

- Parámetro BETA: 2,733 (falla por deterioro anormal de piezas)
- Parámetro η : 1250

- MTBF: 1112 hrs.

Figura 28. Motores CAT G398 DPC



Fuente: Software Reliability Maintenance Analyst.

3.9 ANÁLISIS DE FALLAS

A continuación se describe la metodología implementada para la toma de decisiones en el manejo de fallas catastróficas con impacto en el medio ambiente, accidente de trabajo, pérdida de producción o pérdidas materiales, también como una fuente de información importante para capturar las fallas recurrentes, esporádicas que suceden durante la operación y el mantenimiento, esta base de datos es importante como herramienta de confiabilidad para realizar seguimiento, análisis, conocer los problemas reales, la causa raíz, Mean Time Between Failure (MTBF) y realizar una fácil documentación de problemas encontrados durante la operación y mantenimiento.

Esta herramienta sirve para listar los problemas y realizar paretos, tendencias, estadísticas y determinar cuales son los problemas críticos y costosos para determinar cambios en diseño, mejoramiento en la actividad de mantenimiento y operacional.

Esta metodología es basada en el MIL-STD- 690B y en la ISO 14224.

3.9.1 Análisis de Modos y Efectos de Falla FMEA. Determina los eventos de falla que serán estudiados mediante la técnica RCFA (Análisis de Falla basado en las Causas Raíz), reporte de falla con lecciones aprendidas o análisis de falla

estadístico, teniendo en cuenta su impacto ambiental, de producción, económico y los aspectos de seguridad industrial.

Este procedimiento aplica para el análisis de todos los eventos de falla presentados en los equipos y activos de la planta de inyección de campo Tello. Con una frecuencia mensual y/o cada que se produzca una falla.

El FMEA (Failure Mode Effect Analysis) es una herramienta para estimar la criticidad de una falla de acuerdo al impacto que presenta. El FMEA inicialmente evalúa el grado de severidad y probabilidad de ocurrencia de una falla, para determinar el grado de impacto que esta genera en el medio ambiente, producción, costos y seguridad industrial.

Basados en sus históricos el FMEA utiliza la regla 80-20 (Análisis de Pareto). En ésta se afirma que el 80% de los costos de las fallas en las instalaciones son causados por el 20% de las fallas totales. Estas se designan como las “pocas fallas significantes críticas y son identificadas para un análisis RCFA. Algunas fallas del 80% restantes y que forman parte de “las muchas fallas no críticas” y corresponden al 20% de los costos de las fallas siguen siendo relevantes y vale la pena hacerles seguimiento y análisis pero con un enfoque mucho más bajo y menos disciplinado. Para estos casos se debe realizar entonces un Reporte de Falla con lecciones aprendidas y seguimiento con ordenes de trabajo del software de administración del mantenimiento en este caso datastream 7i y ellipse.

➤ Los eventos de falla que serán evaluados empleando el FMEA serán obtenidos de las siguientes fuentes:

- Bases de datos de disponibilidad y control de paradas
- Reportes del Sistema de Información de Mantenimiento 7i y Elipse.
- Reportes de Incidentes

➤ **Fallas periódicas:** De las bases de datos de disponibilidad control de paradas sacar las estadísticas de fallas y mantenimientos correctivos por equipos y tipo de equipos, incluyendo MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio para reparaciones), causa, número de Fallas, Tiempo Improductivo (Down Time) y Perdida de producción asociada e índices de mantenimiento, tales como confiabilidad, disponibilidad, eficiencia, etc.

Evaluar los costos de los diferentes mantenimientos correctivos realizados tomando los datos de costo de materiales, usando el datastream 7i y ellipse. Y si es necesario gastos operativos como consumo de energía, químicos, etc.

Realice el análisis de Pareto 80-20 para determinar “las pocas fallas significativas. Las pocas fallas significativas determinadas mediante este análisis serán las fallas a las cuales se les debe realizar un RCFA.

- **Fallas Esporádicas.** Las fallas esporádicas y potenciales, con un alto impacto a la producción, o que resulten en daños y lesiones al medio ambiente o a las personas, o que sean consideradas como incidentes de seguridad serán analizadas de acuerdo a la matriz de evaluación mostrada en la figura 29. Evalúe incidentes ambientales con “causa”, duración y costo e incidentes de seguridad industrial, con “causa”. Las fallas que tengan una severidad ubicada en los niveles Catastróficos y alta serán consideradas como “pocas significativas” y por consiguiente serán sometidas a un RCFA.

Cada vez que se realice un FMEA se debe emitir un informe comunicando los resultados. Las “pocas fallas significativas, serán analizadas por medio de un RCFA y las “muchas fallas no críticas” serán analizadas empleando la técnica tradicional de reporte de falla mejorada con la aplicación de los pasos del RCFA.

Con el Flujo de análisis de una falla se determinado el grado de impacto de la falla y el lider de planeacion determinaran la decisión a tomar para la investigación del incidente usando el flujo de análisis de falla de la figura 30. Donde se identifica que tipo de falla y cual es proceso para su análisis.

Figura 29. Matriz para definir Tipo Análisis de falla a Ejecutar

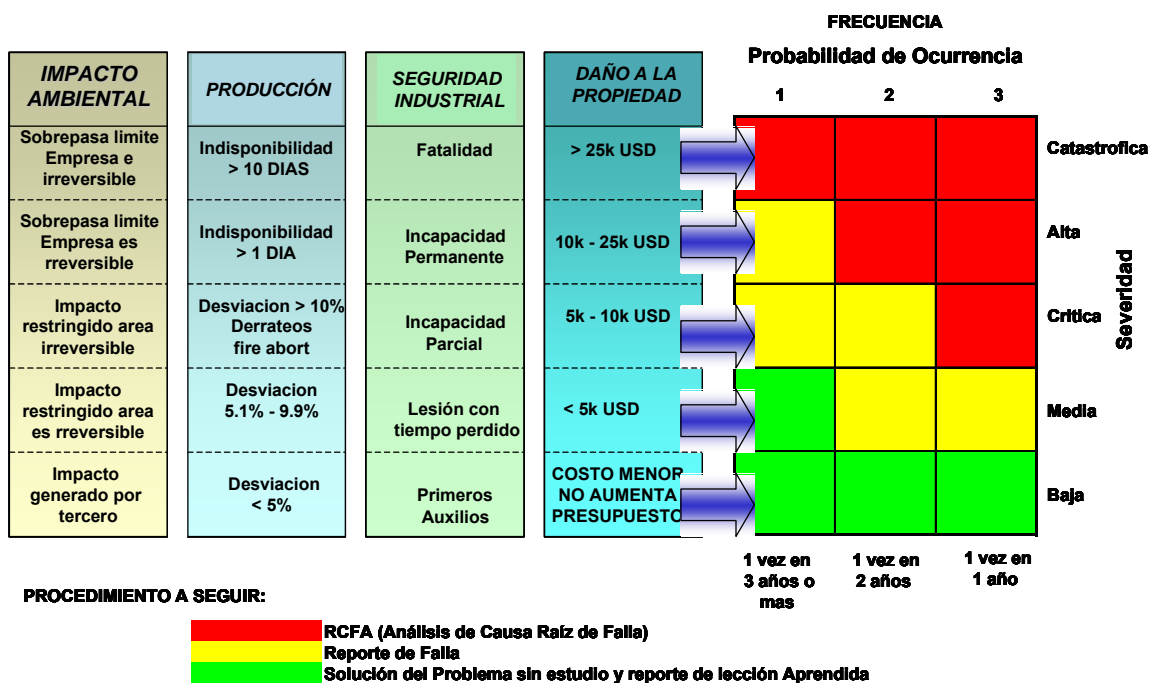
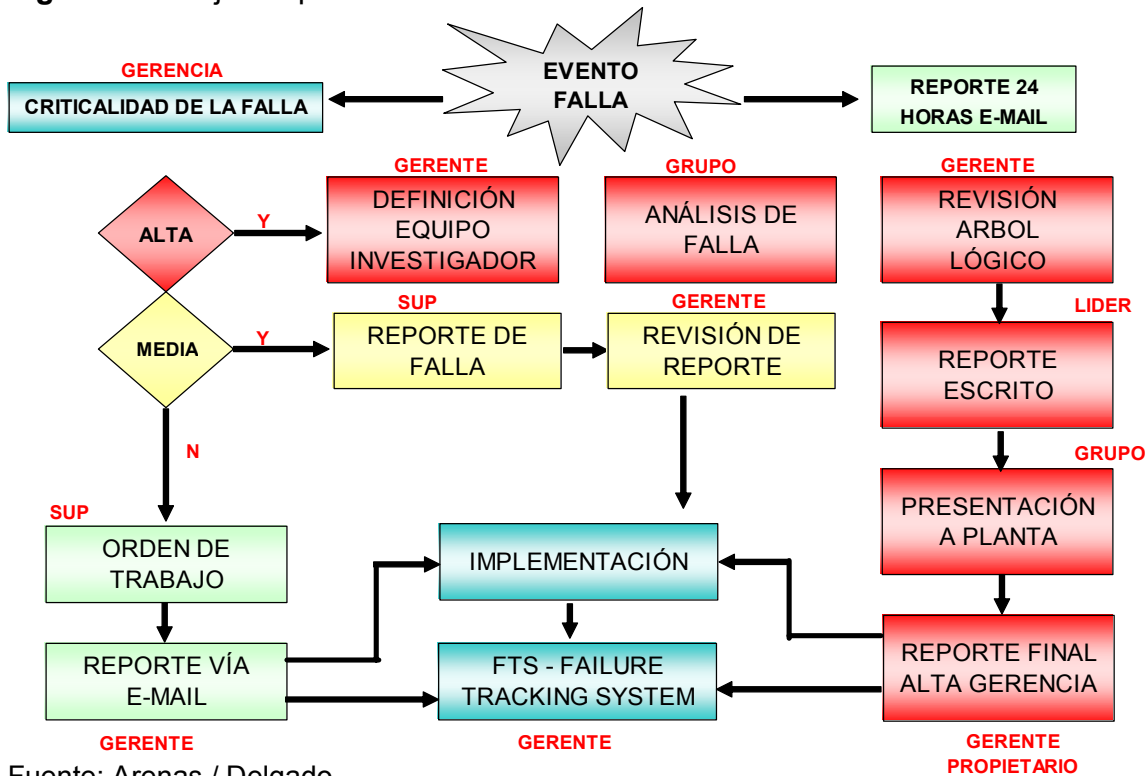


Figura 30. Flujo del proceso de análisis de fallas



Fuente: Arenas / Delgado

3.9.2 Definición del equipo RFCA. Dependiendo de la naturaleza y tipo de evento de falla, el Coordinador de mantenimiento o/y operaciones seleccionará al Analista Principal “PA” de cada RCFA, teniendo en cuenta su experiencia específica en el área y su capacidad para liderar y facilitar grupos de investigación de incidentes y análisis de falla.

Los siguientes aspectos deberán ser considerados para la selección del Equipo:

- El grupo debe ser multidisciplinario.
- Debe involucrar personal directamente afectado por el problema o evento.
- Debe involucrar personal que pueda estar involucrado con la implementación de la solución.
- El personal que interviene en el RCFA debe ser excusado de sus asignaciones normales de trabajo, total o parcialmente, mientras se encuentre trabajando en el análisis.
- La conformación del Equipo depende de la falla que se vaya a analizar. Un equipo puede constar de tres a ocho personas, y contar con recursos externos adicionales si es necesario.

- Entre los miembros regulares de un equipo se puede incluir personal de operaciones, técnicos, supervisores, ingenieros, diversos especialistas, proveedores, etc. En cada análisis estará presente un Ingeniero de Planeación, quien hará las veces de Documentador.
- Al menos una persona del equipo debe ignorar los eventos de la falla y actuar como crítico constructivo, o abogado del diablo con respecto a las teorías y posibilidades que surjan de la tormenta de ideas.
- Se debe promover el pensamiento no encasillado. El Equipo debe determinar su misión y lo que desean lograr.
- El Equipo se estará reuniendo con frecuencia, asignando responsabilidades para investigación o verificación adicional y regresando para otras reuniones hasta la conclusión de la investigación y de los informes.
- Cada análisis de falla se llevará a cabo en un salón para uso exclusivo del Equipo RCFA, donde podrán recopilar y evaluar las evidencias, dotado de mesa de conferencia, tableros y espacio en la pared para colocar los árboles de lógica de causa raíz.

3.9.3 Análisis de falla basado en las causas raíz.

- El Analista Principal deberá aclararle al Equipo RCFA el alcance (límites) del análisis e identificar los beneficios económicos y/o de seguridad esperados al resolver el problema.
- El Compromiso y los Factores Críticos de Exito (CSF) del análisis deberán ser definidos de tal manera que cada miembro del Equipo conozca el propósito del análisis y sepa si el esfuerzo es exitoso.
- El equipo definirá de manera precisa el evento. Sin una definición clara de la falla, una serie totalmente equivocada de modos de falla podría arrojar un buen número de causas raíces, pero es posible que las soluciones no arreglen el verdadero problema.
- El Equipo RCFA necesita desarrollar una estrategia para la recolección de las 5 P's (Partes, posiciones, personas, papel y paradigmas) e iniciara el proceso de análisis de falla, realizando el árbol lógico de falla.
- El Analista Principal se pondrá en contacto con la Gerencia técnica para revisar el árbol lógico. Esta revisión debe realizarse antes de proceder con la publicación y presentación formal del Reporte RCFA al grupo implementador y a la alta gerencia.
- Se verifica que las hipótesis hayan sido verificadas correctamente y se encuentren soportadas mediante las evidencias recolectadas (5 P's).
- Se revisa que se encuentre completo el análisis, es decir que se hayan identificado las causas raíz física, humana y latente y contenga: fotografías, diagramas y dibujos para demostrar claramente el elemento que falló.

- Exista un plan de implementación detallado, incluyendo quién está asignado a qué tareas, y las fechas objetivo o marcos de tiempo para su completamiento.
- Una vez realizada la revisión del árbol lógico, La gerencia hará las sugerencias del caso y se realizarán los ajustes y correcciones al reporte preliminar para ser presentado al grupo implementador.

3.9.4 Reporte final del RCFA. El reporte final debe incluir las siguientes secciones:

- Resumen Ejecutivo
 - Descripción del evento
 - Descripción del mecanismo
 - Revisión de las causas y recomendaciones
 - Asignación de responsabilidades y tiempos

- Informe Detallado
 - Compromisos y Factores Críticos de Éxito
 - Fotografías, diagramas y dibujos para demostrar claramente el elemento que falló.
 - Recomendaciones o elementos de acción para cada una de las causas raíz, físicas, humanas y latentes (y según sea necesario, de cualquier causa intermedia).
 - Plan de implementación detallado, incluyendo costos, responsables y las fechas objetivo o marcos de tiempo para su completamiento.
 - Firmas de cada uno de los miembros del Equipo RCFA.

- Apéndices
 - Participantes de Equipo
 - Formatos de adquisición de información (5 P's)
 - Formatos de verificación
 - Árbol lógico

3.9.5 Presentación del reporte final RCFA al grupo implementador. Una vez finalizado el Reporte Final, el Analista Principal lo presentará al grupo implementador y al personal afectado por la implementación y a otro que se requiera con el fin de enterarlos de los resultados del análisis y lograr su compromiso durante la etapa de implementación de soluciones. Esto proveerá datos de entrada que pueden afectar o cambiar aspectos específicos de las recomendaciones. El AP tomará nota de los comentarios y sugerencias claves que puedan fortalecer este proceso.

El analista principal debe comentar estos puntos claves con el equipo y el Líder Técnico para realizar los últimos ajustes y complementar el Reporte Final.

3.9.6 Presentación del reporte final RCFA A LA GERENCIA. La presentación formal del Reporte Final por lo general ayuda a obtener el compromiso de la gerencia para resolver las fallas, concentrándose en las causas raíz determinadas en la investigación.

Se puede realizar un análisis de resultados y recomendaciones con la gerencia General, cual también se puede incluir a personal de mantenimiento, operativo, administrativo y otros para permitir así el compromiso de la gerencia con la implementación.

La reunión se debe ser corta, clara y concisa. Su duración no debe ser mayor a una hora, con un período final de preguntas y repuestas. Para presentar una imagen clara de las causas raíz del problema, así como de las recomendaciones y lograr un mejor entendimiento se deben emplear fotografías, diagramas, etc., según sea necesario, (en orden de prioridad según el costo/valor).

También se deben preparar para esta reunión las acciones recomendadas y el plan de implementación con la asignación de tareas, las fechas estimadas y de ser posible y/o necesario los costos asociados.

A esta reunión debe asistir el Líder técnico y Gerente y algunos o todos los miembros del equipo analizador como soporte, ya que los miembros del equipo son los que conocen todos los detalles y pueden responder con mayor facilidad las preguntas de la gerencia.

3.9.7 Implementación de las recomendaciones del RCFA. Después de hacer la presentación del reporte final a la alta gerencia y lograr su compromiso y apoyo, se debe presentar el plan de implementación de las diferentes acciones al grupo implementador.

- Se realizará un seguimiento al desarrollo, avance y culminación de las diferentes acciones semanalmente. El Líder de Planeación será el encargado de llevar el control sobre el avance de las diferentes acciones de los análisis de falla realizados y pasará un reporte en el que se muestran los análisis de falla realizados y las acciones pendientes con su responsable, fecha de cumplimiento, % de avance y descripción.
- Cada una de las personas responsables de las diferentes acciones pendientes deben reportar su porcentaje de avance y comentarios. Al completar la implementación de una acción determinada se debe reportar el costo de esta.
- Las recomendaciones se deben implementar de manera que resulte efectivo el mejoramiento continuo. Esto implica proacción en lugar de reacción ante la próxima falla.
- El seguimiento de los resultados es por lo general el aspecto más ignorado en el proceso RCFA y es uno de los más importantes.
- Los sistemas de seguimiento se deben colocar en sitio visible e incluir puntos tales como:
 - Lista de recomendaciones que hayan sido aprobadas.
 - Lista de personas asignadas a cada punto de acción.
 - Mostrar las fechas estimadas de completamiento y su estado actual.
 - Publicar los éxitos y mostrar los ahorros netos.
- El Gerente es el encargado de asegurar que se retiren los obstáculos del camino con miras al éxito de un programa RCFA.

3.10 ANÁLISIS DEL COSTO DE FALLAS EN PIA-TELLO

En la industria del petróleo es muy difícil justificar planes sobre la base económica de la rentabilidad de la operación, capital invertido, proyectos y la pérdida de las funciones de los activos.

Pero, el costo de las fallas en la planta de inyección de agua son directamente proporcionales a las pérdidas de producción de crudo, por lo cual, se hace muy evidente y fácil de entender la justificación del trabajo cuando precisamente se trata de producción del crudo. El indicador de operación de una hora de parada por falla en las unidades está cuantificada en 2.332 barriles de agua por hora, en otras palabras, se deja de inyectar agua por las unidades con un costo de \$ 5.083 dólares, lo que equivale en barriles de aceite o crudo a 298,9 barriles netos de levantamiento por la estimulación de presión, siendo estos costos variables incidentes en la producción de crudo.

Los costos de mantenimiento y operación para la Planta de Inyección de Agua del año 2006 para la planta de inyección de agua se encuentran discriminados por los

factores de horas-hombre empleadas, repuestos y suministros de talleres externos.

Tabla 21. Costos de mantenimiento

MES	H.H/VALOR	REPUESTOS	TALLERES	TOTAL
1	7.843.568	19.679.154	2.949.629	30.472.350
2	5.949.313	46.350.256	7.433.110	59.732.679
3	16.856.386	48.968.534	5.585.541	71.410.461
4	23.698.096	31.996.067	19.101.377	74.795.540
5	22.309.923	36.095.434	13.706.280	72.111.637
6	18.938.645	108.497.933	10.174.058	137.610.637
7	25.086.269	61.878.652	12.413.734	99.378.654
8	10.807.918	25.764.923	1.447.031	38.019.872
9	12.096.936	64.355.852	7.319.605	83.772.393
10	47.495.346	145.832.436	2.261.999	195.589.781
11	23.698.096	41.397.692	7.790.816	72.886.604
12	30.738.116	68.051.936	17.665.300	116.455.351
TOTAL	245.518.611	698.868.870	107.848.480	1.052.235.960

Fuente: Planeación ECP-MASA.

El costo de inyección por barril de agua para el año 2006 resulta de dividir el volumen total inyectado por las unidades por el costo total de mantenimiento y operación.

$$\text{\$ Costo De Barril Inyectado} = \frac{\text{\$ Costos De Operación y Mantenimiento 2006}}{\text{Volumen Total Inyectado 2006}}$$

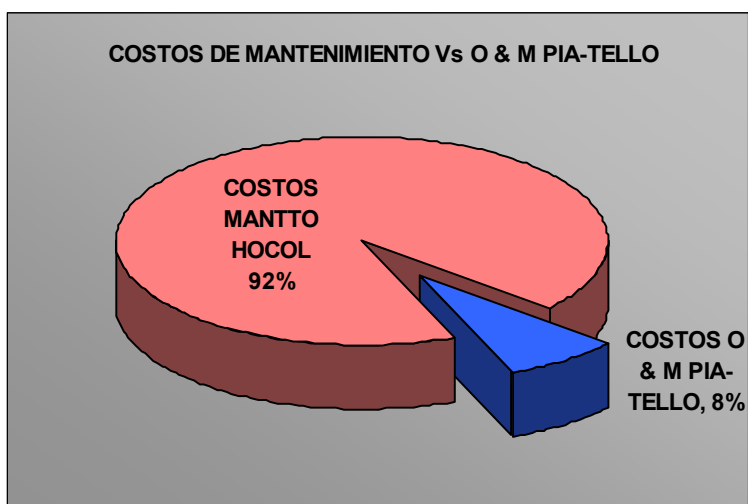
$$\text{\$ Costo barril de agua} = \frac{\text{\$ 1.052.235.960 millones}}{\text{20.075.000 millones de barriles de agua inyectados.}}$$

Costo del barril de agua para la planta de inyección en el 2006 fue de \$ 52 pesos.

El costo de toda la operación con estos tres factores de impacto en el mantenimiento para las instalaciones de Pia en el 2006 fue de \$ 10.662.032.046 pesos, en los cuales la PIA TELLO tuvo una participación del 8% en los presupuestos de gastos. Esto es muy preocupante si comparado con otras plantas de inyección, en las cuales los gastos de mantenimiento no superaron los 70 millones aproximadamente en el 2005 y el valor en costo de inyectar un barril de agua para el yacimiento fue cercano a los \$ 6 pesos.

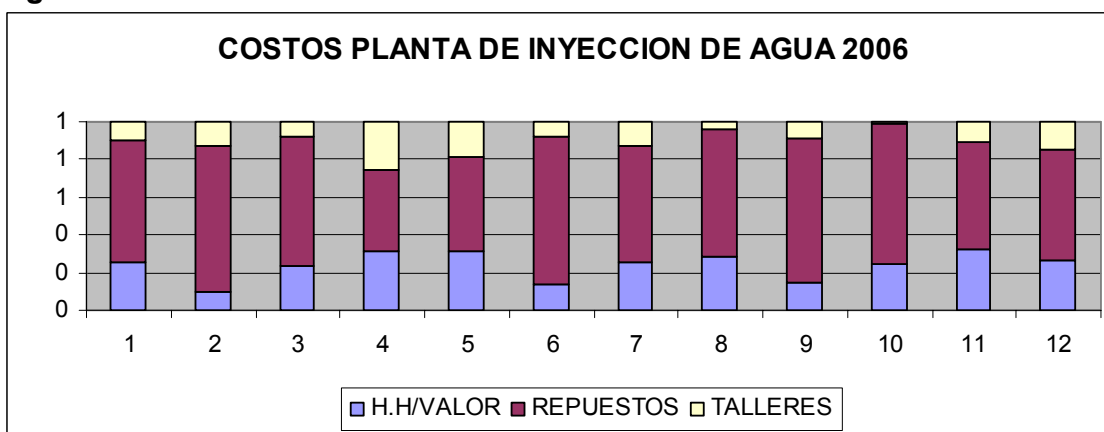
A continuación, en la figura 31 se hace una comparación de los costos de operación y mantenimiento entre los tres ítems tenidos en cuenta y su comportamiento durante el año.

Figura 31. Operación y mantenimiento para Hocol 2006



Fuente: Planeación y Logística MASA - HOCOL

Figura 32. Costos de la PIA – TELLO

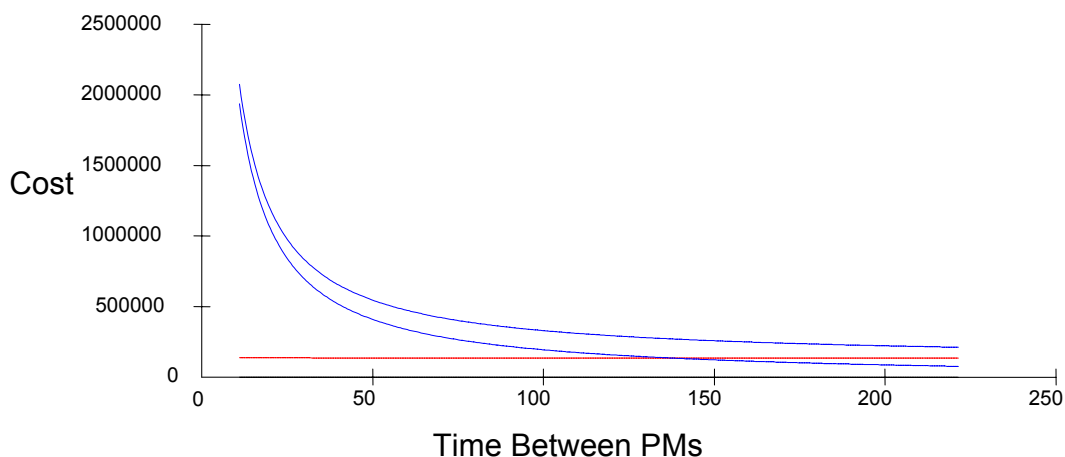


Fuente: Planeación y Logística MASA - HOCOL

3.11 CÁLCULO DE TIEMPO ÓPTIMO DE MANTENIMIENTO

El cálculo de los tiempos apropiados de mantenimientos teniendo en cuenta los costos de fallas anteriormente estudiadas por el modelo del software RELIABILITY MAINTENANCE ANALYST fue el siguiente:

Figura 33. Tiempo óptimo para mantenimiento general



F: Software Reliability Maintenance Analyst.

En la figura 33, se muestran los tiempos de mantenimiento preventivo generales para motores y bombas de las unidades, el tiempo estimado fue cada 1500 horas de operación para los motores y bombas. Este es el tiempo que se recomienda para las intervenciones de MP y mejoramiento de las condiciones para desempeñar las funciones establecidas para este proceso.

En caso de subir los tiempos de mantenimiento, se tiene en cuenta el grado de confiabilidad de las unidades y la disminución de las fallas de una forma controlada, realizando seguimiento a la verificación de los niveles y condición de los aceites según el análisis de laboratorio, porque se pueden encontrar variaciones de comportamiento y desgastes de las piezas internas del motor y de la bomba.

Se debe tener en cuenta en las recomendaciones las tareas e inspecciones específicas para hacer seguimiento a los componentes y piezas que han generado los Modos de falla y así mismo generar actividades de mejoramiento en la operabilidad del equipo o componente.

4. RECOMENDACIONES PARA EL GERENCIAMIENTO DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO

4.1 SISTEMA DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD

El problema que se analiza en este proceso RCM, debe tratarse en el contexto de un sistema total, sobre una base integral y en términos de las pérdidas de las funciones. Además, el mantenimiento basado en confiabilidad RCM, prioriza esa condición sin descuidar y establecer la estructura organizacional que se adopte para la operación, procedimientos, procesos, indicadores y recursos que permitan cumplir de manera permanente la normatividad de calidad, seguridad, salud y medio ambiente.

El desarrollo del mantenimiento, contempla las siguientes fases:

- Mantenimiento predictivo/ preventivo aumentarlo a 25%
- Mantenimiento planificado sostenerlo por encima de 50%
- Mantenimiento correctivo disminuirlo hasta un 15%
- Mantenimiento de diseño con proyectos en un 10%.

Bajo el esquema de mantenimiento, se hace necesario asegurar la calidad de las reparaciones y fabricaciones que se llevan a cabo.

Cambios de la filosofía de mantenimiento y recomendaciones: La implementación de sistemas de gestión integral en el mantenimiento, parte de la premisa que lo más importante es el talento humano para el logro de organizaciones competitivas y productivas. Por lo cual, se requiere iniciar procesos de sensibilización del personal del mantenimiento hacia actitudes positivas y de mejoramiento continuo.

Por eso, se recomiendan las siguientes estrategias o pasos para conseguir tal efecto:

- Cliente como foco de todos los esfuerzos
- Identificar y desarrollar procesos que incidan directamente en la ampliación de los tiempos de mantenimiento para los equipos
- Formar personal proactivo y dispuesto al 110%
- Aplicar las herramientas del RCM para el mejoramiento continuo.
- Adoptar y desarrollar nuevas tecnologías predictivas
- Crear conciencia de alta calidad en la ejecución de los trabajos en el personal técnico.
- Sensibilizar al personal, para la implementación eficaz y Gerenciamiento del sistema RCM
- Establecer un enfoque de trabajo en Equipo.
- Salvaguardar el Know How, de las actividades del mantenimiento para facilitar su transferencia, difusión y aplicación, en cada disciplina y frentes de

proyectos. (documentar todos los casos de fallas, resaltar los comportamientos especiales de las unidades y mejoras)

4.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN KPIS

Los indicadores de gestión sintetizan muchas actividades individuales o en conjunto. Es esencial reflejar los resultados de las actividades de monitoreo de los resultados obtenidos por el estudio de confiabilidad y mostrar como esta metodología ayuda a mejorar el rendimiento de la organización. Basados en las políticas en las políticas generales de las organizaciones que participan en este proceso se establecen indicadores para evaluar y supervisar, durante un periodo determinado, asegurando que el programa contribuya a los rendimientos de los proceso.

En la tabla 22, se plantean indicadores de gestión, para garantizar que las acciones y decisiones correspondan a los objetivos de mantenimiento, proporcionar una rápida visión de conjunto integral, verificar el cumplimiento de los objetivos planificados, ayudar a la toma de decisiones de acción y replanteamiento, utilización eficiente de recursos, encaminar los esfuerzos en forma coherente en dirección a los objetivos de la organización, optimizar los sistemas de comunicación. Coordinar eficientemente las tareas y procedimientos, promover el estilo de dirección participativo.

Tabla 22. Indicadores de gestión

INDICADOR	FÓRMULA	OBJETIVO	INTERVALO	OBSERVACIONES
Disponibilidad	$\frac{\text{Tiempo de operación} - \text{Tiempo perdidos y tiempos bajos}}{\text{Tiempo de operación}} \times 100$	90% o más	Semestral	
Frecuencia de fallos.	$\frac{\text{Número total de paradas debidas a fallos}}{\text{tiempo de carga}}$	Minimizar	Mensual	Referido a las paradas de 10 minutos o más
Costos de paradas debidas a fallos	Tiempos de paradas x costos por unidad de tiempo	Minimizar	Mensual	Incluido la producción perdida, costos de energía y costos de horas perdidas de personal
MTBF	$\frac{\text{Tiempo total de operaciones}}{\text{tiempo de carga}}$	De acuerdo con metas anuales	Mensual	Intervalo medio entre fallos
MTTR	$\frac{\text{Tiempo total de parada}}{\text{Número de paradas}}$	De acuerdo con metas anuales	Mensual	Tiempo medio de reparaciones
Tasa de costos de mantenimiento	$\frac{\text{Costo Total del mantenimiento}}{\text{Costos totales de producción}} \times 100$	De acuerdo con metas anuales	Semestral	Indica la proporción de los costos de mantenimiento sobre el costo total

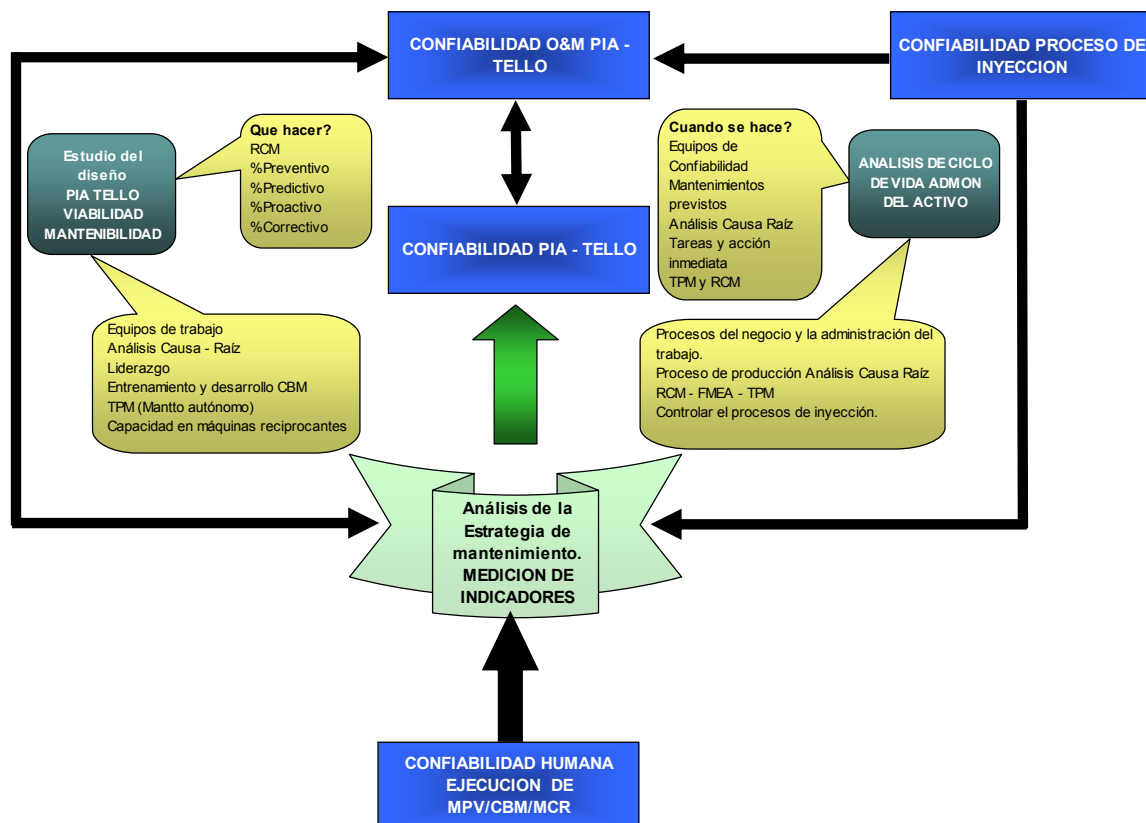
Fuente: Juan Francisco Morales, Estado de implementación TPM Chile

4.3 METODOLOGÍA

- Diagnóstico
- Planificación
- Formación

- Implementación
 - Auditoría y mejoramiento.
- **Diagnóstico del mantenimiento.** Del proceso o servicio a través de observaciones y mediciones que se comparan con el Modelo, para definir las fortalezas y debilidades. En esta etapa, se resuelve el QUE se debe hacer, POR QUE hacerlo y DONDE hacerlo. Tomando como base los históricos de los equipos y su trazabilidad.
- **Planificación.** En esta etapa se indican las acciones correctivas para reestructurar los procesos, o sea que se recomiendan CUALES recursos hay, COMO hacer los cambios, QUIEN debe hacerlos, CUANDO hacerlos y CUANTO vale hacerlos.
- **Formación.** Se sensibiliza y capacita al personal de la empresa sobre los cambios que se van a llevar a cabo, para que participen con entusiasmo y conocimiento de causa en la reestructuración.

Figura 34. Estrategia para el Gerenciamiento del Proceso RCM



Fuente: Arenas / Delgado

- **Implementación.** Es el desarrollo y ejecución de los cambios, por medio de la gestión de proyectos que a su vez se pone a operar y se realiza mantenimiento al sistema.
- **Auditoria y control.** Es la revisión del plan a desarrollar de la gestión reestructurada de la organización. En esta etapa se hacen las recomendaciones de mejoramiento y cumplimiento del plan propuesto.
- **Mejoramiento.** Se Establecen planes de entrenamiento y capacitaciones al personal técnico y administrativo direccionadas al mejoramiento continuo del proceso planeado y flexible a las necesidades que requiera el proceso.

4.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA

Presentamos lo que se lleva implantado en un 100%, gracias a la información generada en el transcurso del proyecto en la siguiente tabla donde observamos las frecuencias de las rutinas de mantenimiento nuevas y que están dando resultado en la planta inyección. Para la realización de actividades, se diseñaron unos formatos que facilitan el seguimiento de las tareas y actividades programadas. (Ver anexo C)

Tabla 23. Optimización de Rutinas Propuestas

MANTENIMIENTO	DESCRIPCION TAREA	FRECUENCIA		RESPONSABLE
		ANTES	DESPUES	
PACKING	Inspeccion de Fugas	A Falla	Diaria	Tecnico Especialista
	Cambio por Condicion MPV	A Falla o 45 dias	45 dias	Tecnico Especialista
PLUNGERS	Inspeccion de Componente CBM	1800 Hrs	Semanal	Tecnico Especialista
	Revision y Cambio MPV/MCR	1800 Hrs	1500 Hrs	Tecnico Especialista
VALVULA SUCCION/ DESCARGA	Revision de Valvulas	1800 Hrs	1500 Hrs	Tecnico Especialista
	Inspeccion con Boroscopio CBM	1800 Hrs	1500 Hrs	Tecnico Especialista
INSTRUMENTACION	Inspeccion de Medidores y Sensores	1800 Hrs	Diaria	Tecnico Especialista
	Revision y Cambio MPV/MCR	1800 Hrs	6 meses	Tecnico Especialista
POWER END FLUID END	Mantenimiento Preventivo por Condicion	6 meses	2 meses	Tecnico Especialista

Fuente: Arenas /Delgado

Implementación de la estrategia de un técnico o Especialista en sitio como (operador y mantenedor de PIA)

Funciones:

- Atención inmediata a correctivos menores.
- Mayor seguimiento y atención temprana a equipos.
- Conseguir mayor disponibilidad en el trabajo de hora / maquina.
- Mejor ejecución y coordinación de operaciones, según la necesidad de producción.
- Conseguir volúmenes de inyección sostenibles.

Ventajas:

- Recolección de mayor información del proceso y del desempeño maquina.

- Mantenimientos mejor dirrecionados a equipos y componentes críticos.
- Aumento del tiempo entre fallas.
- Optimizar los tiempos de respuesta del especialista

4.5 MEDICIÓN DE RESULTADOS DE ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS

- Se hacen las siguientes observaciones midiendo el progreso con el control y cumplimiento de inyección de agua por encima de 55.000 barriles de agua, partiendo de 52.500 bbl/d promedio.
- Crecimiento en un 7% en confiabilidad, mayor control operativo, mejor conocimiento del proceso en todo el conjunto de las facilidades de inyección.

Disminución de los llamados a falla, antes del estudio se presentaban cinco fallas por semana que generaban sobre tiempos y costos altos de mantenimiento, ahora el promedio es de uno por llamado a falla en una semana por mayor control del proceso.

Aumento de disponibilidad en 6%, con el cumplimiento de 96 horas por maquinas en operación conjunta de 5 unidades y 1 en stand by.

Implementación de 5 rutinas nuevas de mantenimiento preventivo y acciones de inspección diaria por Técnico operador mantenedor de la planta.

Mantenimiento y reparaciones menores solo bajo necesidades de operación.

Disminución de perdidas por producción atribuible a la PIA TELLO, por no decir cero.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo al resultado obtenido de la aplicación del análisis de confiabilidad en los equipos funcionales y sistemas de la planta de inyección de agua se definen las siguientes conclusiones:

- Se diagnostica e identifica los componentes de los sistemas que fallan en mayor proporción en los equipos funcionales de la planta.
- Se establece un grupo interdisciplinario para el mejoramiento, seguimiento y análisis de las fallas que ocurren en la planta.
- Se determina la confiabilidad de los equipos mayores, basada en el análisis de la trazabilidad de fallas de los equipos funcionales.
- Se replantea las tareas de mantenimiento preventivo de los equipos funcionales y sistemas de la planta.
- Se Focaliza las Tareas de mantenimiento preventivo en los componentes críticos para el seguimiento puntual de los modos de falla.
- Se establecen los indicadores de gestión bajo el modelo del proceso RCM para el seguimiento y toma de decisiones para la operación y mantenimiento de la planta.
- Se establecen formatos para diligenciar las diferentes inspecciones y tareas expuestas en el plan de mantenimiento preventivo.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS DE CONSULTA

AMENDOLA, José. PROCESOS DE MANUFACTURA. PUBLICACIONES UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA. Valencia. Cuarta edición. Febrero, 2003.

BLANCHARS, Benjamín. INGENIERÍA LOGÍSTICA. Publicaciones de ingeniería IESDEFE. Madrid, Segunda edición. 2000.

GARCIA PALENCIA, Oliverio. ADMINISTRACION DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL. UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA. Duitama Primera edición. 2001.

----- . GERENCIA DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL. UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA. Duitama. Primera edición. 2001.

KNESEVIC, Jezdemir. MANTENIMIENTO. Publicaciones de ingeniería IESDEFE. Madrid, Quinta edición. 2000.

NACHLAS, Joel. FIABILIDAD. Publicaciones de ingeniería IESDEFE. Madrid, Cuarta edición. España. 2000.

TABARES, Lourival agosto. ADMINISTRACION MODERNA DEL MANTENIMIENTO. (En Línea) (citado en septiembre del 2003) disponible en www.mantenimientomundial.com.

ARTÍCULOS DE CONSULTA

BARRINGER, Paul. AVEALABILITY, RELIABILITY, MANTANABILITY AND CAPABILITY. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.barringer1.com.

----- . HOW TO USE RELIABILITY ENGINEERING PRINCIPLES FOR BUSSINES ISSUES. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.barringer1.com.

----- . PIPE WALL THICKENESS DECISIONS USING WEIBULL ANALISYS. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.barringer1.com.

----- . PROCESS RELIABILITY AND SIX SIGMA. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.barringer1.com.

----- . RELIABILITY ISSUES FROM A MANAGEMENT PERPECTIVE. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.barringer1.com.

----- . RELIABILITY OF CRITICAL TURBO/COMPRESOR EQUIPMENTS. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.barringer1.com.

----- . WHERE IS MY DATA FOR MARKING RELIABILITY IMPROVENMTS? (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.barringer1.com.

----- . WHY YOU NEED PRACTICAL RELIABILITY DETAILS TO DEFINE LIFE CICLYE COSTS FOR YOURS PRODUCTS AND COMPELITORS. (En Línea) (Citado en octubre del 2003) disponible en www.barringer1.com.

DWHITD DAKAWAY. WEIBULL ANALISYS FOR PRODUCTIONS DATA, HIDROCARBON PROCESSING MAGAZINE, OCTOBER 2001. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.hidrocarbonprocessing.com.

ELLIS, Richard. A METRIC FOCUSING RELIABILITY EFFORTS. SEVENT INTERNATIONAL CONFERENCE THE PROCESS PLANT RELIABILITY. HOUSTON, Texas. OCTOBER 22 -23, 2002. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.diagnostic-engineer.com.

MITCHEL, John. MODIAN, Nathaly. OPERATING EQUIPMENTS ASSET MANGMENT CENTURY COMPETITIVE NECESSITY. ((En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.dliengineering.com.

MONROOE, Tood. HOW TO JUSTIFY MACHENERY IMPROVENMENTS USING RELIABILITY ENGINEERING. PUMP SYMPOSIUM SPONSORED BY TEXAS A & M. HOUSTON, Texas. MARCH 1 – 4. 1999. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.hsb_tecnologies.com.

MURILLO, William. Confiabilidad y análisis estadístico para la predicción de fallas, seguridad, supervivencia, riesgo, costo y garantías de los equipos.. RCM INGENIERIA. (En Línea) (citado en agosto del 2003) Disponible en www.rcmingenieria.emcali.net.co

SANTAMARIA, Aleck. Análisis del costo de disponibilidad y del costo de confiabilidad para la evaluación y optimización de facilidades de superficie en sistemas de producción de petróleo. (En Línea) (citado en Agosto del 2003) diponible en www.clubdemantenimiento.com.ar

WOODHOUSE, Ivan. KMENIL COMPRESOR PERFORMANCE REVIEW AND RELIABILITY STYRATEGY. FORTIES PIPELINE MHI. (En Línea) Citado en octubre del 2003) disponible en www.pipelinemhi.com.

PÁGINAS WEB DE CONSULTA EN INTERNET.

www.mantenimientomundial.com.
www.datastream.net
www.maintenance.news.com
www.pmoptimization.com
www.mesa.org.com
www.mtonline.com
www.aladon.com.uk.
www.lice.com
www.by_cidley.com
www.dliengineering.com
www.arms_reliability.com
www.reliabilitydirect.com
www.csi.newsletters.archives.com
www.centerfortpm.com.uk.
www.tpmonline.com
www.reliabilityradio.com
www.diagnosticsengineers.org.uk
www.asq.org
www.smrp.org
www.reliasoft.com
www.reliabilityweb.com
www.reliabilityanalysiscenter.com
www.maintenancebenchmarking.com
www.barringer1.com
www.simainbenchmark.com
www.weibullnews.com
www.wsw.com
www.weibull.com
www.orbitnewsletterarchives.com
www.pride-in-maintenance.com