

**MODELO ESTRATEGICO DE IMPLEMENTACION DE RCM EN FILTROS DE
INYECCION DE AGUA DE SERVICIOS PETROLEROS**

CARLOS EDUARDO HERNANDEZ MOSQUERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2009**

**MODELO ESTRATEGICO DE IMPLEMENTACION DE RCM EN FILTROS DE
INYECCION DE AGUA DE SERVICIOS PETROLEROS**

CARLOS EDUARDO HERNANDEZ MOSQUERA

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
2009**

Nota de Aceptación:

Jurado: Carlos Borrás Pinilla

Jurado: Jabid Quiroga Méndez

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	1
1 CAMPO SAN FRANCISCO Y SU ENTORNO	3
1.1 LOCALIZACIÓN.....	3
1.2 RESEÑA HISTÓRICA.....	4
1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL.....	5
1.4 MANTENIMIENTO ACTUAL	6
1.5 EQUIPOS CAMPO SAN FRANCISCO PLANTA INYECCION DE AGUA..	8
1.6 DIAGNÓSTICO DEL MANTENIMIENTO ACTUAL.....	9
1.6.1 Valoración de la información de mantenimiento del sistema de información de MASA (Datastream7i).....	9
1.6.2 Recolección de información de procesos y mantenimiento.....	9
1.6.3 Evaluación de los costos asociados a mantenimiento y reestablecimiento	10
1.6.4 Evaluación de las fallas por mantenimiento y reestablecimiento.....	10
1.6.5 Identificación de malos actores.	10
1.6.6 Definición de la criticidad.....	11
1.6.7 Definición de targets de mejoramiento.	12

1.6.8	Delimitación del estudio RCM a realizar.....	12
1.6.9	Diseño RCM	12
1.6.10	Definición del alcance RCM.	12
1.6.11	Recolección de información.	13
1.6.12	Categoría de datos.	13
1.6.13	Formato de los datos.....	14
1.6.14	Estructura lógica de la base de datos.....	14
1.6.15	Estructura jerárquica de la base de datos.	14
1.6.16	Proceso de recolección de los datos.....	15
1.6.17	Fronteras de equipo.	16
1.7	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.8	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.9	OBJETIVOS DEL PROYECTO	18
2	ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD	20
2.1	RCM PROCESO Y METODOLOGÍA	20
2.1.1	Planear.....	21
2.1.2	Hacer.....	22
2.1.3	Verificar.	22
2.1.4	Ajustar o Actuar.	22

2.1.5	Equipo de trabajo.....	24
2.1.6	Facilitador.....	25
2.1.7	Supervisores de O&M.....	25
2.1.8	Gerente de contrato HOCOL.....	26
2.1.9	Gerente de contrato MASA	26
2.1.10	Equipo de planeación.....	27
2.1.11	Soporte HSE	27
2.1.12	Grupo de ingeniería y confiabilidad	27
2.2	PASOS PARA ANALISIS DEL RCM.....	28
2.3	CARACTERIZACIÓN DE PLANTAS, EQUIPOS Y COMPONENTES ...	30
2.4	ANÁLISIS FUNCIONAL	33
2.5	DIAGRAMA DE ENTRADA FUNCIONES SALIDA.....	33
2.6	ANÁLISIS DE MODO DE FALLA, EFECTOS Y CRITICIDAD (FMECA)	36
2.6.1	Definición de fallas funcionales.	38
2.6.2	Efecto de las fallas.	38
2.6.3	Definición de rutinas de mantenimiento dentro del RCM	38
2.6.4	Definición de tareas de mantenimiento	40
2.6.5	Tareas de servicio	40
2.6.6	Tareas de lubricación.....	41

2.6.7	Prevención de corrosión.....	41
2.6.8	Tareas a condición	41
2.6.9	Costos.....	43
2.6.10	Solicitud de ejecución de “Root Caused Analysis” - RCA (ANALISIS CAUSA RAIZ)	44
2.7	IMPLEMENTACIÓN DEL RCM.	45
2.7.1	Conversión de reportes RCM a formato CMMS.....	45
2.7.2	Ejecución pruebas de migración al CMMS.	46
2.7.3	Actualización del plan de mantenimiento en el CMMS.....	46
2.7.4	Verificación de integridad del programa.....	46
2.8	SEGUIMIENTO EFECTIVIDAD DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO.	46
2.8.1	Cálculo de indicadores del proceso RCM	47
2.8.2	Análisis de indicadores de proceso RCM.	47
2.8.3	Generación y divulgación de lecciones aprendidas.	47
2.8.4	Definición de recomendaciones de mejoramiento de RCM	48
3	DESARROLLO DEL MODELO DE GESTIÓN	49
3.1	EVALUACIÓN PRELIMINAR DE CONDICIONES.....	49
3.2	ANÁLISIS DE CRITICIDAD	52
3.3	CREACIÓN DEL EQUIPO RCM.....	56

3.4	ANÁLISIS FUNCIONAL PLANTA DE INYECCION AGUA.	57
4	RECOMENDACIONES PARA MODELO ESTRATEGICO DE IMPLEMENTACION DE RCM.....	95
4.1	DEFINICIÓN DE FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO.....	95
4.2	DESARROLLO DE INDICADORES DE RCM.	95
4.2.1	Generación de reportes de la estrategia de mantenimiento.	96
4.2.2	Aprobación de la estrategia de mantenimiento.	96
4.2.3	Diseño del plan de mantenimiento.....	97
4.2.4	Mantenible y fácil de monitorear	97
4.2.5	Revisión de la tecnología.	97
4.2.6	Diseño de procesos logísticos	98
4.2.7	Documentación de la estrategia de mantenimiento.	98
4.3	SEGUIMIENTO EFECTIVIDAD DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO.....	99
4.3.1	Cálculo de indicadores del proceso RCM	99
4.3.2	Análisis de indicadores de proceso RCM.	100
4.3.3	Generación y divulgación de lecciones aprendidas.	100
4.3.4	Definición de recomendaciones de mejoramiento de RCM	100
4.4	IMPLEMENTACIÓN DEL RCM.	100
4.4.1	Ejecución pruebas de migración al CMMS.	100

4.4.2	Actualización del plan de mantenimiento en el CMMS.....	101
4.4.3	Verificación de integridad del programa.....	101
5	CONCLUSIONES.....	102
	BIBLIOGRAFÍA	103
	ANEXOS	105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Evaluación de Mantenimiento	9
Tabla 2. Jerarquía Taxonómica de planta	29
Tabla 3. Elementos del diagrama EPS	34
Tabla 4. Costos asociados a la operación	44
Tabla 5. Evaluación para los filtros	50
Tabla 6. Cuantificación Probabilidad de Falla	52
Tabla 7. Efectos de las Fallas	53
Tabla 8. Frecuencia de Falla	54
Tabla 9. Probabilidad de falla	54
Tabla 10. Criticidad del sistema	55
Tabla 11. Costos de mantenimiento	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación Geográfica campo San Francisco	3
Figura 2. Estructura de mantenimiento	5
Figura 3. Distribución planta	8
Figura 4. Esquema para el diagnostico del mantenimiento	11
Figura 5. Matriz de criticidad	11
Figura 6. Estructura lógica para la información de la base de datos	14
Figura 7. Fuentes de información del RIM	15
Figura 8. Ejemplo de un diagrama de frontera de un equipo (bomba)	16
Figura 9. Esquema de mejoramiento continuo del RCM	21
Figura 10. Diagrama de flujo del RCM	23
Figura 11. Esquema del grupo RCM para su implementación.	25
Figura 12. Matriz de criticidad de equipos	29
Figura 13. Taxonomía aplicada a la jerarquización de activos	31
Figura 14. Diagrama EPS para determinar la funcionalidad de un sistema	34
Figura 15. Diagrama de flujo de la toma de decisiones en la estructura de mantenimiento del RCM	40
Figura 16. Curva PF para la determinación del intervalo de tareas a condición	42
Figura 17. Confiabilidad y disponibilidad PIA Monal	55
Figura 18. Estación Booster	58
Figura 19. Sistema de suministro de agua externa	58

Figura 20. Bombeo de Agua de producción hacia la Planta de inyección de agua	59
Figura 21. Sistema de Inyección de Químicos	60
Figura 22. Tanques Desnatadores	64
Figura 23. Sistema Interno Tanques Desnatadores 301 y 302	65
Figura 24. Sistema Interno Tanque Desnatador 501	65
Figura 25. Salida Agua y Crudo de los tanques desnatadores	66
Figura 26. Transferencia de crudo PIA – Batería Monal.	66
Figura 27. Transferencia de crudo PIA – Batería Monal	67
Figura 28. Tanque de Filtros.	68
Figura 29. Filtros Degremont (Antracita)	69
Figura 30. Filtros Baker (Antracita)	69
Figura 31. Filtros Serk Baker Cáscara de Nuez	69
Figura 32. Bombas de Filtración	70
Figura 33. Trenes de Filtración	71
Figura 34. Esquema filtro Degremont (Filtro No. 1)	71
Figura 35. Esquema Filtro Baker con antracita (Filtro No. 5)	72
Figura 36. Esquema Filtro Baker con cáscara de nuez (Filtro 11	72
Figura 37. Bombas de Filtración.	73
Figura 38. Bombas de retrolavado BR-301 y BR-302. filtros F1 al F8.	74

Figura 39. Bombas de retrolavado para Filtros con Antracita (F1 a F8).	74
Figura 40. Bombas de retrolavado para Filtros con cáscara de Nuez (F9, F11, F12 y F13).	75
Figura 41. Decantadores.	80
Figura 42. Decantadores 2, 3 y 4	82
Figura 43. Lechos de secado.	83
Figura 44. Sistema de bombeo fluido decantadores a Lechos de secado.	85
Figura 45. Tanques de Inyección.	85
Figura 46. Bombas de inyección.	86
Figura 47. Tanques y Bombas de Inyección de agua.	87
Figura 48. Transformador de 2500 KVA PIA 1.	88
Figura 49. Transformador de 5-6.25 MVA PIA 2.	88
Figura 50. Transformador 225 KVA, 13200/460 VAC PIA 1	89
Figura 51. Transformador 225 KVA, 13200/460 VAC PIA 2.	90
Figura 52. Diagrama red de control PIA Monal	91
Figura 53. Chasis Local con CPU.	91
Figura 54. Operación y mantenimiento para Hocol 2008	93
Figura 55. Costos de Operación y mantenimiento para Hocol 2008	93
Figura 56. Costos de la PIA Monal	94

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Fundamentos del RCM

RESUMÉN

TÍTULO: MODELO ESTRATEGICO DE IMPLEMENTACION DE RCM EN FILTROS DE INYECCION DE AGUA DE SERVICIOS PETROLEROS*

AUTOR: CARLOS EDUARDO HERNANDEZ**

PALABRAS CLAVES: RCM, FMECA, Confiabilidad, mantenimiento.

En general el proyecto presentado se enfoca en el estudio basado en confiabilidad de los equipos funcionales de los filtros de inyección de agua campo San Francisco, 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 lo más relevante 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 los filtros de inyección de agua mediante su aplicación y seguimiento por los indicadores propuestos, generando garantía en el momento de tomar decisiones trascendentales de tipo gerencial encaminadas a la mejora continua.

* Monografía

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

SUMMARY

TITLE: STRATEGIC MODEL OF IMPLEMENTATION OF RCM IN
INJECTION WATER FILTERS FOR PETROLEUM SERVICES*

AUTHOR: CARLOS EDUARDO HERNANDEZ**

KEY WORDS: RCM, FMECA, Reliability, Maintenance

In general, the project focuses on the study based on reliability of equipment functional filters water injection San Francisco area, on a preliminary assessment of the maintainability of the equipment to analyze, forming a multidisciplinary team responsible for gathering data, analysis and monitoring of strategies put.

An analysis of the functional team, establishing the functions, parameters and boundaries of the functional team, based on historical failure, which analyzes the most relevant in the operational components, and faults that have generated in its functionality. Therefore, it is determined by the method of analysis based on reliability studies, based on the RCM, and several of its tools and FMECA RCFA which discriminates step by step items to be developed to determine the diagnosis of faults which are presented in each functional unit, and his status is determined through analysis of the Weibull distribution which shows the area in which the component or equipment.

Equally, one raises the alternatives to taking, to improve the strategy of maintenance applied, and like that, to improve the reliability of the functional equipments (teams) in the filters of water injection by means of his your application and follow-up for the proposed indicators, generating guarantee in the moment to take transcendental decisions of managerial type directed to the constant improvement.

* Monograph

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

INTRODUCCIÓN

El campo petrolero San Francisco de Hocol ubicada en el departamento del Huila a 34 Km de la ciudad de Neiva, perteneciente al municipio de Palermo (ver figura 1); está dentro de un programa de mejoramiento productivo que involucra sostener la producción mediante un análisis riguroso donde la inyección de agua juega el 100 % de éxito para el proceso de sostenibilidad de la productividad.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM Reliability Centered Maintenance) es un proceso sistemático y analítico usado para determinar los requerimientos de mantenimiento de funcionalidad de una planta o sistema e identificar las acciones necesarias para garantizar y asegurar la seguridad y la operación costo efectiva de un sistema.

Se podrá observar en este estudio la recomendación sobre el proceso de mantenimiento de las instalaciones productivas y su respectivo Gerenciamiento.

Por lo que se hace exigencia del personal que labora en este campo contar con un nivel de competencia adecuado a las metas y objetivo trazados con una cultura de el lenguaje diario de este campo petrolero donde se hable de mantenibilidad, confiabilidad, disponibilidad, productividad, optimización, mejoramiento continuo, medio ambiente, indicadores económicos, programas de producción, mantenimiento proactivo, clientes y proveedores, estandarización, certificación de procesos, y estar dentro de los márgenes de "Clase Mundial" operando bajo el contexto de la excelencia.

Hocol S.A., al ser una Sociedad Económica Mixta, de carácter comercial organizada bajo la forma de Sociedad Anónima del orden Multinacional 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 Hocol, 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 eficiente.

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

mantenimientos 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 los filtros 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.

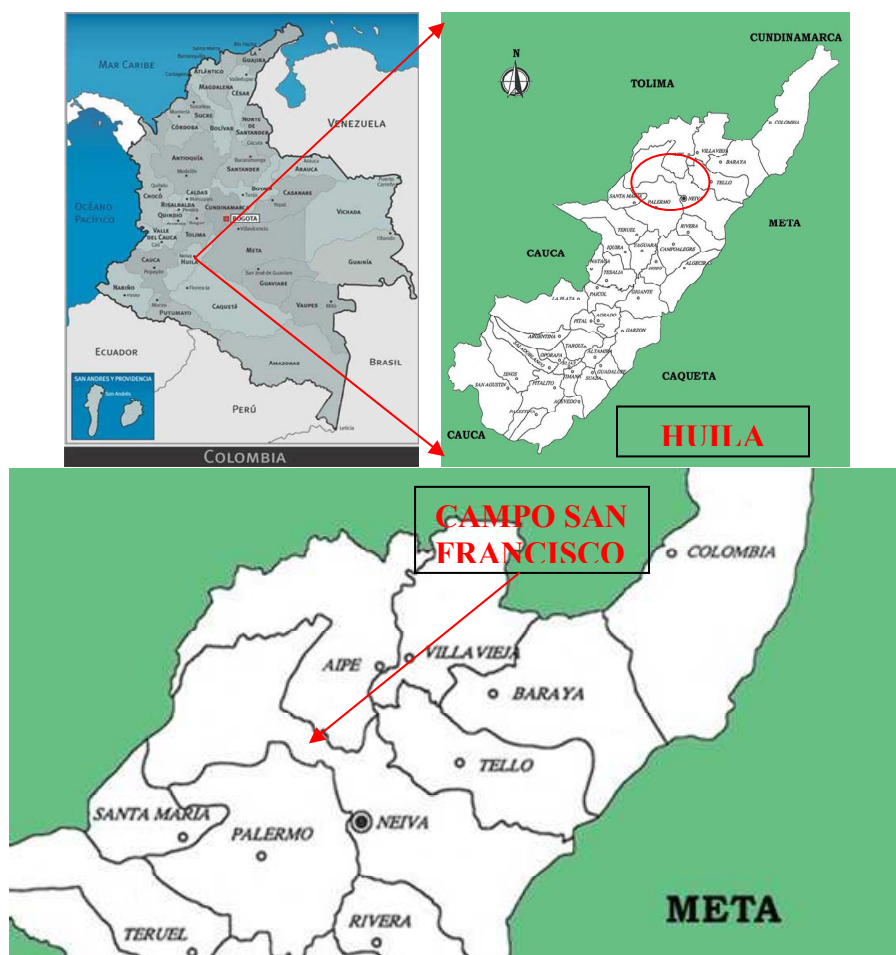
Es por lo tanto, que a partir del modelo de gestión de mantenimiento se ha elaborado un análisis de la situación operacional actual y un esquema que asegure la ejecución de los programas de mantenimiento en estas unidades de proceso, y un seguimiento de forma gerencial para medirlos mediante Kpis (Key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

1 CAMPO SAN FRANCISCO Y SU ENTORNO

1.1 LOCALIZACIÓN

Campo San Francisco está ubicado en el municipio de Neiva en medio del valle del río Bache y la cordillera oriental, en las inmediaciones Noroccidentales de la ciudad de Neiva, capital del Departamento del Huila y tiene una extensión de aproximadamente 25 Km² (62.500 Ha), abarcando terrenos del Municipio de Neiva, Palermo, Aipe y el corregimiento de San Francisco, Peñas Blancas, y El Triunfo.

Figura 1. Ubicación Geográfica campo San Francisco



Fuente: Archivos Hocol S.A

1.2 RESEÑA HISTÓRICA

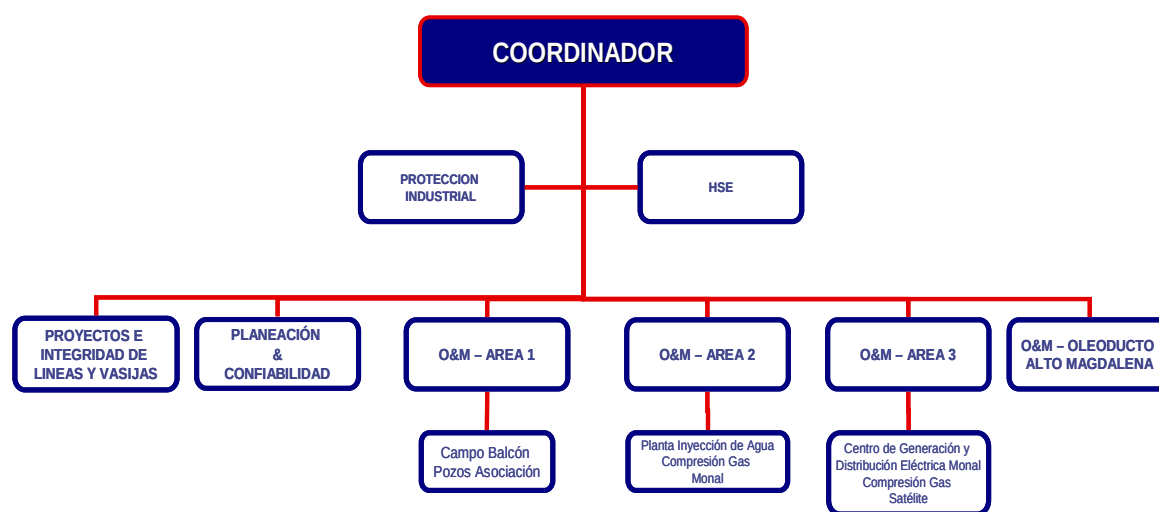
Durante las actividades de la explotación y producción petrolera iniciaron bajo la tendencia de concesión y asociación en el departamento de Huila, el Campo San Francisco fue descubierto en el año de 1978, fecha en que el Ministerio de Minas y Energía firman el contrato otorgado a HOCOL S.A. con un área total de 62.500 Ha, la cual el área de concesión es asumida por HOCOL S.A. hasta el día 13 de Febrero de 2011, donde revierte a la Agencia Nacional de Hidrocarburos y comienza a ser operada por ECOPETROL S.A.

El descubrimiento del campo data del año 1976 cuando la compañía Petróleos Colombo Brasileños (COLBRAS) perforó el pozo exploratorio Sfco-1, en el cual se probaron las formaciones areniscas de los pozos San Francisco con una tasa de producción de 990 BPD. 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 36.000 barriles de petróleo por día en el año de 1985, con el fin de reducir la declinación de la presión en los yacimientos se genera el proyecto de inyección de agua a la formación del yacimiento para generar un barrido y poder mantener e incrementar la producción diaria, el proyecto de inyección agua pasa a ser un proceso fundamental en la producción de crudo del campo San Francisco.

1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

Figura 2. Estructura de mantenimiento



Fuente: Organigrama operativo 2008 Mecánicos Asociados S.A.

1.4 MANTENIMIENTO ACTUAL

A través del estudio y la evaluación del programa de mantenimiento implementado actualmente, en el campo San Francisco y Balcón de la asociación Palermo de Hocol S.A., se pretende conocer el estado del sistema de inyección de agua de la empresa y reconocer los costos y oportunidades de mejoramiento a través de la metodología RCM. Este proceso de diagnóstico facilitara la labor de verificar el cumplimiento de las metas y objetivos propuestos dentro del plan de implementación del RCM en campo San Francisco y constituirá un punto de arranque y obtención de información de mantenimiento, para constituir la base de datos iniciales de procesos de mantenimiento.

El propósito principal de la estrategia de mantenimiento actual es obtener la mayor disponibilidad operacional efectiva de los equipos críticos, con la menor intervención posible, cumpliendo con los estándares de seguridad, ambientales, dentro del marco de responsabilidad social, al menor costo durante el ciclo de vida del activo.

- Desarrollo de las competencias
- Integridad de las personas.
- Integridad de los equipos.
- Máxima disponibilidad de los equipos.
- Reducción perdidas por diferidas
- 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:

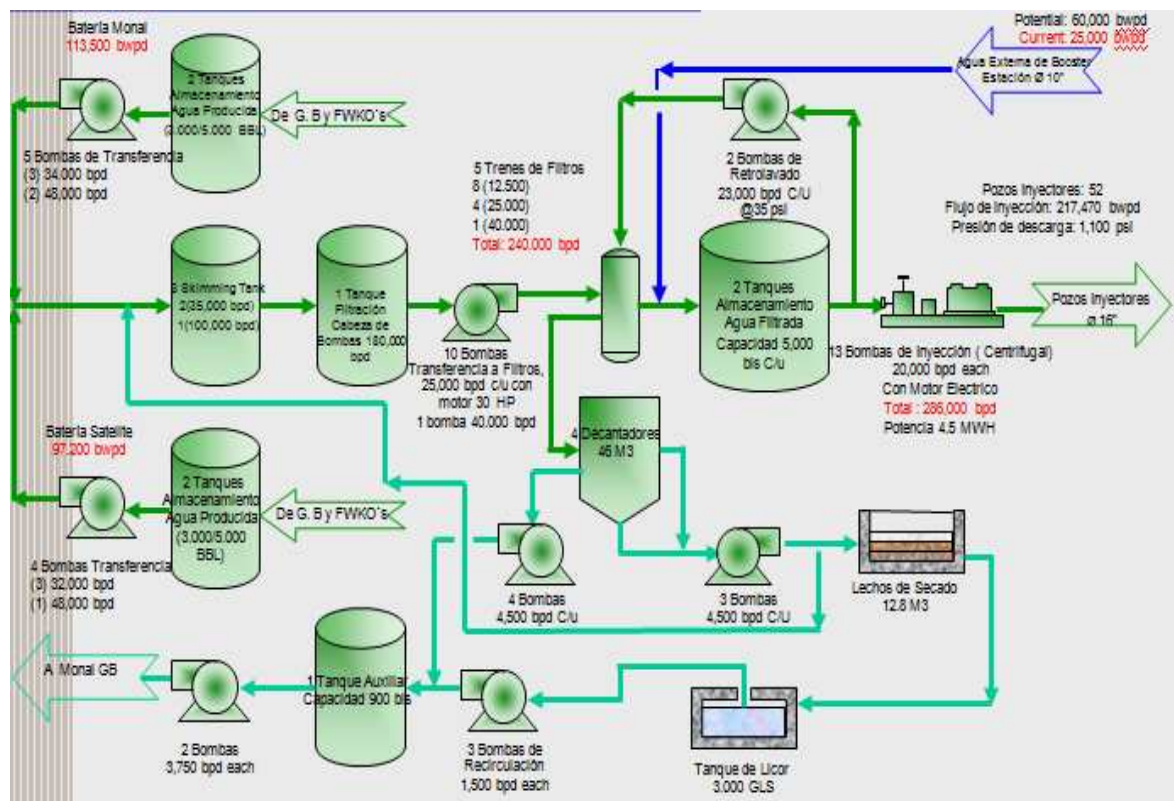
- Jerarquía de equipos.
- Impacto en la integridad de la planta
- Importancia del equipo dentro del proceso productivo.
- Recomendación del fabricante
- Manejo de garantías.
- Relación costo / beneficio.
- Experiencia operacional (Historial).
- Análisis del mantenimiento.

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 órdenes 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
- Revisión 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 SAN FRANCISCO PLANTA INYECCION DE AGUA.

Figura 3. Distribución planta



Fuente: Archivos Hocol S.A.

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

- Bombeo a filtros: 25 KBPD (13 bombas en operación).
- Filtros: 240 KBPD máximo (suponiendo que cada filtro se lava al menos una vez al día).
- Retrolavado: 46 KBPD (no se tiene bomba de "stand by")
- Inyección agua: 217 KBPD (11 bombas en operación y 2 bomba en "stand by")

KBPD = miles de barriles por día

1.6 DIAGNÓSTICO DEL MANTENIMIENTO ACTUAL

Tabla 1. Evaluación de Mantenimiento

Áreas evaluadas	Valor máximo esperado por área 60 puntos
Recursos Gerenciales	49.27
Gerencia de la Información	46.18
Equipos y técnicas de mant. Preventivo	49.36
Planificación y Ejecución	49.90
Soporte, Calidad y Motivación	43.36
Resultados Totales:	235.07

300 – 265: Categoría “Clase Mundial” / nivel de excelencia en mantenimiento
264 – 230: Categoría “Muy buena” / nivel de buenas prácticas en mantenimiento
229 – 185: Categoría “Por arriba del nivel promedio” / nivel aceptable en mantenimiento
184 – 150: Categoría “Por debajo del promedio” / nivel no muy bueno del mantenimiento con oportunidades para mejorar
Menos de 149: Categoría “Muy por debajo del promedio” / nivel muy malo mantenimiento con muchas oportunidades para mejorar

Este esquema permite como se dijo con anterioridad, obtener información para construir una base de datos de mantenimiento y los indicadores apropiados para medir la efectividad de los procesos de RCM. Igualmente este diagnóstico se debe hacer recurrente en el tiempo, con el fin de determina los malos actores dentro del sistema de producción.

1.6.1 Valoración de la información de mantenimiento del sistema de información de MASA (Datastream7i).

Obtener la evaluación de la plataforma CMMS usada actualmente por MASA, con el fin de generar las oportunidades de mejoramiento dentro del programa de mantenimiento por RCM en campo San Francisco.

1.6.2 Recolección de información de procesos y mantenimiento.

La base fundamental de una estructura organizacional y de mantenimiento es la base de conocimiento o bases de datos que se tenga sobre los procesos de mantenimiento que se llevan a cabo. Bajo este principio el objetivo es, como se

mencionó anteriormente, recolectar la información de mantenimiento del Datastream 7i, el Field View (pérdidas de producción) y sistema de información de confiabilidad (CERT).

1.6.3 Evaluación de los costos asociados a mantenimiento y reestablecimiento.

La evaluación de los costos de mantenimiento sirven como base para una vez implementada la metodología RCM, realizar una comparación y un seguimiento a la reducción de costos de mantenimiento que se puedan tener en su implementación. Inicialmente a partir de esta información se puede determinar, mediante el análisis de Pareto de los costos asociados a mantenimiento y reestablecimiento, frente a las causas de falla, una clasificación 80-20 de los eventos de mayor relevancia. Esta información clasifica las causas de falla registrada con mayores pérdidas, en orden de importancia dentro del proceso de producción. Este proceso de clasificación identifica las fallas potencialmente altas (esporádicas¹ o crónicas²), sin hacer diferencia entre ellas.

1.6.4 Evaluación de las fallas por mantenimiento y reestablecimiento.

La evaluación de las fallas y el cálculo del MTBF de cada una de ellas, permite identificar que eventos se presentan con mayor frecuencia dentro de los procesos de mantenimiento y reestablecimiento y clasificar cuales fallas por su bajo MTBF, son crónicas.

1.6.5 Identificación de malos actores.

Los malos actores son aquellos que por su criticidad y su repetitividad en el tiempo, producen pérdidas relevantes en la producción de crudo. Estos malos actores están asociados a los costos y fallas encontrados en el numeral 1.6.3 y 1.6.4. Se deben clasificar estos eventos, de mayor a menor grado de relevancia, por medio del análisis de Pareto. Esta clasificación de los malos actores, permite identificar los sistemas a los cuales se les aplicará una vez definida su criticidad, el proceso de RCM.

¹ Se presentan una vez, pero sus efectos dentro de la producción son grandes.

² Son fallas repetitivas en el tiempo, que aunque no presentan pérdidas asiladamente significativas, ocasionan que su frecuencia, convierta estos eventos en relevantes.

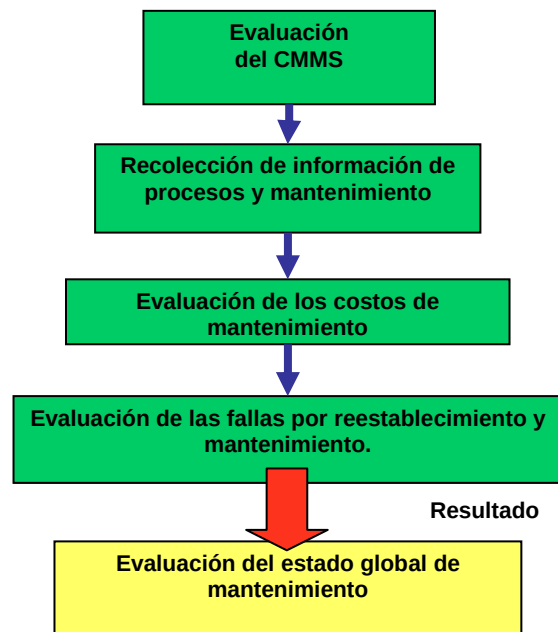


Figura 4. Esquema para el diagnostico del mantenimiento.

1.6.6 Definición de la criticidad.

Dependiendo del tipo de instalación o sistema sobre el cual se aplique el estudio RCM, la criticidad dentro del sistema de producción de Hocol variara; por tal motivo se hace necesario la definición de la matriz de criticidad de producción (PCM). El proceso consiste en evaluar cada uno de los malos actores por medio de cada uno de los aspectos que contiene la matriz, sin obviar ninguno y clasificar dentro de una escala de criticidad, los malos actores en orden de relevancia, desde el más critico para el sistema de producción, hasta el de menor potencial de impacto. De esta forma se implementara en los procesos posteriores, el programa RCM sobre los elementos que para el sistema de Hocol representen un alto impacto en su operación. En la figura 5 se puede observar esta matriz.

FRECUENCIA	5	MC	C	C	SC	SC
	4	MC	MC	C	SC	SC
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		0 - 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41 - 50
		CONSECUENCIA				

Figura 5. Matriz de criticidad.

1.6.7 Definición de targets de mejoramiento.

Posterior a la clasificación de los malos actores y la evaluación de la criticidad de cada uno de ellos, se realiza una priorización de los mismos y se clasifican de mayor a menor relevancia dentro del sistema de la operación y producción global de Hocol. Como ya en este nivel de desarrollo del proceso se han identificado las principales fuentes de pérdidas, se identifican dentro de cada uno de los malos actores las oportunidades de mejoramiento.

Para identificar las oportunidades de mejoramiento e implementar un proceso sucesivo, se hace un análisis de cada mal actor y se aplican nuevamente los procesos anteriores. El resultado de haber aplicado este proceso es la determinación de las fallas que dentro del sistema analizado producen más pérdidas de producción o problemas con la operación.

A cada una de estas fallas, se les aplica el proceso de RCA (Root Caused Analysis), con el fin de determinar las causas raíz de las mismas y las soluciones efectivas y oportunidades de mejoramiento que se pueden implementar.

1.6.8 Delimitación del estudio RCM a realizar.

Con base en la información de los targets de mejoramiento, se deben delimitar los objetivos y alcances del RCM sobre los sistemas analizados como malos actores. Para la delimitación del estudio se deben tener en cuenta los lineamientos establecidos dentro de las políticas y criterios de mantenimiento de Hocol y MASA.

1.6.9 Diseño RCM

Una vez definido el tipo de estudio RCM a desarrollar, junto con los criterios de mantenimiento establecidos, se diseña el programa de RCM sobre los elementos funcionales de los sistemas que se determinaron críticos dentro del estudio de los targets de mejoramiento. Este esquema se puede observar en el diagrama “**diseño del programa de RCM**”.

1.6.10 Definición del alcance RCM.

El alcance RCM se determina a partir de las recomendaciones y delimitaciones del proceso de planeamiento. El alcance del RCM debe comprender:

- Tiempos de verificación del programa de RCM desarrollado.
- Tiempo de modificación de la estructura del programa RCM.
- Tiempo de evaluación de las políticas de mantenimiento implementadas.
- Sistemas y equipos sobre los cuales se debe aplicar el programa RCM.

1.6.11 Recolección de información.

Los requerimientos de información para los equipos, componentes y sistemas bajo estudio son:

- Históricos de falla.
- Históricos de mantenimiento preventivos y correctivos realizados.
- Datasheet
- Reporte de stock de materiales e inventario de partes y repuestos.
- Tiempos de pedido y entrega de las partes y repuestos.

El proceso de administración de la información es una estructura importante dentro del programa del RCM, ya que a través de esta información, se puede construir la base de datos de mantenimiento y la toma de decisiones con base en eventos y registros históricos de mantenimiento. La organización de este proceso debe estar acorde con las necesidades del programa de RCM y encajar con la estructura de jerarquización propuesta.

1.6.12 Categoría de datos.

a. Datos de equipo.

La descripción de un equipo debe contener la siguiente información:

1. Dato de clasificación, como, industria, planta, localización, sistema;
2. Cualidades del equipo, como, datos del fabricante, características del diseño;
3. Datos de la operación, como, modo de funcionamiento, energía de funcionamiento, ambiente.

Esta información puede ser complementada con base en las tablas del anexo 1.

b. Datos históricos de falla

1. Con base en los datos históricos de falla, se deben identificar las fallas recurrentes en los equipos dentro de su estructura con el fin de proporcionar una estadística de los eventos y construir la probabilidad de falla del equipo asociado a los eventos encontrados.
2. Caracterización de fallas, datos de falla, impacto de falla, modos de falla, causas de falla, métodos de detección de fallas.

c. Datos de mantenimiento.

1. Registros de históricos de mantenimiento preventivo y correctivo a los equipos.
2. Datos de mantenimiento característicos, actividades dentro del mantenimiento, impacto de los trabajos de mantenimiento.
3. Recursos de mantenimiento: hora hombre de mantenimiento, equipos utilizados, tiempo total de mantenimiento.
4. Tiempo de mantenimiento: tiempo de la actividad, down time,

Los datos de mantenimiento correctivo deben ser registrados en orden para poder hacer seguimiento a las acciones correctivas después de ocurrida una falla.

1.6.13 Formato de los datos.

Los datos dentro del sistema de información o base de datos de mantenimiento, deben estar codificados con el fin de que cada pieza de información se encuentre organizada dentro de la estructura jerárquica a la cual corresponde. Las ventajas asociadas a este proceso de organización se pueden ver:

- Facilidad en la búsqueda de información y análisis.
- Fácil actualización de datos de mantenimiento.
- Al estar codificada la base de datos se logra consistencia en su información.
- Minimización de la base de datos.

1.6.14 Estructura lógica de la base de datos.

Esta estructura lógica de información tiene que ver con la secuencia que debe seguir una vez se haya registrado el dato de mantenimiento. Si la información proviene de una acción de mantenimiento preventivo debe alimentar una base de datos de este tipo. Si proviene del mantenimiento correctivo, la información alimenta la base de datos, junto con la información de fallas.

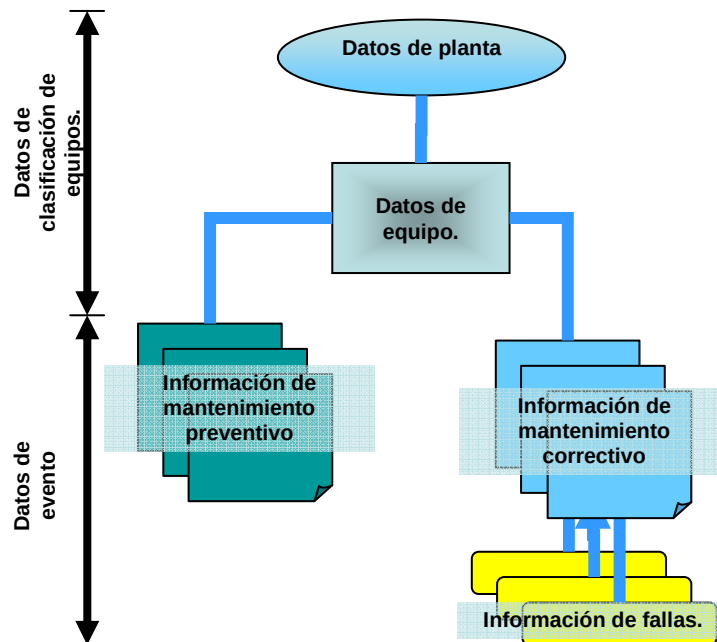


Figura 6. Estructura lógica para la información de la base de datos.

1.6.15 Estructura jerárquica de la base de datos.

- Modelo jerárquico: Las zonas de informaciones dentro de expedientes son relacionadas por una familia del 'árbol-como la' relación. Cada nivel representa una cualidad particular de datos;
- Modelo de la red: Esto es similar al modelo jerárquico; sin embargo, cada cualidad puede tener más de un padre;
- Modelo emparentado: El modelo se construye de las tablas de los elementos de datos, que se llaman las relaciones. No se está definiendo ningún camino de

acceso de antemano; toda la manipulación de datos es de forma tabular posible. La mayoría de diseños de base de datos utiliza este concepto;

d) Modelo del objeto: El software se considera como colección de los objetos que cada uno tiene una estructura de modelo jerárquico e interfaz. La estructura es fija dentro de cada objeto mientras que el interfaz es la parte visible que proporciona la dirección de acoplamiento entre los objetos. El modelar del objeto permite al diseño de base de datos ser muy flexible, extensible, reutilizable y fácil de mantener. Este modelo se parece ser popular en nuevos conceptos de la base de datos.

1.6.16 Proceso de recolección de los datos.

Las fuentes de recolección de datos del RIM corresponden a los reportes de eventos y fallas de los diferentes actores del proceso de mantenimiento, información técnica, base de datos, entre otros. Los métodos de recolección para el RIM son:

a. Extracción de la información del sistema de CMM de la compañía. Se debe determinar e identificar el tipo de información que se puede obtener de esta base de datos, el rango del valor, las unidades de magnitud.

b. Interpretar esta información y trasladarla a la base de datos deseada. En este punto se deben desarrollar herramientas de análisis e interpretación.

c. Trasladar la información a la base de datos de confiabilidad, en este proceso se deben emplear herramientas que garanticen la confiabilidad de la información, como la minería de datos y el análisis multivariable.

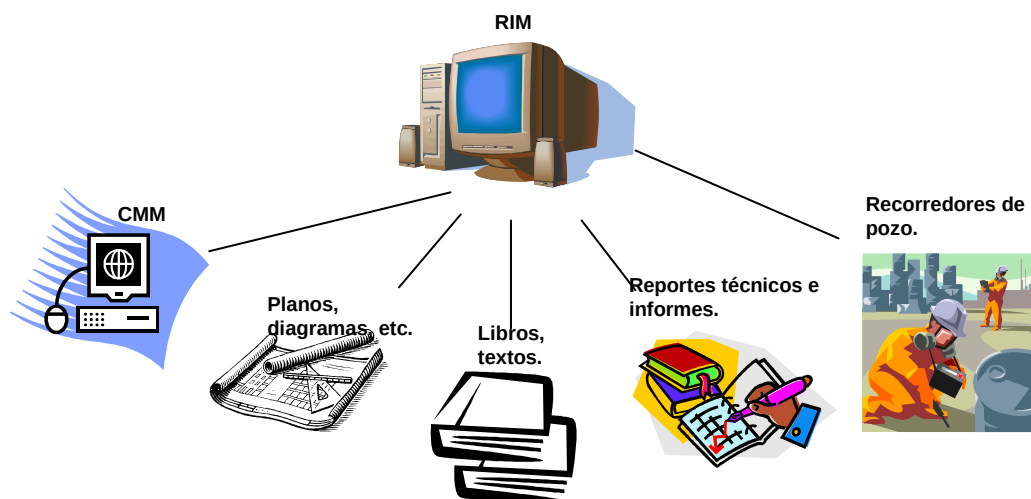


Figura 7. Fuentes de información del RIM

1.6.17 Fronteras de equipo.

Las fronteras de equipo deben ser determinadas con el fin de facilitar la comunicación entre los diferentes operadores y los equipos de mantenimiento. Para cada clase de equipo (nivel jerárquico), se debe indicar la frontera de equipo y los datos de confiabilidad y mantenimiento para cada uno de ellos, necesarios para mantener la estructura de mantenimiento.

El diagrama de fronteras además debe contener los niveles inferiores principales (nivel jerárquico 7) y las interfaces con el entorno. Este diagrama debe contener una descripción detallada de cada subunidad (nivel 7), el estado de estos dentro del proceso (on, off) y la importancia de cada subunidad dentro del diagrama de frontera.

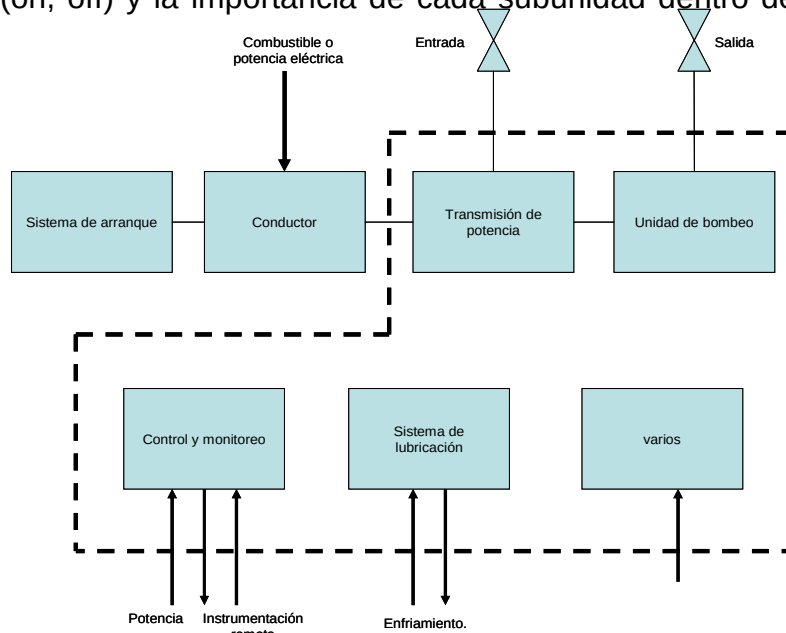


Figura 8. Ejemplo de un diagrama de frontera de un equipo (bomba).

1.7 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los actuales mantenimientos aplicados a los filtros de inyección de agua de servicios petroleros son muy complejos y requieren de una dedicación constante tanto de recursos y presupuesto para su mantenibilidad, enfocados en un 80% a la parte de instrumentación, 10 % a la parte mecánica y 10% a la parte eléctrica.

Las intervenciones de estos equipos de procesos generan traumatismos en las operaciones ya que el proceso es limitado en la parte de capacidad de almacenamiento y las intervenciones deben ser cortas en tiempo, otra situación es su proceso montado en serie que restringe su intervención, estos equipos cuentan con un proceso de monitoreo y control remoto haciendo practico su funcionamiento.

Los procesos de producción de crudo son cada vez más exigente por el alto costo en el que se comercializa un barril de referencia (W.T.I), por lo cual se hace de forma casi obligatoria obtener la máxima producción evitando el mínimo de desperdicio de crudo y evitar al máximo la contaminación al medio ambiente, en los tanques de filtración de se efectúa el proceso de limpieza del agua de producción extraída para obtener un producto realmente muy bueno y reutilizarlo para extraer el tan preciado liquido, el petróleo.

El proceso por ser de forma cerrada y secuencial se hace exigente en su desarrollo y continuamente se modifican las condiciones de operación ya sea por los volúmenes de agua que a diario se requieren para extraer un potencial estimado de producción.

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 actualmente implementada en esta clase de filtros de inyección de agua no es la más adecuada y se generan traumatismos en la operación cuando se realizan mantenimientos a estos equipos, ya que se pueden generar pérdidas de producción sino se realizan en los tiempos permitidos.

Con la implementación de la técnica de RCM (Mantenimiento Basado en la Confiabilidad) se garantiza un mayor tiempo de servicio del activo monitoreando sus variables constantemente y reducir los costos de mantener y operar estos activos, y eliminar las posibles contaminaciones al medio ambiente que se puedan generar creando un marco de protección tanto al ser humano como al medio ambiente.

El proceso de implementación de la técnica de RCM. se llevar mediante un cronograma lógico de actividades apuntando a los objetivos trazados por la compañía para generar la máxima productividad con el mínimo riesgo humano y al mínimo costo de mantener..

Fundamentalmente las industrias del sector petrolero que toman la decisión de implementar esta técnica buscan como objetivo mejorar su producción y mostrarse entre las empresas de su medio.

1.9 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.9.1 Objetivo general

Establecer la estrategia de implementación del RCM a filtros de inyección de agua de servicios petroleros.

1.9.2 Objetivos específicos

- Establecer diagramas de flujo de los procesos para la operación de filtros de inyección de agua en un campo petrolero.
- Estructurar y realizar diagramas de flujo de los procesos para el mantenimiento de una planta de tratamiento e inyección de agua en un campo petrolero.
- Obtener toda la información pertinente para estructurar un plan de mantenimiento.

- Sensibilizar al personal operativo para obtener un respaldo confiable en la elaboración, puesta en marcha y control del RCM aplicado a los filtros de inyección de agua de servicio petroleros.
- Consolidar actividades centralizadas en seguridad industrial y protección del medio ambiente.

2 ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

2.1 RCM PROCESO Y METODOLOGÍA

La implementación del proceso de RCM requiere además de la realización de su análisis y la elaboración del plan de implementación, un compromiso importante por parte de las personas encargadas de la gerencia de planeación y de proyectos. Antes de implementar el programa RCM se deben considerar una serie de requerimientos que contribuyen al gerenciamiento de los activos dentro de su ciclo de vida útil.

Un gerenciamiento adecuado de los activos permite intervenir un ítem mantenible desde su instalación y operación hasta su retiro del servicio. Igualmente este gerenciamiento de activos le proporciona al equipo la eficiencia que requiere dentro de su contexto operativo, influenciando el mismo desde el punto de vista de seguridad, operatividad y costos; además permite la identificación de modos de falla, que una vez ocurridos pueden dar lugar a una acción costosa y dispendiosa de mantenimiento correctivo. La propuesta de implementación del proceso RCM dentro de la estructura de mantenimiento de los filtros de inyección de agua en campos petroleros, para el planteamiento se utilizara en el CAMPO SAN FRANCISCO DE HOCOL - ASOCIACIÓN PALERMO, se puede mostrar a través de un esquema del ciclo de PHVA, que esquematiza los pasos necesarios para una implementación dentro de las políticas de seguridad, medio ambiente y calidad de la compañía.

La metodología debe estar enfocada en efectuar un análisis de confiabilidad de la operación con los siguientes criterios y requerimientos:

- cumplimiento del plan de operaciones a tres años para determinar las funciones de los sistemas y equipos.
- Análisis y control de riesgos.
- Eficiencia operacional y del entorno.
- Calidad del producto.
- Servicio al cliente.
- Eficiencia energética.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM Reliability Centered Maintenance) es un proceso sistemático y analítico usado para determinar los

requerimientos de mantenimiento de funcionalidad de una planta o sistema e identificar las acciones necesarias para garantizar y asegurar la seguridad y la operación costo efectiva de de un sistema.

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 proceso de implementación del RCM, contempla 4 fases específicas durante las cuales se hace una adecuación del proceso y se verifica finalmente el modelo desarrollado bajo los ajustes específicos, antes de ser implantado dentro del esquema general de mantenimiento. Una vez implementado se debe verificar su efectividad dentro de los parámetros de mantenimiento y producción. Las cuatro fases corresponden a las del ciclo de mejoramiento continuo, estas son: planear, hacer, verificar y actuar.



Figura 9. Esquema de mejoramiento continuo del RCM

A través de estas fases dentro del mejoramiento continuo se logra que el proceso de mantenimiento sea más productivo y competitivo dentro de la organización, al permitir realizar un análisis de los procesos utilizados, de manera tal que si existe algún inconveniente pueda mejorarse o corregirse a tiempo. Las actividades desde el punto de vista general para este ciclo, se pueden describir de la siguiente forma:

2.1.1 Planear.

En el momento de planear el proceso RCM, se deben tener en cuenta los requisitos y criterios para su aplicación, además del grado de análisis de RCM y las técnicas predictivas que son utilizadas en mantener las facilidades y el equipo dentro de la rutina de RCM. Esta información determina el nivel de supervisión, cantidad de datos, flujo de los mismos y elementos necesarios que requiere el proceso. La planificación del proceso, junto a sus sub etapas, limitara la cantidad de mano de obra, los recursos operativos y de repuestos y la logística de la

implementación dentro del proceso de mantenimiento actual. El proceso diseñado debe considerar su fácil seguimiento y actualización y garantizar que el proceso RCM sea monitoreado en el tiempo.

2.1.2 Hacer.

Poner en práctica el programa de RCM diseñado para bloquear las causas que ocasionaron la solicitud de estudio o mejorar un proceso que afecte la producción.

2.1.3 Verificar.

Los resultados obtenidos, compararlos con los Indicadores que se fijaron como objetivo de la etapa de diseño, para poder asegurar que el cambio, fue implementado y efectivo.

2.1.4 Ajustar o Actuar.

- Tomar decisiones con base en la verificación del modelo implementado.
- Implementar estándares para monitorear y prevenir situaciones indeseadas.

El anterior proceso general de implementación debe realizarse continuamente con el fin de garantizar que el modelo RCM cumpla con las expectativas y criterios de mantenimiento y operatividad y las políticas de buen servicio. Las actividades específicas dentro de cada etapa se desglosarán en las siguientes secciones:

Con base en esta lógica de decisiones de mantenimiento se implementa un esquema para la globalidad del RCM (Figura 10), que va desde el diseño del mismo hasta la puesta en marcha, verificación y medición del proceso. Este diagrama permite realizar una implementación de esta guía sobre cualquier activo que lo requiera. Igualmente en este diagrama se introducen elementos de información, elementos de análisis, elementos de inspección, mecanismos de mantenimiento y estructuras jerárquicas de funcionalidad. En la figura 2 se puede observar un esquema que contiene los subprocesos dentro de esta estructura RCM.

Este proceso de implementación será soportado en la normatividad internacional existente, en lo que respecta a los pasos y criterios para la implementación del proceso de RCM en planta. Igualmente se diseñara de acuerdo a los lineamientos que proporcione el responsable del mantenimiento y directo beneficiario de los programas de buen mantenimiento. Este último velara por la correcta ejecución de los trabajos dentro de sus políticas de operación y producción.

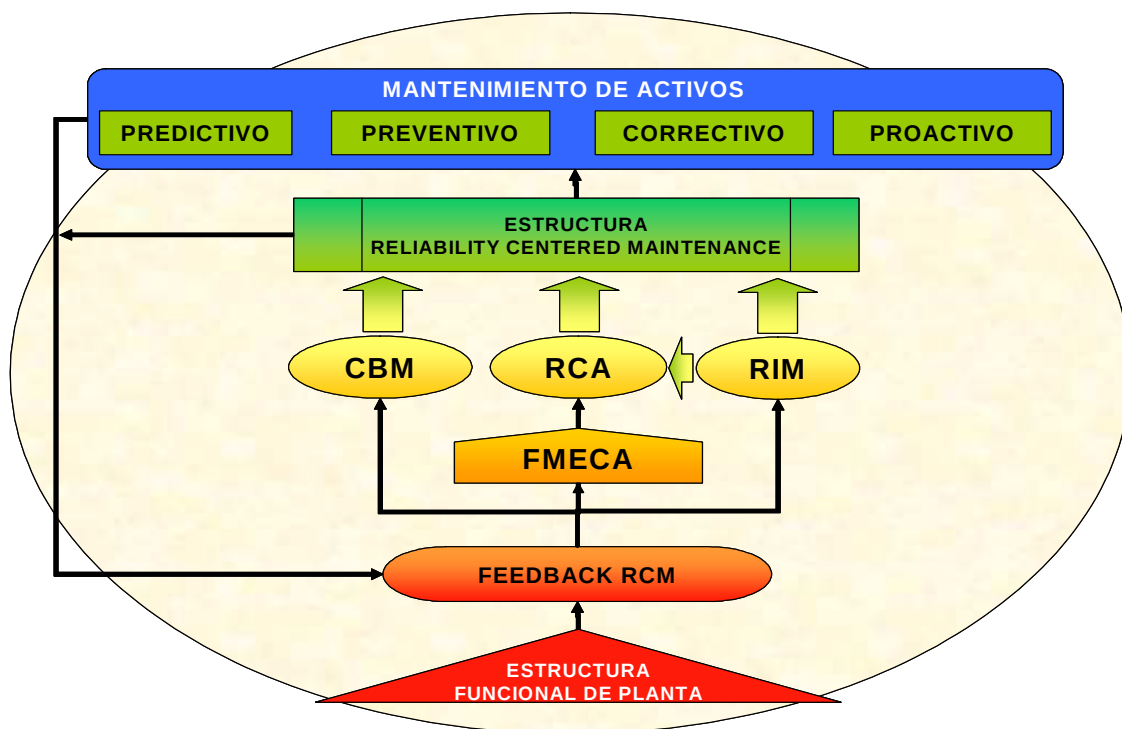
En los diagramas de “**proceso de optimización de planes de mejoramiento por medio de la estrategia de RCM**”, se pueden observar las entradas y salidas del proceso, descritas a continuación:

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.

La estrategia de mantenimiento tiene que ver con la identificación de los componentes de la instalación que requieran implementar un plan de actividades de mantenimiento. Esta estrategia tiene como objetivo determinar el procedimiento más apropiado y luego realizar su correspondiente documentación en forma de un programa para la instalación. Los criterios básicos son:

Figura 10. Diagrama de flujo del RCM



Fuente: Juan Carlos Duarte.

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?

2.1.5 Equipo de trabajo.

Las funciones del equipo de trabajo dentro del proceso RCM, deben ser específicas y acordes con los requerimientos y objetivos que se tengan para el plan de mantenimiento. Cada uno de los miembros del equipo debe estar identificado con el proceso de RCM y comprometido con el mejoramiento continuo de las políticas en lo que respecta a la disminución de los costos de mantenimiento y de sus procesos improductivos, así mismo como el aumento de la productividad, la disponibilidad y confiabilidad del sistema completo.

El equipo de trabajo de RCM debe estar constituido por personal involucrado en la gestión de los activos y que tenga experiencia en las funciones de mantenimiento y producción. Deben tener un conocimiento adecuado de los equipos que se están estudiando, su diseño, construcción, operación, mantenimiento, funciones dentro del sistema y su contexto operacional.

A través de la formación del equipo RCM, se pueden repartir los problemas de mantenimiento dentro de un sistema y las soluciones que se tienen para cada uno de ellos, además que se tiene la información, el conocimiento y la experiencia de los miembros en una forma sistemática.



Figura 11. Esquema del grupo RCM para su implementación.

2.1.6 Facilitador.

El papel del facilitador es asegurar que el proceso de RCM se lleve a cabo a través de las siguientes actividades:

- Se apliquen correctamente las preguntas del RCM.
- Se logre un correcto consenso sobre las respuestas del RCM.
- Mantener a todos los equipos y componentes dentro del plan de trabajo.
- Hacer que las reuniones tengan el efecto esperado y el avance que se requiere.
- Generar conciencia sobre el diligenciamiento de los documentos y verificar que se haga correctamente el proceso.
- Manejar el conocimiento global del proceso a implementar y el conocimiento genérico del proceso RCM.

2.1.7 Supervisores de O&M.

Representado por los supervisores de O&M de MASA, supervisores y operadores, deben ser los encargados de:

- Proporcionar información sobre la operación y el mantenimiento del sistema.
- Mantener informado al grupo sobre las eventualidades del sistema en cuanto a fallas se refiere.
- Proporcionar información sobre las medidas preventivas y correctivas aplicadas a los componentes del sistema.
- Aportar al grupo información sobre las causas de falla y sus soluciones desde el punto de vista de mantenimiento.

- Transmitir a todo el equipo de RCM, las nuevas eventualidades y acciones correctivas tomadas al presentarse una falla de tipo correctivo.
- Asistir a las reuniones programadas por el equipo y participar activamente en ellas.
- Proponer medidas correctivas y soluciones a los principales problemas detectados en el mantenimiento.
- Soportar la documentación necesaria para los procesos de operación y mantenimiento.

2.1.8 Gerente de contrato HOCOL.

Esta persona es el cliente dentro del proceso de mantenimiento, las decisiones estratégicas del equipo RCM, deben ser aprobadas e impulsadas por él al interior de Hocol. Sus roles y responsabilidades son:

- Proporcionar información sobre la operación de la compañía y medidas que afecten el mantenimiento y la operación de los sistemas.
- Informar al grupo de las políticas de Hocol, en cuanto a operación y mantenimiento se refiere.
- Proponer desde el punto de vista de cliente las medidas más adecuadas dentro de la estructura del mantenimiento.
- Informar al interior de Hocol el proceso de implementación del programa RCM.
- Transmitir las medidas propuestas de mantenimiento a los encargados de Hocol, con el fin que conozcan el proceso y las ventajas de su implementación.
- Delimitar los alcances en cuanto a recursos para la operación de mantenimiento del campo San Francisco de Hocol.
- Asistir a las reuniones programadas por el equipo y participar activamente en ellas.

2.1.9 Gerente de contrato MASA

Al igual que el gerente de Hocol esta persona debe conocer y aprobar las decisiones estratégicas del equipo RCM, e impulsarlas a la gerencia general de MASA. Sus roles y responsabilidades son:

- Proporcionar información sobre la operación de la compañía y medidas que afecten el mantenimiento y la operación de los sistemas.
- Informar al grupo de las políticas de MASA, en cuanto a operación y mantenimiento se refiere.
- Proponer desde el punto de vista de la gerencia de contrato las medidas más adecuadas dentro de la estructura del mantenimiento.
- Informar al interior de MASA el proceso de implementación del programa RCM.
- Transmitir las medidas propuestas de mantenimiento a los encargados de MASA, con el fin que conozcan el proceso y las ventajas de su implementación.
- Delimitar los alcances en cuanto a recursos para la operación de mantenimiento del campo San Francisco por parte de MASA.

- Asistir a las reuniones programadas por el equipo y participar activamente en ellas.

2.1.10 Equipo de planeación.

EL papel del equipo de planeación es:

- Proporcionar información sobre el estado de las pérdidas y mejoras en cuanto a producción se refiere, con el fin de verificar la efectividad de las medidas de mantenimiento implementadas. medidas preventivas y correctivas aplicadas a los componentes del sistema.
- Mantener informado al grupo sobre las eventualidades del sistema en cuanto a producción, fallas, actividades de mantenimiento ejecutadas, actividades sin ejecutar, estado de indicadores de mantenimiento implementados.
- Aportar al grupo información sobre los eventos que causan mayor consecuencia en el sistema desde el punto de vista económico.
- Apoyar al equipo RCM en el seguimiento de los indicadores de desempeño y mantenimiento.
- Transmitir a todo el equipo de RCM, las nuevas políticas de planeación de MASA.
- Asistir a las reuniones programadas por el equipo y participar activamente en ellas.
- Soportar la documentación necesaria para los procesos de planeación.

2.1.11 Soporte HSE

Con el fin de conservar las políticas de seguridad industrial y las medidas de protección ambiental de la compañía Hocol, se hace necesaria la conformación de este grupo. Sus roles y responsabilidades son:

- Proporcionar al equipo RCM, las pautas en cuanto a HSE se refieren, delimitando el proceso de mantenimiento seguro.
- Soportar la documentación necesaria para los procesos de mantenimiento y operación seguros.
- Informar al grupo de las políticas de HSE de la compañía y los cambios que se presenten en ellas.
- Asesorar continuamente al proceso RCM para evitar que se realice sin contemplar las normas y reglamentaciones vigentes.

2.1.12 Grupo de ingeniería y confiabilidad

Es el encargado de soportar todo el proceso de confiabilidad del sistema y todo el proceso de implementación del RCM. Sus roles y responsabilidades son:

- Proporcionar al equipo RCM, las pautas en materia de confiabilidad y disponibilidad de los activos del sistema de producción de Hocol.
- Soportar la documentación necesaria para los procesos de mantenimiento y operación.
- Proporcionar información sobre los indicadores de confiabilidad y disponibilidad de los diferentes equipos del sistema con e fin dar seguimiento a los eventos y fallas que se registren.
- Mantener informado al grupo sobre las eventualidades del sistema en cuanto a fallas y sus análisis, análisis de condición, tendencias de equipos y el proceso de mantenimiento en general.
- Aportar al grupo información sobre los eventos que causan mayor consecuencia en el sistema desde el punto de vista técnico.
- Apoyar al equipo RCM en el seguimiento de los indicadores de confiabilidad y disponibilidad.
- Actualizar al equipo RCM sobre las nuevas metodologías de mantenimiento encontradas en el ambiente científico mundial.
- Conocer la globalidad de la planta y sus procesos.
- Asistir a las reuniones programadas por el equipo y participar activamente en ellas.
- Soportar la documentación necesaria para los procesos de confiabilidad y disponibilidad.
- Llevar a cabo los procesos de confiabilidad necesarios para implementar el proceso RCM dentro del plan de mantenimiento.
- Aportar conocimientos sobre las fallas, causas y soluciones desde el punto de vista operativo, mecánico o conjugación de los dos.

2.2 PASOS PARA ANALISIS DEL RCM.

Los pasos para el análisis de RCM se puede describir en los siguientes pasos:

- **Falla Funcional:**

Una falla funcional se define como la inhabilidad de un equipo para realizar una función específica dentro de los límites especificados de operación. Una falla funcional puede necesariamente no ser una pérdida completa de la función. Las descripciones funcionales apropiadas de la falla se basan en la descripción de su función.

Las fallas funcionales para un equipo darán lugar probablemente a un funcionamiento reducido o a la pérdida parcial o total del sistema. La definición de las fallas funcionales para los equipos que hacen parte del sistema deben ser enumeradas, listando los diferentes efectos de las pérdidas de función parciales y totales. La información para determinar dichas fallas se puede obtener de fuentes

tales como mantenimiento, manuales, dibujos, y discusiones con los operadores del equipo, los encargados del mantenimiento o los ingenieros de diseño.

- 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:

Dependiendo del tipo de instalación o sistema sobre el cual se aplique el estudio RCM, la criticidad dentro del sistema de producción de Hocol variara; por tal motivo se hace necesario la definición de la matriz de criticidad de producción (PCM). El proceso consiste en evaluar cada uno de los malos actores por medio de cada uno de los aspectos que contiene la matriz, sin obviar ninguno y clasificar dentro de una escala de criticidad, los malos actores en orden de relevancia, desde el más critico para el sistema de producción, hasta el de menor potencial de impacto. De esta forma se implementara en los procesos posteriores, el programa RCM sobre los elementos que para el sistema de Hocol representen un alto impacto en su operación. En la figura 12 se puede observar esta matriz.

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

FRECUENCIA	5	MC	C	C	SC	SC
	4	MC	MC	C	SC	SC
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		0 - 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41 - 50
CONSECUENCIA						

Figura12. Matriz de criticidad de equipos.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE PLANTAS, EQUIPOS Y COMPONENTES

- **Generalidades.**

A través de la aplicación de la estructura operacional se puede determinar el nivel de profundidad sobre el que se pretende hacer mantenimiento (llamado ítem mantenible) y en un proceso posterior obtener la función de este ítem mantenible dentro de la estructura global. En la figura 13, se muestra la taxonomía que se debe aplicar sobre la infraestructura de Hocol para la jerarquizar de sus activos. Esta clasificación se puede proponer de acuerdo a la norma ISO/DIS 14224: **“Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment”**. En el anexo 2 se encuentra el formato para realizar la clasificación jerárquica de cada activo a partir de la tabla 2.

Tabla 2. Jerarquía Taxonómica de planta.

Categoría principal	Nivel taxonómico.	Jerarquía taxonómica / definición.	Tabla	Norma
Uso / localización.	1	Industria / Tipo de industria	Definición según Norma	ISO/DIS 14224.
	2	Categoría del negocio / Tipo de negocio o proceso corriente	Definición según Norma.	ISO/DIS 14224
	3	Categoría de la instalación / tipo de instalación.	Tabla A1.	ISO/DIS 14224
	4	Categoría de la planta o unidad. / Tipo de planta o unidad.	Tabla A2	ISO/DIS 14224
	5	Sección / sistema.	Tabla A3.	ISO/DIS 14224
Subdivisión de equipos.	6	Equipo (clase/unidad)	Tablas A4 – A8.	ISO/DIS 14224
	7	Subunidad.	Tablas A6 – A92.	ISO/DIS 14224
	8	Componente/ítem mantenible.	Tablas A8 – A92.	ISO/DIS 14224
	9	Parte.	Tablas A8 – A92.	ISO/DIS 14224

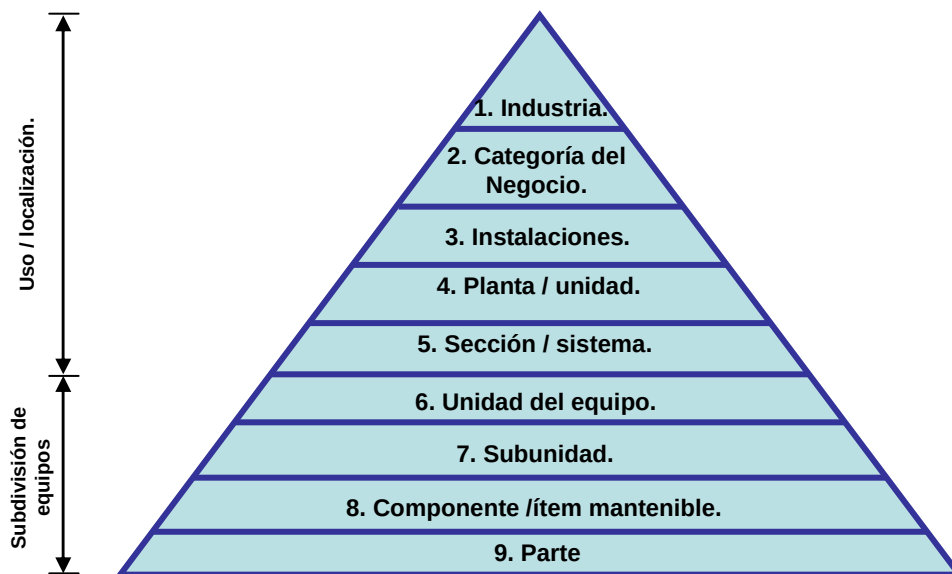


Figura 13. Taxonomía aplicada a la jerarquización de activos.

En el proceso de jerarquización taxonómica, cuando se alcanza el nivel 5 se recomienda utilizar un diagrama EPS (Entrada - Proceso - Salida) para cada sistema encontrado con el fin de visualizar su función dentro del proceso total de la planta. La determinación de las características del sistema permite identificar los siguientes niveles jerárquicos relevantes para su operación. En el anexo se encuentra un formato para realizar este análisis de proceso.

- **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.

2.4 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 perdida 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.

2.5 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.

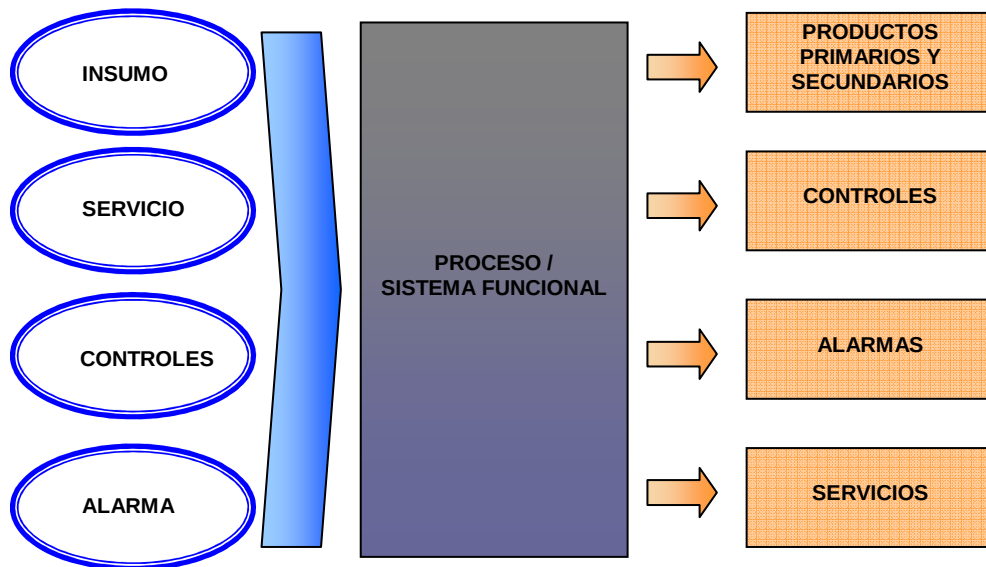


Figura 14. Diagrama EPS para determinar la funcionalidad de un sistema.

Tabla 3. Elementos del diagrama EPS.

Etap	Elemento	Descripción
Entrada	Insumos	Materia prima a transformar
	Servicios	Requerimiento el sistema para funcionar: energía, aire comprimido, gas, agua de enfriamiento, entre otros
	Controles	Controles del sistema, que permiten su funcionamiento y parada
	Alarmas	Señales que provienen de otras plantas y afectan la operación del sistema.
Proceso	Proceso	Descripción de la función o proceso que realiza el sistema
Salida	Productos primarios y productos secundarios	
	Servicios	Que presta a otros sistemas
	Alarmas	Señales que funcionan como control o alarma a otros sistemas

- **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 mas 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.

2.6 ANÁLISIS DE MODO DE FALLA, EFECTOS Y CRITICIDAD (FMECA)

Este análisis es aplicado a cada sistema (Nivel 5), Equipo (Nivel 6), cada componente e ítem mantenible (Niveles 7 a 9) de la estructura jerárquica de planta. Para cada unidad funcional pueden existir múltiples modos de falla. El FMECA direcciona el análisis de cada falla funcional y los modos de falla dominantes asociados con cada falla con el fin de examinar sus consecuencias dentro del sistema y/o la planta. Este análisis puede ser aplicado a cualquier

sistema o maquina, con características operativas similares que pueden tener los mismos modos de falla.

A través del FMECA se identifica y documentan las funciones, fallas funcionales, modos de falla y efectos de la falla sobre un ítem mantenible. Esta información se utiliza para identificar la importancia de las fallas funcionales sobre la seguridad, el medio ambiente, la operación y el impacto económico. Es importante tener en cuenta dentro del análisis FMECA las siguientes consideraciones:

- Fuentes de datos de funciones identificadas y metodología implementada.
- Fuentes de datos de modos de falla y metodologías realizadas para su consecución.
- Métodos de detección de fallas.
- Fuentes de datos de tiempo medio entre fallas (MTBF) y metodologías para su cálculo.
- Lista de clasificación de severidad.
- Métodos para determinar criticidad.

Para facilitar este análisis se debe realizar una codificación de los posibles mecanismos de falla, de las causas de falla y los mecanismos de falla que se pueden presentar a nivel de equipo o ítem mantenible. La codificación de las fallas y de las causas de éstas dentro del programa de mantenimiento se puede encontrar en el anexo B; esta codificación tiene como base la norma ISO/DIS 14224.

En el anexo B, se encuentra igualmente la hoja de trabajo para realizar el FMECA una vez se haya determinado el sistema o equipo al cual se realizara el análisis. Esta tabla contiene un análisis de la criticidad y la probabilidad de ocurrencia de la falla con el fin de determinar los eventos que pueden resultar de mayor relevancia para el sistema. El análisis de criticidad y la probabilidad de ocurrencia dentro del programa RCM, tienen como base las tablas 4 y 5 de la sección anterior.

Aplicar el FMECA 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 FMECA:

2.6.1 Definición de fallas funcionales.

Una falla funcional se define como la inhabilidad de un equipo para realizar una función específica dentro de los límites especificados de operación. Una falla funcional puede necesariamente no ser una pérdida completa de la función. Las descripciones funcionales apropiadas de la falla se basan en la descripción de su función.

Las fallas funcionales para un equipo darán lugar probablemente a un funcionamiento reducido o a la pérdida parcial o total del sistema. La definición de las fallas funcionales para los equipos que hacen parte del sistema deben ser enumeradas, listando los diferentes efectos de las pérdidas de función parciales y totales. La información para determinar dichas fallas se puede obtener de fuentes tales como mantenimiento, manuales, dibujos, y discusiones con los operadores del equipo, los encargados del mantenimiento o los ingenieros de diseño.

2.6.2 Efecto de las fallas.

El efecto de la falla se describe como el impacto que esta tiene sobre el sistema, los elementos cercanos y la capacidad funcional de los equipos cercanos. Un efecto de la falla se debe describir en términos del daño físico, incluyendo el daño primario y secundario que pueda ocurrir. También debe tener en cuenta los efectos cuando se atenúa la pérdida de la función durante la operación. Los efectos de la falla deben ser descritos como si no existiera una tarea dentro del P.M. para prevenir o para encontrar la falla. Los efectos de la falla se utilizan en el proceso del análisis de RCM para determinar las consecuencias de fallas y poder desarrollar tareas apropiadas del PM.

Las consecuencias de la falla que se deben tener en cuenta, deben contemplar además de los efectos sobre el personal, el ambiente, la realización de la misión, y la economía de planta. Para determinar las consecuencias de la falla se debe identificar el efecto que la ocurrencia de un modo de fallo específico tiene sobre los elementos más extremos del sistema. Para ello dentro del análisis del efecto de la falla se deben identificar tres niveles para los efectos de las fallas: nivel local, medio y extremo del sistema. Estos tres niveles son generalmente suficientes para la mayoría de los análisis, pero pueden ser agregados o ser eliminados como sea necesario.

2.6.3 Definición de rutinas de mantenimiento dentro del RCM

La arquitectura del programa RCM, debe estar soportada en un cuadro lógico o un diagrama de flujo, donde se pueda visualizar la toma de decisiones en las rutinas

de mantenimiento. Esta toma de decisiones esta basada en las funciones de cada activo dentro de la estructura de mantenimiento y sus efectos sobre el sistema total, así como en la complejidad de las acciones de mantenimiento que se pueden aplicar sobre él para mitigar o corregir dichas fallas y disminuir el riesgo asociado a ellas.

Un programa de RCM incluye las diferentes rutinas de mantenimiento dentro de su estructura. Estas son: correctiva, preventivo, predictiva y proactiva. El proceso de la evaluación de la tarea puede producir cuatro tipos de salidas de acuerdo a cada uno de los tipos de mantenimiento y las soluciones que cada modo de falla pueda generar. Este esquema de toma de decisiones de mantenimiento se puede realizar de acuerdo a la figura 13, este es el árbol de decisión de tareas RCM.

El sistema tiene cuatro estados finales sobre los cuales se fundamenta el proceso de mantenimiento. El primer estado final, tareas de mantenimiento predictivo (PrM), sigue la línea de mayor criticidad del sistema para los activos; se alcanza si la falla del activo presenta consecuencias severas para el sistema y se puede hacer un seguimiento del mismo, anticipándose a la falla y ejecutando tareas de mantenimiento preventivo y basadas en condición.

Si la falla tiene consecuencias severas para el sistema, pero no existe forma de determinar su estado a través del PM y con labores de mantenimiento periódico se puede garantizar su funcionalidad se alcanza el nivel de mantenimiento preventivo (PM) o mantenimiento a intervalos de tiempo determinados. Si la falla del activo presenta las características de alta criticidad, pero no se puede determinar una rutina de PM y no se puede establecer el nivel de falla, se debe realizar un reacondicionamiento de las características funcionales del activo, por medio del rediseño del mismo, y aceptar el riesgo de falla, o determinar que acciones no asociadas al mantenimiento que reducen la probabilidad de falla instalando sistemas redundantes. Si la falla no es relevante para la operación del sistema simplemente se deja correr a falla "Run to Fail".

Esta lógica de decisión RCM esta acompañada de una definición de las tareas de mantenimiento y de los costos asociados a la determinación de la tarea que es necesaria aplicar. En esta etapa del análisis cada opción ha demostrado que tiene efectividad en la reducción o mitigación de las consecuencias de la falla a un nivel aceptable. La mejor solución a este punto será evaluada al determinar el costo de ejecutar esa solución y las consecuencias operacionales que dicha solución tenga en las operaciones del mantenimiento.

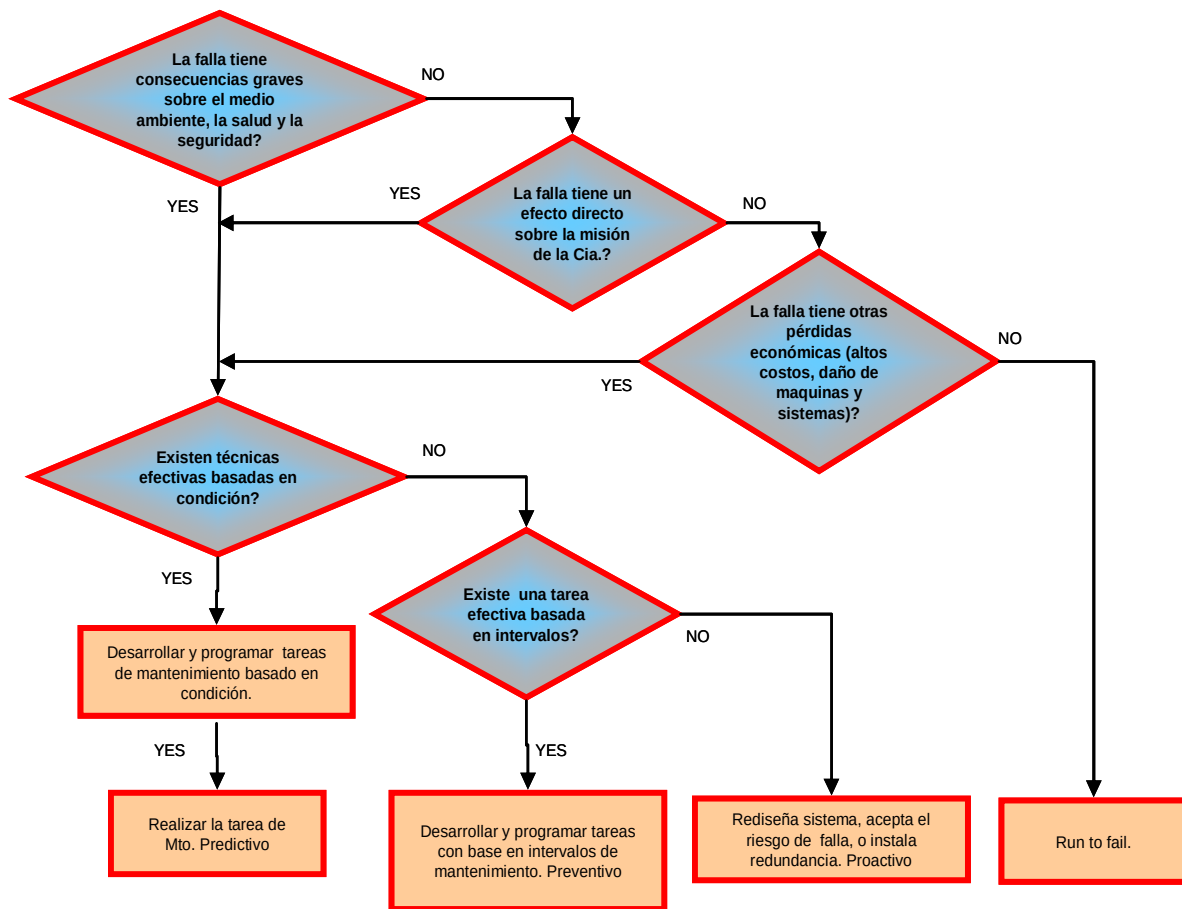


Figura 15. Diagrama de flujo de la toma de decisiones en la estructura de mantenimiento del RCM.

2.6.4 Definición de tareas de mantenimiento

Las tareas de mantenimiento, como se mencionó en la sección anterior, se determinan con el fin de identificar cuales son las actividades, entre las diferentes opciones, que previenen que un modo de falla ocurra, o si no es prevenido totalmente reduzca la consecuencia de la falla a un nivel aceptable para el programa.

2.6.5 Tareas de servicio

Una tarea de servicio se define como el reemplazo de un componente o repuesto (por ejemplo: oxígeno, nitrógeno, combustible, entre otros), que son depletados durante su operación normal. Las tareas de mantenimiento son programadas de acuerdo a las necesidades y no requieren un exhaustivo análisis para determinar como se deben desarrollar y se realizan de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes. Para realizar esta actividad se debe formular una fuente de

información para cada equipo, que incluya fechas de ejecución de las tareas de servicio, diagramas, manuales de operación.

2.6.6 Tareas de lubricación.

Una tarea de lubricación consiste en aplicar un lubricante a un componente de acuerdo con las especificaciones de lubricación de una determinada operación. Esta tarea se realiza y programa de acuerdo a las expectativas de vida útil del lubricante y de acuerdo al análisis del estado del aceite lubricante. . Para realizar esta actividad se debe formular una fuente de información para cada equipo, que incluya fechas de ejecución de las tareas de lubricación, evaluación del aceite, estado de acuerdo a su evaluación, diagramas de equipo y manuales de operación.

2.6.7 Prevención de corrosión.

Se deben ejecutar de acuerdo a las velocidades de corrosión que presenten los componentes. Esta tarea consiste básicamente en aplicar barreras sobre los materiales y aplicar inhibidores de corrosión a tiempos fijados de acuerdo a evaluaciones y ensayos de corrosión.

2.6.8 Tareas a condición

Una tarea a condición se define como una actividad programa de inspección que se realiza a intervalos de frecuencia determinados con el fin de detectar fallas potenciales. En el momento en que una tarea a condición detecte que una falla potencial esta ocurriendo se debe realizar una acción correctiva. La tarea a condición incluye la fase de inspección y el análisis de la evolución de la falla. Con la tarea a condición se puede identificar la falla potencial y su tiempo para intervención, de esta forma se maximiza el tiempo de vida útil del componente, a la vez que se minimizan los tiempos de reparación y el número de partes requeridas.

- Desarrollo de tareas a condición
Para desarrollar una tarea a condición se deben tener en cuenta ciertos elementos propios de la tarea de evaluación que determinan las directrices de la misma.
- Definición de la falla funcional del equipo o componente (punto F).
- Definición de la falla potencial del equipo o componente (P).
- Definición del intervalo PF (Falla Potencial funcional).
- Definición de las tareas a condición dentro del intervalo PF para reducir la probabilidad de falla.

La determinación de la tarea a condición se puede realizar de acuerdo a la figura 16.

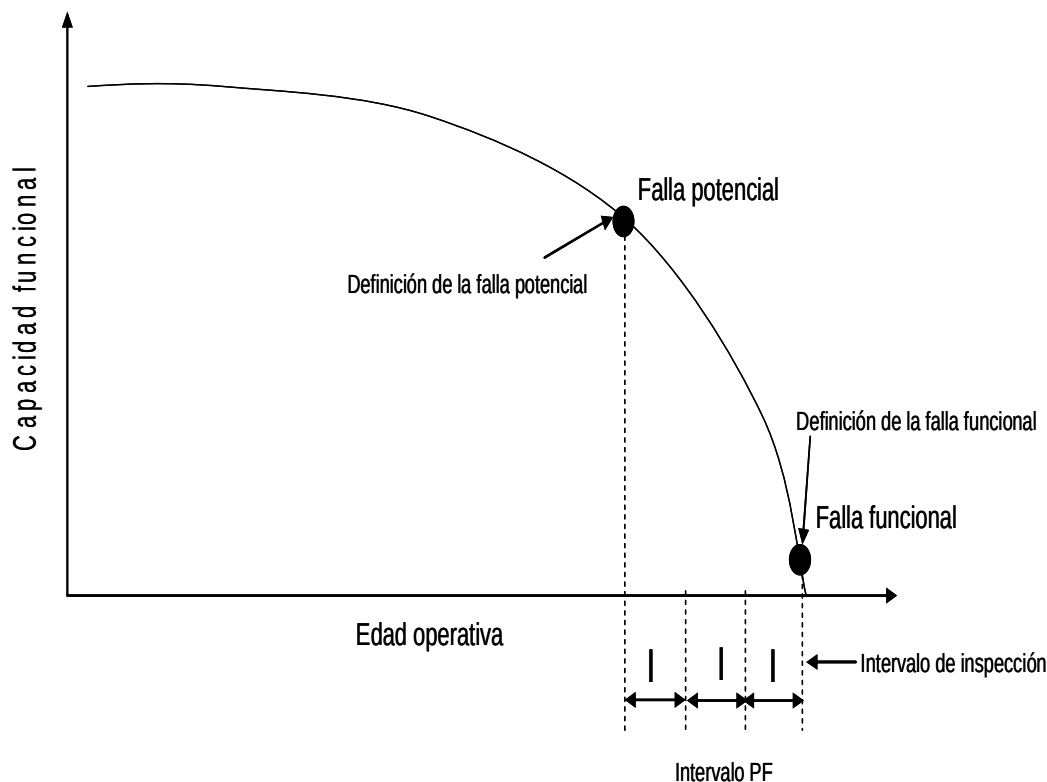


Figura 16. Curva PF para la determinación del intervalo de tareas a condición.

A. Identificando la falla funcional.

La falla funcional se presenta cuando un elemento deja de realizar una acción normal o característica o disminuye esta acción dentro de unos límites de funcionalidad especificados por el usuario. Estas fallas funcionales son identificadas durante el análisis de modos de fallas y efectos.

B. Identificando la falla potencial.

La falla potencial identifica una condición o un nivel específico de degradación. Para determinar la aparición de una falla potencial, se hace necesario realizar el seguimiento de las variables que se determinen inicialmente como fundamentales para el componente o equipo y que a su vez proporcionen información de la disminución de la capacidad funcional de los componentes. La determinación de las variables de seguimiento depende de las técnicas a usar en las tareas a condición.

Para determinar dichas variables se debe analizar primero las fallas funcionales de cada componente, identificadas mediante el FMECA y definir mediante que técnicas se puede identificar el estado operacional de dichas fallas funcionales. Una vez identificadas las técnicas de inspección se deben definir las variables que se obtienen y la frecuencia de seguimiento de las mismas, con el fin de identificar en el tiempo el estado de la función operacional.

C. Determinación del intervalo PF.

Las tareas a condición están basadas enteramente en los intervalos PF, por este motivo se hace necesaria su identificación. El intervalo PF, tiene un alto grado de variación entre dos componentes similares y difieren a causa de sus condiciones operacionales y el entorno operativo donde se encuentren. Para determinar el intervalo PF se conocen varias formas, entre ellas se encuentran los métodos de pruebas de laboratorio, métodos analíticos, evaluación de datos operacionales, juicios de ingeniería basados en datos empíricos de operadores y mantenedores.

D. Determinación de intervalos de inspección dentro de la curva PF.

El intervalo de inspección y PM se realiza en una fracción del intervalo PF, se puede determinar este intervalo de la siguiente forma:

$$I = \frac{PF}{n}$$

Donde:

I = Intervalo de inspección.

PF = intervalo PF.

n = número de inspecciones durante el intervalo PF.

Este intervalo de tiempo depende de las consideraciones técnicas, económicas y de seguridad que se requieran de acuerdo al análisis del FMECA y el impacto que se quiera disminuir o eliminar de la operación. Asignando una adecuada probabilidad de falla para detectar una probable probabilidad de falla se puede determinar el número de inspecciones.

$$n = \frac{\ln(P_{acc})}{\ln(1 - \theta)}$$

Donde:

n = Intervalo de inspección.

θ = Probabilidad de detectar una falla potencial con una ocurrencia propuesta y suponiendo que existe la falla potencial.

P_{acc} = Aceptable probabilidad de falla.

2.6.9 Costos

Para realizar la comparación entre los costos de las diferentes actividades de mantenimiento a implementar dentro del programa de RCM y definir la que técnica y económicamente presente mayores ventajas para la operación del sistema, se deben tener en cuenta costos como: costos por hora de funcionamiento de la unidad, costos por mano de obra, costos por ciclo de producción, entre otros. Para realizar esta evaluación se deben tener en cuenta la tabla de costos (tabla 9), e implementar su evaluación para cada rutina de mantenimiento.

Tabla 4. Costos asociados a la operación

TAREA	COSTO POR UNIDAD DE LA OPERACIÓN.
Servicio y Lubricación	$SL_{op} = \frac{C_{SL}}{I_{SL}}$ Donde: • SL_{op} = Costo de la tarea de Servicio y lubricación. • C_{SL} = Costo de una tarea de SL. • I_{SL} = Intervalo de la tarea.
Tareas a condición	$OC_{op} = \frac{((C_{oc}/I_{oc}) * (L - (I_i - I_{ic})))}{L} + C_R / MTBF$ Donde: • OC_{op} = Costo de la tarea a condición. • C_{oc} = Costo de una inspección (materiales, labor, sin incluir el costo de reparación). • L = Tiempo de vida útil por diseño. • I_i = Intervalo inicial de inspección. • I_{oc} = Intervalo de la tarea. • C_R = costo promedio de reparación (incluye fallas funcionales y potenciales. Incluir costos operacionales). • $MTBF$ = Tiempo medio entre fallas.
Búsqueda de fallas ocultas.	$FF_{op} = C_{FF} / I_{FF} + C_R / MTBF$ Donde: • FF_{op} = Costo de la tarea de búsqueda de fallas. • C_{FF} = Costo de una inspección • I_{FF} = Intervalo de la tarea. • C_R = Costo promedio de reparación (incluye fallas funcionales y potenciales. Incluir costos operacionales). • $MTBF$ = Tiempo medio entre fallas.
No PM (mantenimiento preventivo)	$NO_{op} = C_R / MTBF$ Donde: NO_{op} = Costo de la tarea no preventiva. • C_R = Costo promedio operativo. (incluye fallas funcionales y potenciales. Incluir costos operacionales). • $MTBF$ = Tiempo medio entre fallas.
Otras acciones	$OA_{op} = C_{OA} / L_R$ Donde: • OA_{op} = Costo operativo de otras acciones. • C_{OA} = Costo de otras acciones. • L_R = Tiempo remanente del sistema.

2.6.10 Solicitud de ejecución de “Root Caused Analysis” - RCA (ANALISIS CAUSA RAIZ)

Si no es posible encontrar una tarea de mantenimiento que satisfaga las condiciones de operatividad y se pueda realizar sin incurrir en un sobre costo de

mantenimiento y además sus consecuencias operacionales son demasiado altas si se presenta una falla, se hace necesario realizar un análisis causa raíz.

La estructura del programa de mantenimiento, permite disponer de un análisis RCA una vez se haya realizado la labor de las FMECA y una vez se haya construido la base de mantenimiento en el RIM. La estructura de planta descrita anteriormente y los datos del sistema de FMECA proporciona una idea general de los diferentes problemas que se puede presentar dentro de una estructura. Los análisis de RCA retroalimentan esta información a través del estudio de casos particulares que en otras estructura de planta no se presentan, aumentando la información de mantenimiento de un sistema.

Como se mencionó anteriormente, se debe llevar a cabo una codificación de las fallas y los modos de falla (anexo 3) con el fin de mejorar el proceso de interpretación y análisis de la base de datos y contribuir con el proceso RCA en forma más dinámica, facilitando la recolección de la información o evidencia de falla.

2.7 IMPLEMENTACIÓN DEL RCM.

El programa de mantenimiento desarrollado en la etapa anterior contiene los elementos necesarios para permitir una correcta migración entre planes de mejoramiento. Para completar esta tarea se hace necesario introducir todas las rutinas de mantenimiento dentro del programa CMMS que se tenga para el gerenciamiento del mantenimiento. Partiendo de los planes de mejoramiento diseñados a través del RCMcost, y el diseño logístico que se construyó, se hace el proceso de migración de la información hacia el CMMS teniendo en cuenta las implicaciones y requerimientos de información que se han descrito anteriormente.

Esta etapa de implementación, comprende las siguientes actividades como se puede observar en el diagrama 3 “implementación de planes de mantenimiento”:

2.7.1 Conversión de reportes RCM a formato CMMS.

Los formatos para el RCM desarrollados a través del RCMcost, se deben introducir al sistema Datastream 7i, través de la conversión de los mismos en formato Excell³. Posteriormente se realiza el cargue de los formatos “.xls” al Datastream 7i, con la herramienta que contiene este CMMS para tal fin. Se debe tener en cuenta que los reportes no tengan variaciones significativas en su forma, que contengan los mínimos elementos operativos que se llevan actualmente y los nuevos elementos de mantenimiento, con el fin de no generar desconocimiento e incertidumbre entre los mantenedores y supervisores de mantenimiento.

³ Microsoft Corporation

2.7.2 Ejecución pruebas de migración al CMMS.

Una vez se tengan los formatos cargados al Datastream, se debe valorar su contenido y validar que la estrategia de mantenimiento, contenga los elementos con los que originalmente fueron diseñados. Esta verificación se debe realizara antes de poner en marcha el programa de mantenimiento.

2.7.3 Actualización del plan de mantenimiento en el CMMS.

El plan de mantenimiento cargado en el Datastream 7i, se debe actualizar por el plan de mantenimiento RCM desarrollado. Esta actualización consiste en generar los formatos de mantenimiento adecuados, las tareas y rutinas a desarrollar en el proceso diario de mantenimiento, empezando por las rutinas y tareas de los equipos de menor criticidad y aumentando de nivel. Esta labor se realiza con el fin de tener un proceso controlado sobre el programa RCM a implementar.

2.7.4 Verificación de integridad del programa.

Una vez el programa RCM se encuentre integrado al sistema de información CMMS, se debe poner a consideración de los mantenedores y supervisores de área con el fin de verificar que el programa de mantenimiento sea el adecuado y pueda ser desarrollado por la organización, se debe valorar el programa buscando la completa integridad del mismo dentro de las tareas y rutinas de mantenimiento. Esta segunda revisión se hace necesaria para evitar problemas de sesgado en las rutinas de mantenimiento o pérdida de información en el momento de la transferencia o migración de programas. A su vez esta verificación se realiza acompañada de la implementación de los ajustes logísticos necesarios, complemento del programa RCM.

2.8 SEGUIMIENTO EFECTIVIDAD DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO.

La verificación de la estrategia de mantenimiento se realiza a través de la identificación de indicadores de desempeño claros que permitan medir la efectividad de las tareas de mantenimiento implementadas a través del RCM.

Para establecer una estrategia de mantenimiento efectiva, se necesita de indicadores que midan las tareas de mantenimiento ejecutado en planta, teniendo en cuenta:

- La complejidad operacional y estructural de la planta o instalación
- La dinámica de la relación entre producción y mantenimiento. Esto indica cual es el beneficio sobre el producto al aplicar las rutinas de mantenimiento RCM.

- La relación entre la estrategia de mantenimiento, la carga de trabajo de mantenimiento y la disponibilidad de recursos. Son indicadores claros de mantenibilidad que aseguran que la labor se este realizando adecuadamente con el mínimo de recursos y la máxima productividad operativa.

Estos procesos analizados correctamente permiten seguir la efectividad de la estrategia de mantenimiento. Como resultado de la evaluación de estos indicadores se pueden obtener las lecciones aprendidas y las recomendaciones de mejoramiento propias de la implantación del programa de RCM. Este último proceso de medición de las recomendaciones de mejoramiento, proporciona un bucle de retroalimentación que permite optimizar la estrategia de mantenimiento, al definir parámetros de mantenimiento y rutinas claves en el mejoramiento continuo.

Esta etapa de implementación, comprende las siguientes actividades como se puede observar en el diagrama 3 “implementación de planes de mantenimiento”:

2.8.1 Cálculo de indicadores del proceso RCM

A partir del plan de mantenimiento implementado y su verificación, dependiendo de la información de operación y mantenimiento con la cual se cuente, se desarrollan indicadores de proceso, que midan aspectos como:

- Efectividad den el cumplimiento de las órdenes de trabajo programadas.
- Efectividad en la programación de las actividades.
- Efectividad de los análisis de predictivo.
- Efectividad de las órdenes de compra.
- Evaluación de la gestión de servicios externos.
- Horas de trabajo hombre por labor.
- Disminución en costos de mantenimiento con la estrategia RCM.

2.8.2 Análisis de indicadores de proceso RCM.

Con base en un beckmarking adecuado, se analizaran los indicadores de proceso RCM desarrollados para medir la efectividad en la gestión del mantenimiento y con ello visualizar el desempeño del programa de mantenimiento y las oportunidades de mejoramiento que se puedan encontrar dentro de la estrategia.

2.8.3 Generación y divulgación de lecciones aprendidas.

Las lecciones aprendidas sobre la estrategia de mantenimiento con base en RCM, deben ser documentadas y divulgadas con el fin de crear un sistema de gestión del conocimiento en torno al proceso de RCM y replicar las buenas practicas de mantenimiento encontradas.

2.8.4 Definición de recomendaciones de mejoramiento de RCM

El proceso de mejoramiento continuo implementado dentro del plan de mantenimiento a partir del RCM, permite identificar las oportunidades de mejoramiento del mismo proceso y definir las recomendaciones adecuadas dentro del proceso, que contribuyan a la optimización del mismo.

3 DESARROLLO DEL MODELO DE GESTIÓN

3.1 EVALUACIÓN PRELIMINAR DE CONDICIONES

La evaluación de condiciones preliminar nos permite observar la mantenibilidad del equipo que se quiere intervenir y mejorar su condición. Proceso por el cual se definen formatos, para el seguimiento y control de las condiciones y características del equipo mantenible y su entorno laboral.

El estudio preliminar usa el planteamiento de JG FARLO, en el documento para plantas de refinería HC CHEVRON SERVICE HOUSTON - TEXAS, el cual genera una serie de formatos de seguimiento a condiciones y evaluación las tablas de condición de equipos, de áreas de trabajo y de desempeño general, los cuales fueron modificados y ajustados a las condiciones y características tanto de la empresa como de la maquinaria objeto de estudio.

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 5. Evaluación para los filtros.

EVENTO	SINTOMA	CAUSA POSIBLE	SOLUCIÓN
CALIDAD DE AGUA DE SALIDA FUERA DE ESPECIFICACIÓN	- Alta presión diferencial. - Concentración de Sólidos y Aceite mayor a 5 ppm - Caudal de filtración menor al operativo.	- Switch De presión descalibrado. - Calidad de agua de alimentación mayor a 60 ppm de aceite y sólidos en agua. - Perdida de lecho filtrante. - Lecho filtrante cumplió su ciclo de vida. - Sistema de desnates (Tanques de desnate y Filtros) no funciona bien. - No Inyección de Clarificadores a cada punto de la línea de llegada de la Bateria Monal y Bateria Satélite. - Ciclo de lavado presenta fallas.	- Verificar y Revisar Switch de presión por el instrumentista. - Avisar a la batería que esta mandando mala calidad para que tome correctivo. - Realizar un desnate especial con camiones de vacío. - Lavado especial a los filtros. - Verifique el nivel de lecho filtrante mensualmente, en caso de detectarse pérdidas mayores al 10% en nivel se deben hacer análisis de la causa. - Realizar cambio de lecho filtrante. - Revisar y ajustar el sistema de control en el tanque desnatador y separadores - Revisar taponamientos o daños en la línea de desalojo de crudo del tanque desnatador. - Ajustar tratamiento químico a lo largo del sistema. - Revisión en campo de la operación del ciclo de vida.

Fuente: Hernández.

EVENTO	SÍNTOMA	CAUSA POSIBLE	SOLUCIÓN
ALTO NIVEL	• Alto Flujo de agua filtrada y dulce. • Activación de la alarma de alto nivel. • Activación de la alarma de alto-alto nivel. • Bajo flujo de agua de inyección. • Aumento de operación de las Bombas de inyección. • Activación del sistema de Shutdown.	• Mayor Volumen de transferencia de las Baterías Satélite y Monal. • Mayor volumen de transferencia de agua dulce de la estación Booster. • Bombas de inyección aireadas. • Daño de cheques en la descarga de las bombas. • Giro invertido de las bombas cuando se han presentado trabajos de ampliación de subestación o mantenimiento de un motor eléctrico. • Falla en el lazo de control, descalibración del Magnetrol y transmisor de nivel.	• Regular transferencia de flujo de baterías. • Sacar de línea Arenas – Booster, vía Scada o por medio de un recorredor. • Revisar bombas de inyección y realizar desaireación. • Sacar de servicio la bomba y cerrar válvula de descarga y realizar cambio de cheque. • Verificar giro de bombas. • Verificar y calibrar Magnetrol y transmisor de nivel.
NO VISUALIZACIÓN EN EL PLC	• No se registra visualización de niveles y bombas en operación.	• Falla tarjetas y/o fusibles de control. • Cables sueltos	• Cambiar tarjeta, modulo y/o fusibles afectados. • Ajustar bornas-cableado.

Fuente: Hernández.

Tabla 6. Cuantificación Probabilidad de Falla

CUANTIFICACIÓN	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS
30 +	La condición de los filtros y su desempeño son muy bajos. La actuación está por debajo de la equivalencia. La acción inmediata es urgente.
20 – 30	La condición de los filtros y su desempeño son medias, esta en una condición critica de operación. Usted necesita realizar una acción importante.
10 – 20	Usted ha entendido la importancia de la condición de funcionamiento de los filtros de inyeccion. Más progreso puede hacerse, mejorar la actuación y desempeño del equipo.
5 – 10	Progreso significativo se ha hecho, o puede ser el énfasis en el mejoramiento de condición de los filtros. Mantenga el trabajo en buenas condiciones.
1 < 5	Bien hecho! Usted está en buen camino de perfeccionamiento de la condición y operación. Trabaje hacia el cero de las Averías.

Fuente: Hernández.

3.2 ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Para determinar la importancia de un equipo 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 generales.

- 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 seis “Áreas de Impacto”:

- Salud.
- Seguridad de Activos y procesos.
- Medio Ambiente.
- Comunidades y Reputación.
- Seguridad Física.
- Viabilidad de la Operación.

Tabla 7. Efectos de las Fallas

MATRIZ DE DEFINICIÓN DEL NIVEL DE ANÁLISIS										
CONSECUENCIAS						PROBABILIDAD DE OCURRENCIA				
SALUD	SEGURIDAD DE ACTIVOS Y PROCESOS (Costos operacionales)	MEDIO AMBIENTE	COMUNIDADES Y REPUTACIÓN	SEGURIDAD FÍSICA PERSONAS	VIABILIDAD DE LA OPERACIÓN (% desviación - tiempo suspensión)	Nunca se ha escuchado en la industria	Se ha escuchado o ha ocurrido en la industria	Ha ocurrido en la operación en nuestra Compañía	Ocurre varias veces al año en la operación en la Compañía	Ocurre varias veces al año en el sitio, en la Compañía
Ninguna lesión ni daño a la salud.	Daño gto pérdida cero. 5UK\$ < X < 20UK\$.	Efecto Cero: No hay daño al ambiente.	No impacto.	No impacto.	0					1
Lesión o efecto leve en la salud: incidentes con primeros auxilios - FAC	Daño gto pérdida leve: No hay interrupción del proceso. 21UK\$ < X < 50UK\$.	Fuga y derrame leve < 1 bl en áreas industriales o sobre áreas aledañas < 100 m2	Impacto leve: se afecta a un individuo.	Hurto	< 5%					2
Lesión o efecto menor en la salud: incidentes con MTC, RVC y LVC <= 3 días.	Daño gto pérdida menor: posible interrupción del proceso; el equipo debe ser aislado. 51UK\$ < X < 100UK\$.	Fuga/derrame menor en áreas industriales: 1 < X < 7 bl sobre entorno con actividad económica	Impacto limitado: Preocupación pública local. Afecta de 1 a 10 familias.	Atraco	5 - 10%					3
Lesión o efecto mayor en la salud: incidente incapacitante LVC > 3 días.	Daño gto pérdida local: interrupción del proceso, equipo fuera de servicio. 101UK\$ < X < 500UK\$.	Incumplimiento legal repetitivo. Numerosas quejas.	Impacto considerable: Preocupación del público regional. Afecta comunidad pequeña: 11 a 100 familias.	Extorsión/Agresión	11 - 20%					4
Incapacidad total permanente ó 1 a 3 fatalidades a partir de accidente o enfermedad profesional.	Daño mayor: pérdida parcial del equipo; interrupción del proceso por más de dos semanas con costos > 500UK\$.	Efecto mayor: Daño ambiental severo. Fuga/derrame mayor: 70 - 700 bl.	Impacto nacional mayor: Preocupación pública nacional. Afecta comunidad de más de 100 familias.	Secuestro	21 - 30 %					5
Fatalidades múltiples a partir de accidente o enfermedad profesional.	Daño extensivo: pérdida total del equipo; costo estimado de reparación > 1UK\$500.	Efecto masivo: Daño ambiental persistente severo o afectación severa extendida en una gran área.	Impacto internacional: Atención pública internacional	Homicidio	> 30%					6
						A	B	C	D	E
NOE NIVEL 1: POTENCIAL BAJO NIVEL 2: POTENCIAL MEDIO NIVEL 3: POTENCIAL ALTO										

Fuente: Hernández

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, E.

La tabla 6, muestra la ponderación que permiten evaluar el estado actual del sistema o equipo, de acuerdo al número de fallas que se presentan en un periodo dado. La Tabla 6, muestra los criterios con su respectivo valor.

Tabla 8. Frecuencia de Falla

CRITERIO	VALOR
Sumamente improbable: menos de 1 evento en 5 años	1
Improbable: 1 evento en 3 años	2
Posible: 1 evento al año	3
Probable: entre 1 y 2 eventos al año	4
Frecuente: mas de 3 eventos al año	5

Fuente: Hernández

La tablas 9, 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.

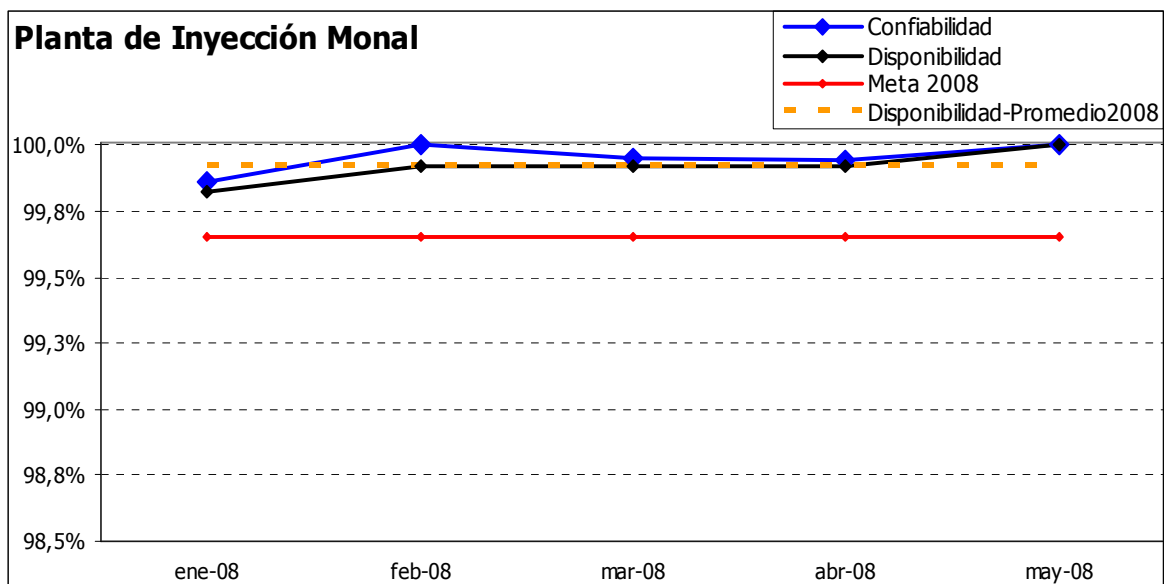
Tabla 9. Probabilidad de falla.

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: Hernández

Figura 17. Confiabilidad y disponibilidad PIA Monal.



Fuente: Hernández

Tabla 10. Criticidad del sistema

FILTRO DE AGUA	PROBABILIDAD DE FALLA	EFECTO	CRITICIDAD
Valvula entrada Sulfactante	BAJA	M	1
Valvula entrada Retrolavado	BAJA	M	1
Valvula entrada Agua Filtracion	ALTA	A	10
Valvula salida Drenaje	BAJA	M	1
Valvula salida Retrolavado	BAJA	M	1
Valvula salida Agua Filtracion	ALTA	A	10
Valvula salida Drenaje Gas	BAJA	M	1
Valvula de Seguridad.	ALTA	M	1
Lecho Filtrante.	BAJA	M	1

Fuente: Hernández

3.3 CREACIÓN DEL EQUIPO RCM

Con el Objetivo de tener más parámetros de juicio para el análisis de los modos de falla, se propone conformar un equipo reducido interdisciplinario, para obtener información de forma sistemática al conocimiento y experiencia de cada integrante del grupo, con el objetivo de generar un analisis realista de los procesos estudiados.

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, un técnico (según la especialidad de equipos ya sean 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 planta de Inyección de agua.. El grupo interdisciplinario para la evaluación y análisis de los modos de falla de los filtros de inyección de agua es:

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

3.4 ANÁLISIS FUNCIONAL PLANTA DE INYECCION AGUA.

- **Nombre del sistema. FILTRADO DE INYECCIÓN DE AGUA – SAN FRANCISCO**

Función. La planta de tratamiento e inyección de agua Monal recibe las aguas de proceso provenientes de las Baterías de producción Monal y satélite, la función de esta planta es retirarle el crudo, los sólidos y demás residuos que están presentes en el agua, suministrando agua tratada más agua dulce obtenida de pozos abastecedores de agua para el sistema de inyección a pozos y tratando los residuos de manera tal que generen un impacto ambiental mínimo basándose en la política de Operaciones Limpias de la compañía.

La capacidad de la planta de inyección de agua es de 220.000 BWPD, con stand by para 20.000 BWPD

La planta de inyección de agua esta dividida en ocho áreas a saber:

Área 1: Desnatadores y recirculación de crudo

Área 2: Bombas de retrolavado

Área 2a: Tanques y Bombas de Filtración

Área 3: Tanque de filtración.

Área 4: Tanques y bombas de inyección de Agua

Área 5: Decantadores y lechos de secado

Área 6: Subestación

Área 7: Suministro de gas, Suministro de aire y tanque auxiliar

Área 8: Centros de control de motores y PLC.

A las ocho áreas mencionadas arriba, se adicionan el sistema de suministro de agua externa y los sistemas de recolección y transferencia de aguas asociadas ubicadas en las baterías Monal y Satélite.

- **Límites.** Manifold ó campo de entrada o succión y manifold (Filtro) de salida o descarga.
- **Entradas.** Agua de producción asociada (agua de formación y agua dulce), gas a 40-60 psi para los filtros.
- **Salidas.** Agua filtrada y partículas de aceite.

Características operacionales: Setting por Baja succión 20 psi, alta presión de descarga 1200 psi, toman agua de los tanques de inyección a un caudal de 17.000 BPD. Por lavado, depositando el producto del lavado en cualquiera de los tanques decantadores.

- **SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA EXTERNA.**



Figura 18. Estación Booster.

El sistema de inyección de agua del campo San Francisco cuenta con suministro de agua externa proveniente de los pozos Arenas 3, 4, 5 y 6 los cuales proveen 22000 bbls de agua diaria hacia la planta de inyección.

El sistema de suministro de agua externa transfiere agua desde la estación Booster hasta la planta de inyección a través de una línea de "10φ. Ver Figura 18.

El control de presión en la línea de suministro y presión de descarga de bombas en la estación de rebombeo, se realiza mediante la válvula controladora de presión "6φPCV 300 (Back Pressure Valve).

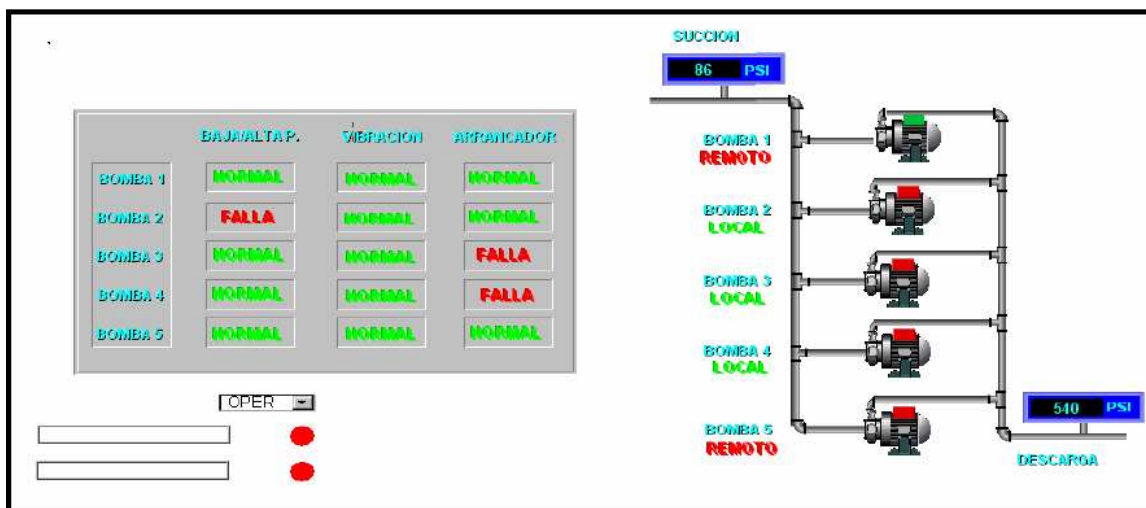


Figura 19. Sistema de suministro de agua externa.

- **BOMBEO DE AGUA DE PRODUCCIÓN O DE PROCESO.**

De los tanques de almacenamiento, ubicados en las baterías Monal (ABJ-105) y Satélite (ABJ-205) respectivamente, se bombea agua asociada hasta la planta de inyección de agua. Para tal fin se tienen cinco (5) bombas de transferencia en Monal y cuatro (4) bombas en Satélite. El agua de Satélite es conducida por dos líneas de "8φ que se conectan a la línea del sistema de Monal de 16" en la entrada de la planta.

Por medio de un juego de válvulas ubicadas a la entrada de la planta, el agua proveniente de la Batería Satélite es conducida hacia los tanques TD-301 y TD-302 y el agua de Monal al Tanque TD-501. Además se tiene la opción de manejar el agua de las dos Baterías en cualquier tanque. También se cuenta con un by pass de 8" para poder realizar mantenimiento a cualquiera de los tres tanques. Ver Figura 2.

En la línea de entrada a la planta de la Batería Satélite se tiene una válvula de bola actuada neumáticamente SDV 301 y el medidor de flujo FE-301, con su respectivo bypass de 8φ; y en la línea de entrada de Monal se tiene la válvula SDV-303 con su respectivo bypass. Ver Figura 20.

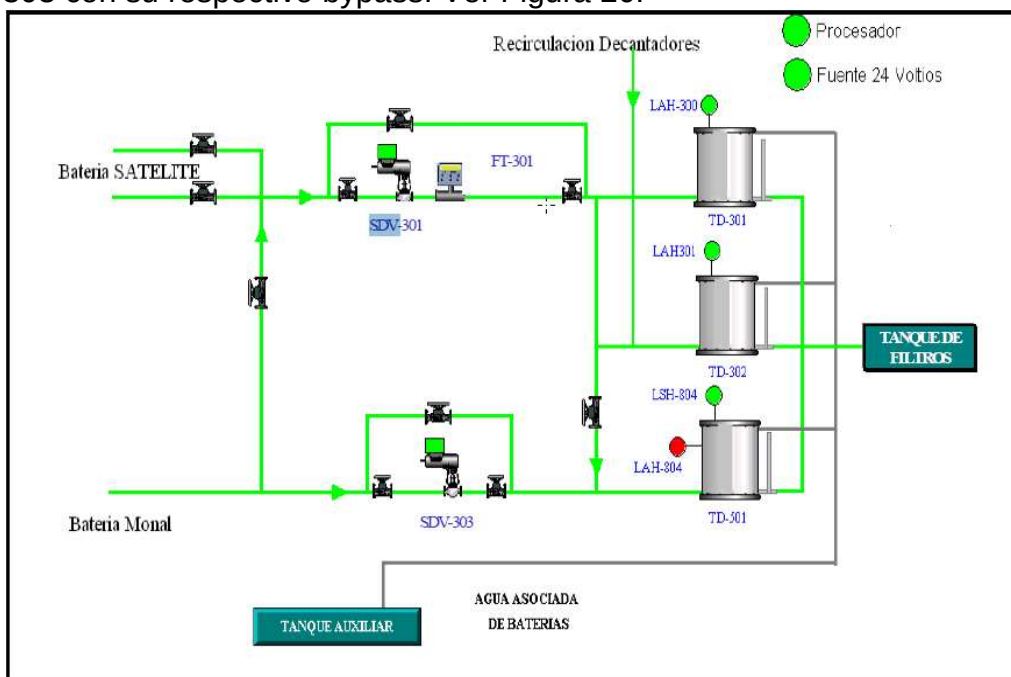


Figura 20. Bombeo de Agua de producción hacia la Planta de inyección de agua

- **SISTEMA DE APLICACIÓN DE QUÍMICOS.**

En la planta de inyección de agua existe un sistema para la aplicación de químicos (Ver Figura 21) en donde se adicionan los siguientes compuestos químicos:

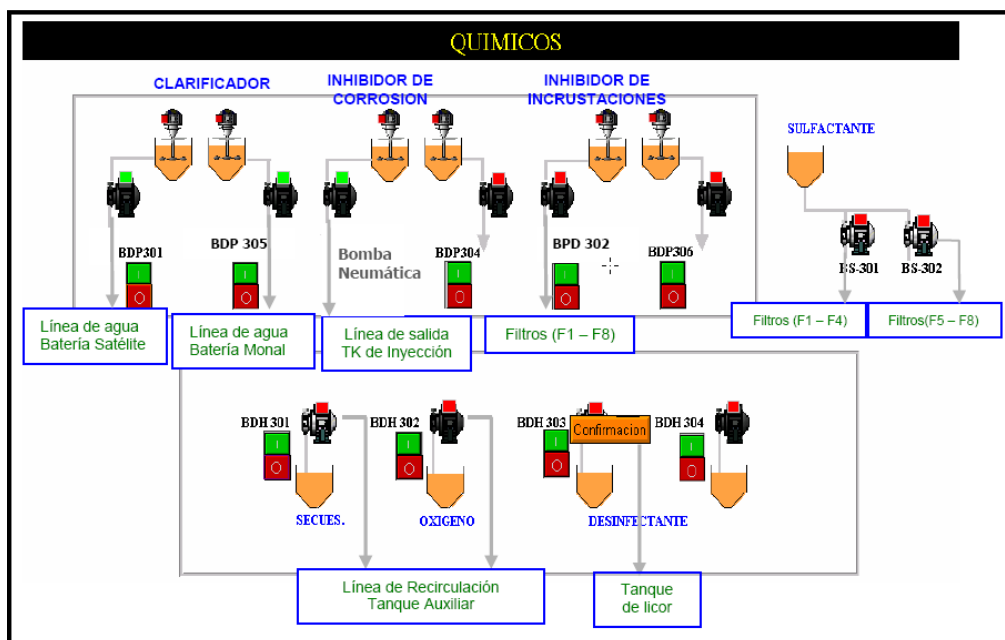


Figura 21. Sistema de Inyección de Químicos

Clarificador: El clarificador es un Polielectrolito cationico soluble en agua que se usa con el objeto de aglutinar el aceite y los sólidos presentes en el agua y formar partículas grandes y densas de floculo que sedimentan rápidamente.

Se aplica de forma continua a las líneas de entrada de los tanques desnatadores provenientes de cada batería de producción (Monal y Satélite). Se utilizan dos bombas para suministrar el clarificador, una es la bomba BDP-301 para la línea de agua proveniente de la Batería Satélite y la otra es la bomba BDP-305 para la línea de agua proveniente de la Batería Monal. Las siguientes son las características Físicas y Químicas del producto:

FORMA	Líquido
COLOR	Azul mate
OLOR	Suave
PUNTO DE EBULLICION	100 °C 212 °F
TEMPERATURA DE FUSION	0 °C 32 °F
GRAVEDAD ESPECIFICA	1.02 - 1.04
SOLUBILIDAD (en agua)	Completamente
pH	1.7 – 2.1
PUNTO DE ENCENDIDO	>100 °C 212 °F

Biocida: Permite controlar la proliferación de las bacterias y especialmente las sulfato-reductoras existentes en las aguas de formación y atravesar rápidamente la película formada las Bacterias sulfatorreductoras que ocasionan severos problemas como taponamiento y corrosión.

Se aplica en la línea de transferencia de Monal que va al Tanque desnatador TD 501 y en la línea de transferencia de Satélite que va a los Tanques desnatadores TD 302 y TD 301. Se aplica por baches, una caneca por semana de Biocida Tipo Amonio y otra semana el Biocida tipo Glutaraldehido.

Biocida Tipo Amonio: Las siguientes las propiedades físicas y químicas del producto suministrado:

FORMA	Líquido
COLOR	Amarillo claro
OLOR	Suave
PUNTO DE EBULLICION	NE
TEMPERATURA DE FUSION	NA
PUNTO DE INFLAMACION	25 °C
TEMPERATURA DE AUTOIGNICION	Isopropanol 455 °C
LIMITES DE EXPLOSION	Isopropanol
Inferior 2 %	
Superior 12 %	
PRESION DE VAPOR	Isopropanol 33 mmHg
DENSIDAD RELATIVA (@20-25°C)	0.934 - 0.954
SOLUBILIDAD (en agua)	Completamente
pH	6.8 - 7.8
COEFFICIENTE DE REPARTO	NE
VISCOSIDAD	NE
DENSIDAD COMPACTADA	NA
PUNTO DE CONGELACION	NE
PUNTO DE FLUIDEZ	NE
Abreviación: NE = no evaluado	NA = no se aplica

Biocida Tipo Glutaraldehido: Las siguientes las propiedades físicas y químicas del producto suministrado:

COLOR	Claro
FORMA	Líquido
DENSIDAD	9.38 lbs/gal
SOLUBILIDAD EN AGUA	Completament e
GRAVEDAD ESPECÍFICA	1.13 @ 68 °F
PH (puro)	3.1 - 4.5
VISCOSIDAD	22.1 CPS @ 60°F
PUNTO DE CONGELACIÓN	-5.8°F / -21°C
PUNTO DE DERRAME	2 °F
PUNTO DE EBULLICIÓN	213°F @ 760 mm Hg
PUNTO DE ENCENDIDO	Ninguno
PRESIÓN DEL VAPOR	16 mm Hg @ 60° F

Inhibidor de Corrosión: Es una sustancia que cuando se añade al fluido, disminuye la rata de ataque del fluido sobre el metal ayudando a proteger este. Las características de calidad del agua que más influyen sobre el índice de corrosión son los gases disueltos, especialmente el oxígeno disuelto, y el pH que cuando es bajo tiene tendencia a la corrosividad del agua.

Se aplica en la línea de salida de agua de los tanques de inyección mediante una bomba neumática. El inhibidor aplicado en la PIA es de tipo Amina cuaternaria y sales imidazolinias en alcohol que tiene las siguientes Propiedades Físicas y Químicas:

COLOR	Amarillo claro
FORMA	Líquido
DENSIDAD	7.9 lbs/gal
SOLUBILIDAD EN AGUA	Soluble
GRAVEDAD ESPECÍFICA	0.95 @ 60 °F
PH (puro)	4.1
VISCOSIDAD	15 cst @ 60°F
PUNTO DE ENCENDIDO	60 grados F (CC)

Inhibidor de incrustaciones: Es una sustancia que previene la formación de incrustaciones ocasionadas principalmente por los depósitos de Carbonatos de calcio, sulfatos de bario y estroncio.

Se aplica de forma continua en la línea de entrada de los filtros de antracita (F1 al F8) mediante la bomba BPD 302. El inhibidor de incrustaciones aplicado en la PIA es una solución acuosa de amina fosfonometilada y ácido hidrocórico, que tiene las siguientes propiedades Físicas y Químicas:

COLOR	Café oscuro turbio
OLOR	Dulce
FORMA	Líquido
DENSIDAD	9.75 - 10.33 lbs/gal
SOLUBILIDAD EN AGUA	Completamente
GRAVEDAD ESPECÍFICA	1.17 - 1.24 @ 61 °F
PH (puro)	≤ 1.0
VISCOSIDAD	15 cps @ 60°F
PUNTO DE ENCENDIDO	Ninguno
PUNTO DE DERRAME	7 °F

Surfactante: Es un jabón limpiador y desengrasante acuoso biodegradable. Se aplica en los filtros con antracita (F1 al F8) durante un paso de retrolavado de

filtros de antracita mediante dos bombas, la bomba BS 301 para los filtros F1 al F4 y la bomba BS 302 para los filtros F5 al F8.

Secuestrante de oxígeno: Es una solución de bisulfito de sodio, su principal aplicación es controlar la corrosión eliminando el oxígeno disuelto presente en las líneas de agua, con el fin de evitar la corrosión.

Se aplica en la zona de residuos de forma continua en la línea de recirculación al tanque auxiliar mediante las bombas del tipo diafragma BDH 301 y la bomba auxiliar BDH 302. Las propiedades físicas y químicas son las siguientes:

COLOR	Anaranjado claro
OLOR	Acre
FORMA	Líquido
DENSIDAD	1.32 grs/cm ³
SOLUBILIDAD EN AGUA	Completa
GRAVEDAD ESPECÍFICA	1.31 @ 15.5 °C
PH (puro)	4.2 – 4.5
VISCOSIDAD	3.1 cps @ 25 °C
PUNTO DE INFLAMACION	Ninguno
PRESION DE VAPOR	32 mm Hg @ 27.8 °C

Hipoclorito de sodio (Desinfectante): Actúa como desinfectante, se emplea para eliminar las bacterias y destruye las moléculas producidas por las bacterias, que son las que causan el mal olor.

Se aplica en la zona de residuos al tanque de licor mediante la bomba del tipo diafragma BDH 303, las siguientes son las propiedades físicas y químicas del producto:

COLOR	Amarillo Paja
OLOR	Ligeramente a Cloro
FORMA	Líquido
DENSIDAD	1.2 @ 20°C (68°F)
SOLUBILIDAD EN AGUA	Completa
PRESION DE VAPOR	12.1 mm de Hg @ 20° C
pH	11.2 – 11.4

- **SISTEMA DE DESNATE.**



Figura 22. Tanques Desnatadores

En el sistema de desnate, se lleva a cabo el proceso de separación de la película superficial de crudo del agua proveniente de las baterías de producción, por medio de skimming flotantes. Dicho proceso se realiza dentro de los tanques desnatadores TD 301, TD 302 y TD-501, los cuales están contenidos por un dique que tiene una capacidad de 4760 bbl en caso de que se presente un derrame, figura 21.

Los tanques desnatadores TD 301 y TD 302 reciben el agua proveniente de la batería Satélite por medio de una línea de 10", tienen una capacidad nominal de 1400 bbls cada uno y una capacidad de Manejo de 35000 bbl/día cada uno para un total de 70000 bbl/día. El agua desnatada sale de los tanques a través de piernas de agua de 10", encargadas de controlar el nivel de los tanques, y pasa al tanque de almacenamiento TF 301 para ser filtrada.

El Tanque TD-501 recibe el agua de la batería Monal por medio de una línea de 10" y tiene una capacidad nominal de 2800 bbls y una capacidad de manejo de 100000 bbl/día. El agua desnatada del tanque sale a través de 2 líneas de 10" y 16" y pasa al tanque de filtros TF-301 para luego ser filtrada.

El crudo de los tres tanques desnatadores sale por tubería de 3" por medio de unos skimmers flotantes al tanque de licor. Ver Figura 21.

La Figura 4. Muestra el sistema interno de los tanques desnatadores TD-301 y TD-302 y la Figura 5. Muestra el sistema interno del tanque desnatador TD-501.

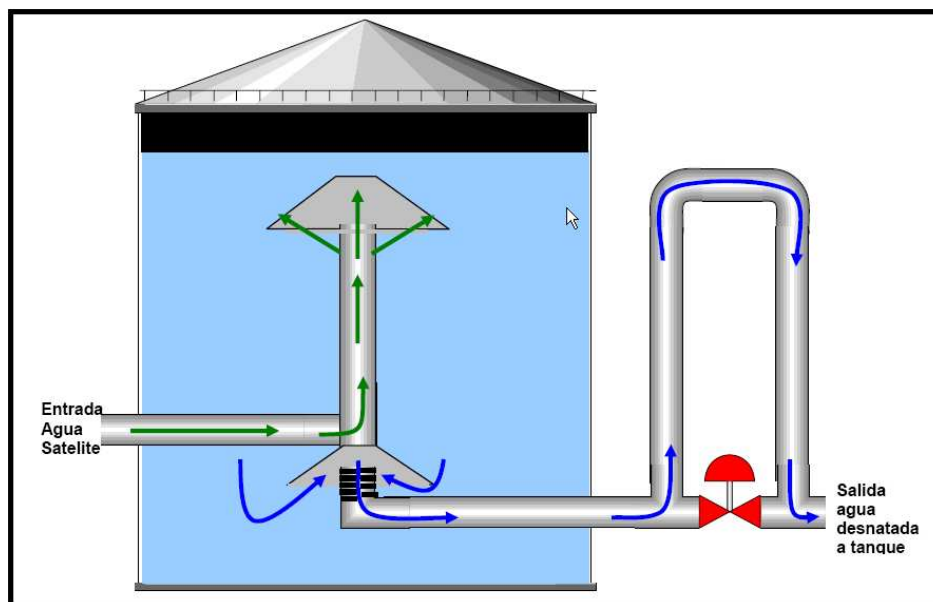


Figura 23. Sistema Interno Tanques Desnatadores 301 y 302

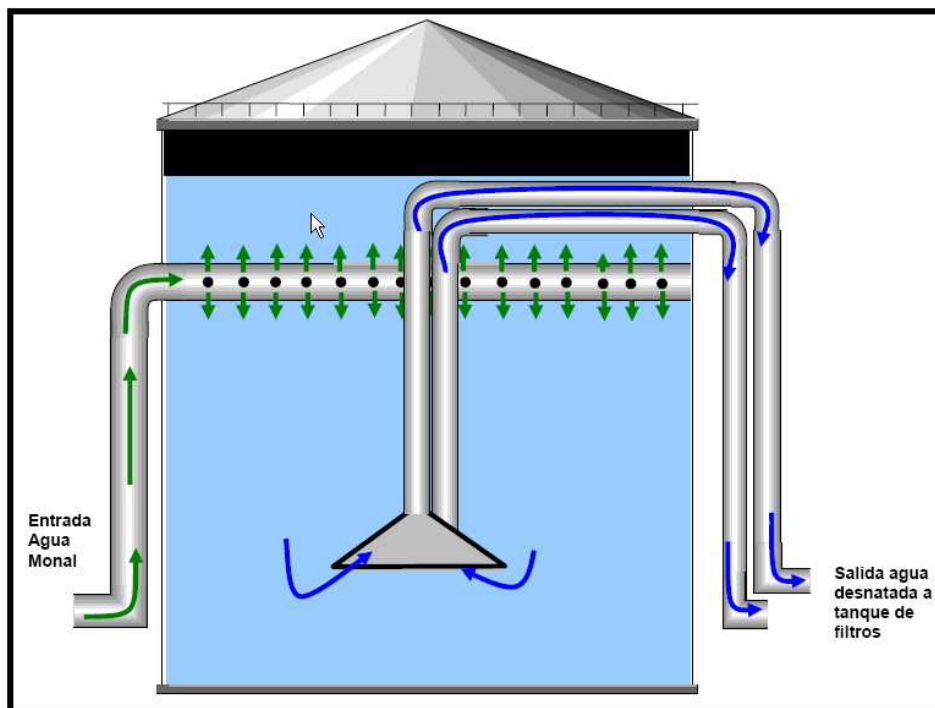


Figura 24. Sistema Interno Tanque Desnatador 501

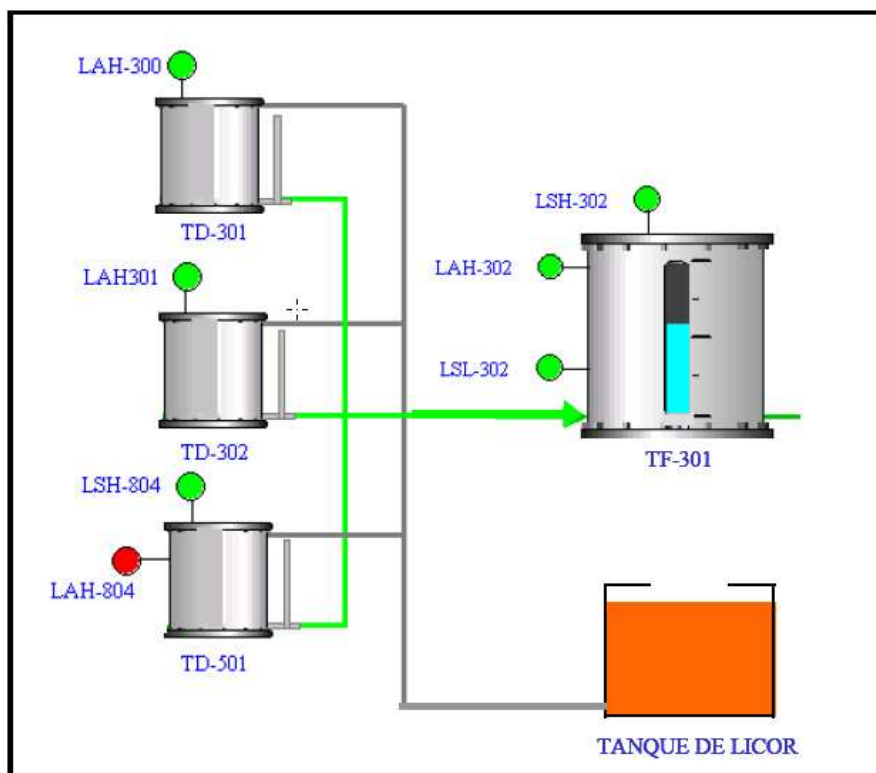


Figura 25. Salida Agua y Crudo de los tanques desnatadores.

Los tanques desnatadores tienen sistema de gas blanket. El gas se regula con las válvulas (PRV 301, PRV 302 y PRV 501). Estas permiten o no la entrada de gas a los tanques. Para protección éstos cuentan cada uno con su válvula de presión y vacío (PVV-301, PVV-302 y PVV-501).

- **TRANSFERENCIA DE CRUDO.**



Figura 26. Transferencia de crudo PIA – Batería Monal.

El crudo separado del agua en los tanques desnatadores sale por medio de unos skimmers flotantes y una línea de 3" hacia el tanque de licor (Figura 27), posteriormente se lleva al tanque auxiliar (Foto 4) usando el sistema de Bombeo que consta de tres Bombas (Bombas de Filtrado de Lechos) BFL-301, BFL-302 y BFL-303 y finalmente es bombeado al Gun barrel de la Batería Monal, Usando las bombas (Bombas de aguas aceitosas) BAA-301A y BAA-301B dispuestas para tal fin. Ver Figura 27.

La presión de la línea de gas a la entrada de la planta está regulada por la válvula PRV-300.

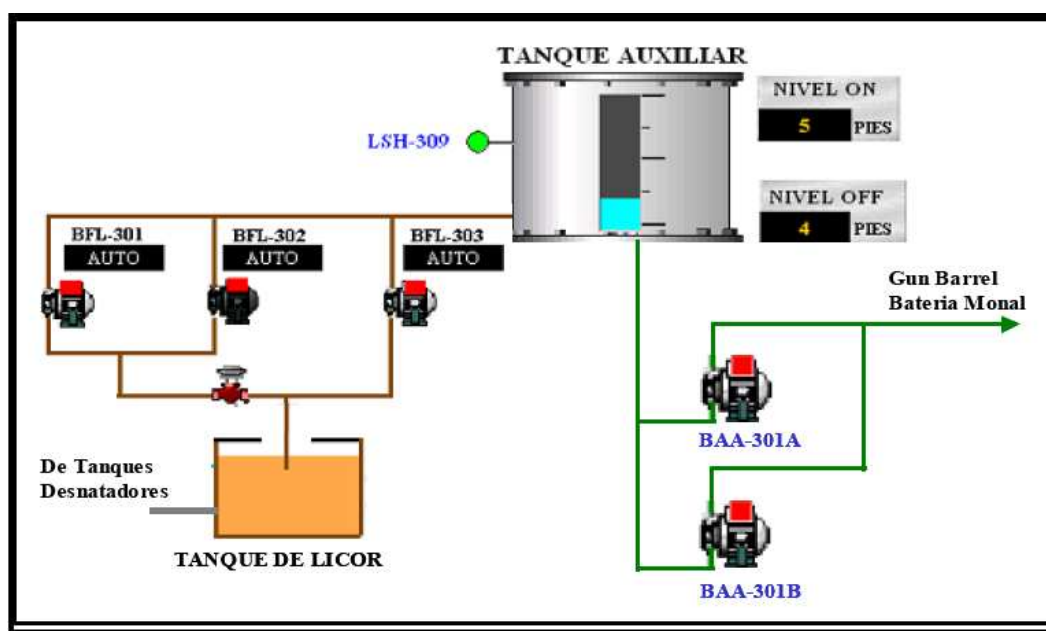


Figura 27. Transferencia de crudo PIA – Batería Monal

- **SISTEMA DE FILTRACIÓN.**



Figura 28. Tanque de Filtros.

La filtración tiene como objetivo primordial la remoción de aceites y sólidos suspendidos del agua asociada. Este proceso se realiza mediante filtros a presión de rata constante, mediante un medio filtrante.

El afluente almacenado en el tanque No. TF-301 (Figura 28) se inyecta al sistema de filtración, este tanque esta contenido en un dique cuya capacidad es de 6700 bbl en caso de que se presente un derrame. Este sistema esta compuesto por 12 Filtros con las siguientes características:

- 8 Filtros de arena antracita:
 - 4 Degremont (F1, F2, F3, F4) con capacidad de 12500 bbl/día cada uno. Ver Figura 29.
 - 4 Baker (F5, F6, F7, F8) con capacidad de 12500 bbl/día cada uno. Ver Figura 30.
- 4 filtros de cáscara de nuez Baker (F9, F11, F12 y F13). Con capacidad de 25000 bbl/día cada uno. Ver Figura 31.



Figura 29. Filtros Degremont (Antracita)



Figura 30. Filtros Baker (Antracita)



Figura 31. Filtros Serk Baker Cáscara de Nuez.

Se cuenta con 10 Bombas de filtración (BF-301/302/303/304/305/306/307/308/309/310). Cada bomba tiene un caudal unitario de 25.000 BPD; que garantiza una alimentación de 250.000 BPD, teniendo una de ellas en reserva. Ver Figura 32.

El funcionamiento consiste en hacer pasar el agua a través del medio filtrante, el cual se encarga de remover los sólidos y aceite presentes en este tipo de aguas. Con el tiempo este lecho de filtración se colmata lo cual hace necesario realizar un lavado, que consiste en remover las partículas de crudo y sólidos depositadas.

El sistema de lavado es diferente para los Filtros con cáscara de Nuez y los Filtros con antracita. A continuación se hace una descripción de cada uno:

Para los Filtros con antracita se utilizan las bombas (BR-301 y BR-302), (Ver Figura 32) que toman agua de los tanques de inyección a un caudal de 17.000 BPD. Por lavado, depositando el producto del lavado en cualquiera de los tanques decantadores.

El lavado se inicia a través de una inyección Agua-Gas en sentido de contracorriente al flujo de filtración.

La función del gas es fluidizar el lecho filtrante antes de realizar el lavado con agua. Una vez el medio se encuentre esponjado se realizará el lavado con agua mediante el sistema de bombas de retrolavado.



Figura 32. Bombas de Filtración.

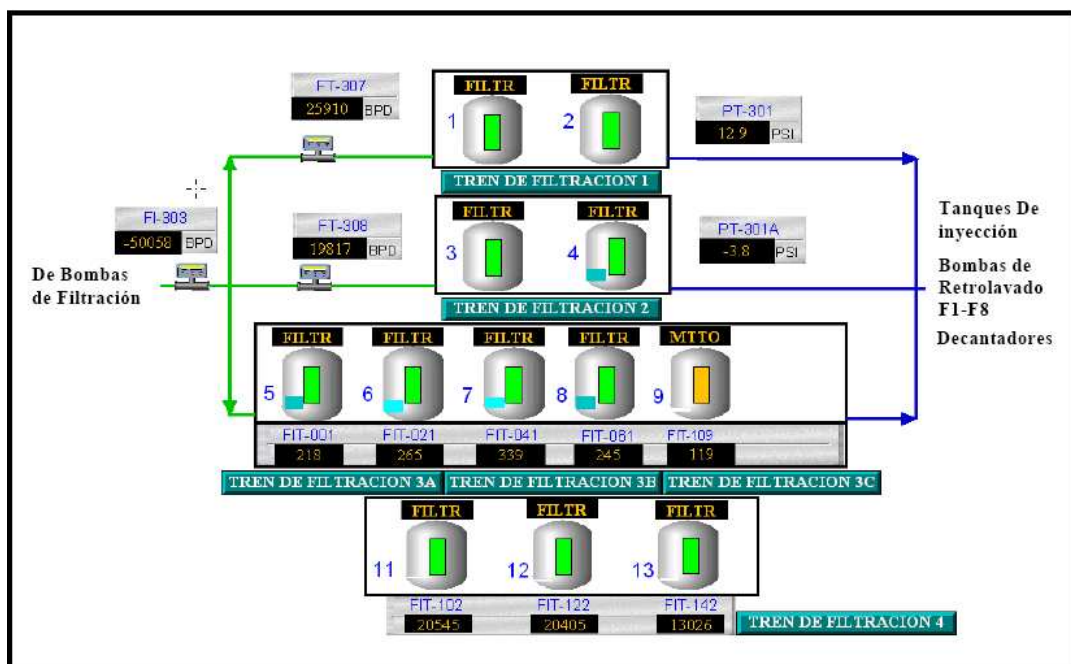


Figura 33. Trenes de Filtración

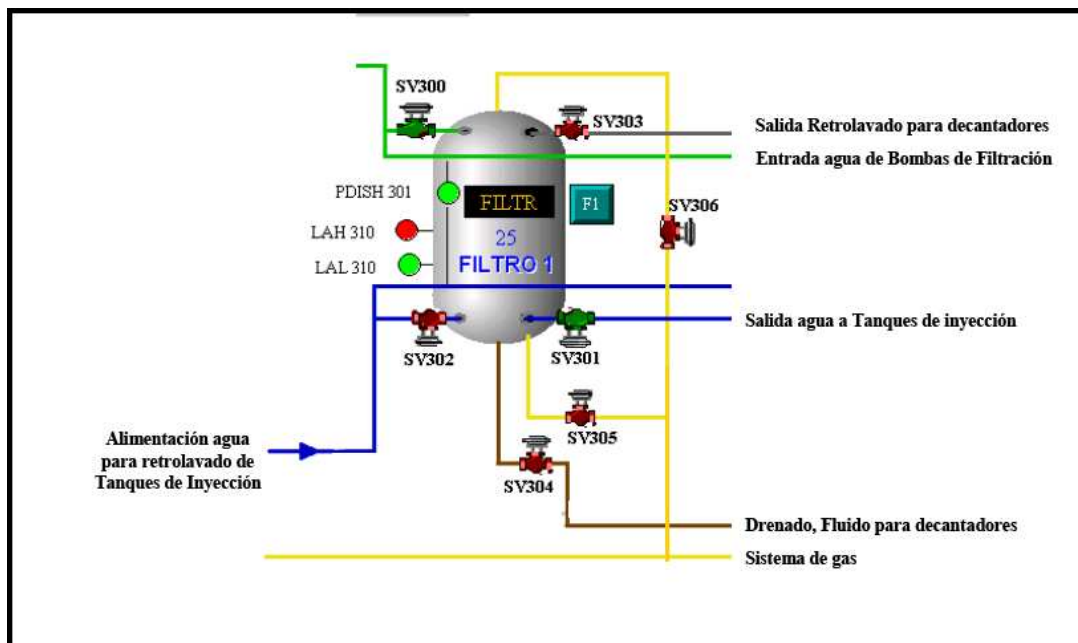


Figura 34. Esquema filtro Degremont (Filtro No. 1)

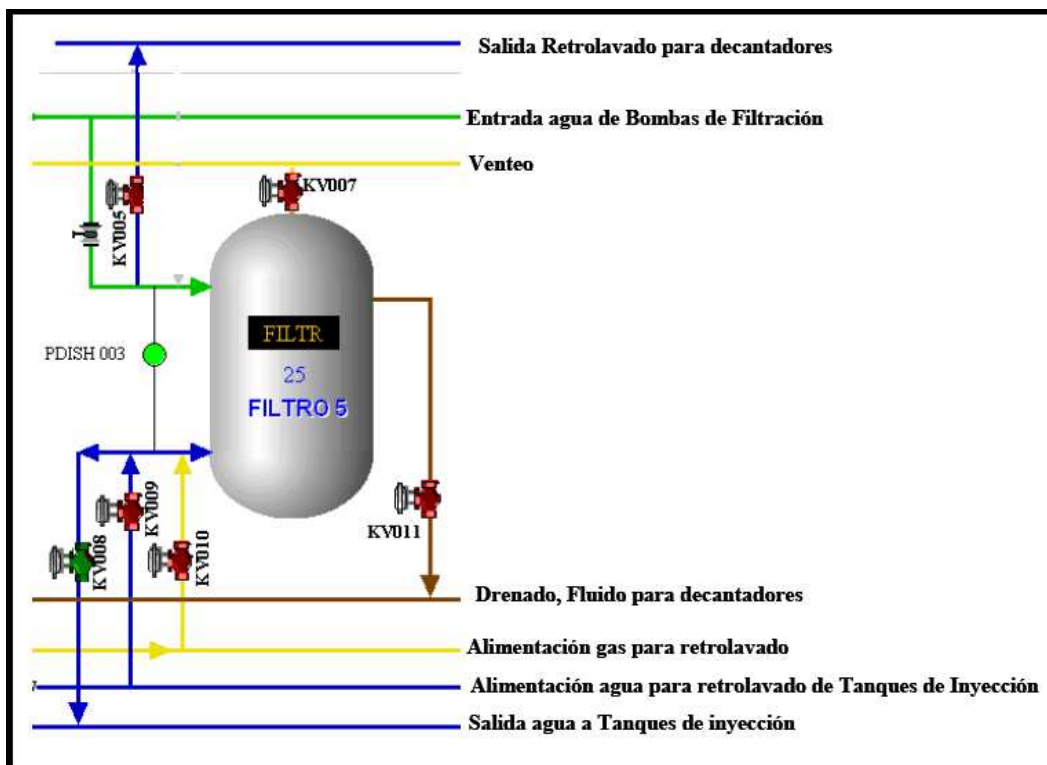


Figura 35. Esquema Filtro Baker con antracita (Filtro No. 5)

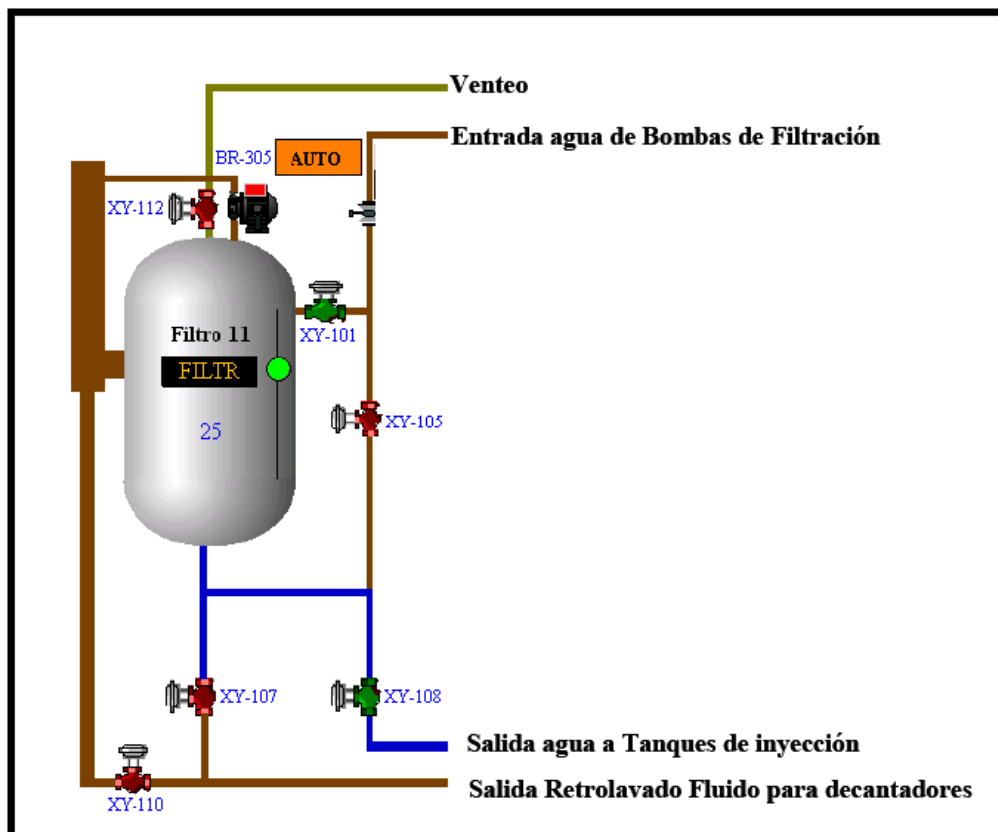


Figura 36. Esquema Filtro Baker con cáscara de nuez (Filtro 11)

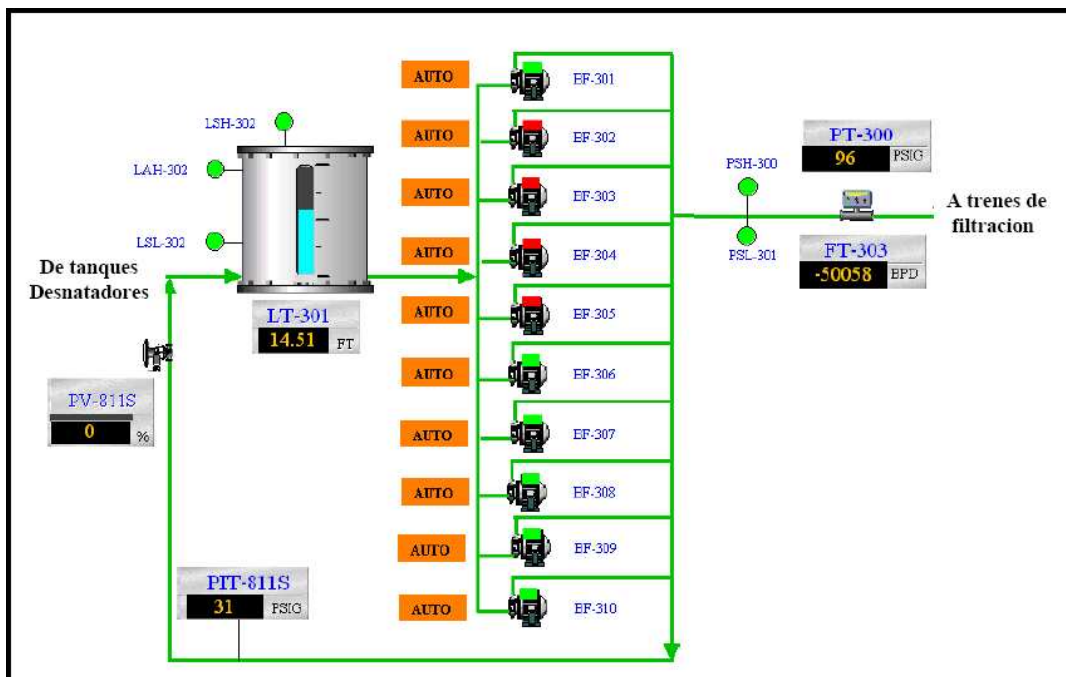


Figura 37. Bombas de Filtración.

Para los Filtros con cáscara de nuez (F9, F11, F12, F13), se dispone de una Bomba para cada Filtro, P-PEE-101D, BR-305, BR-306 y BR-307 respectivamente, las cuales toman el agua del Tanque de filtros (TF-301). Ver Figura 38. El agua para realizar el retrolavado es agua sin tratar y el sistema de scrubbing se utiliza para el lavado de la cáscara de nuez.

La bomba de retrolavado permite succionar la mezcla agua - cáscara de nuez por la boquilla lateral y se descarga por la parte superior del filtro, creando un circuito cerrado que golpea y afloja los contaminantes presentes en la cáscara para desalojar posteriormente el agua sucia.

El funcionamiento del sistema de filtración se hace mediante el accionamiento automático de una serie de válvulas del tipo diafragma con volante y comandados por un PLC. En caso necesario, las válvulas pueden ser operadas manualmente.



Figura 38. Bombas de retrolavado BR-301 y BR-302. filtros F1 al F8.

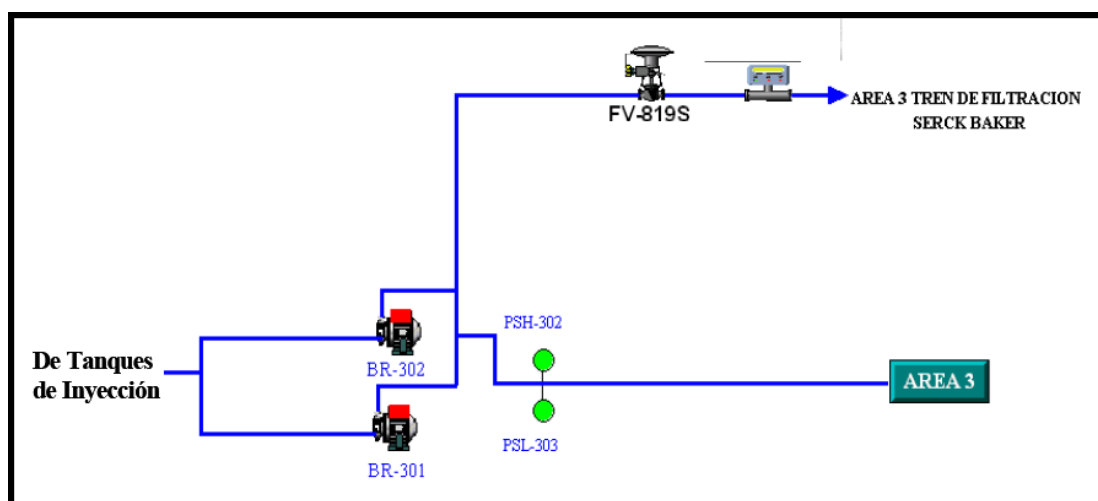


Figura 39. Bombas de retrolavado para Filtros con Antracita (F1 a F8).

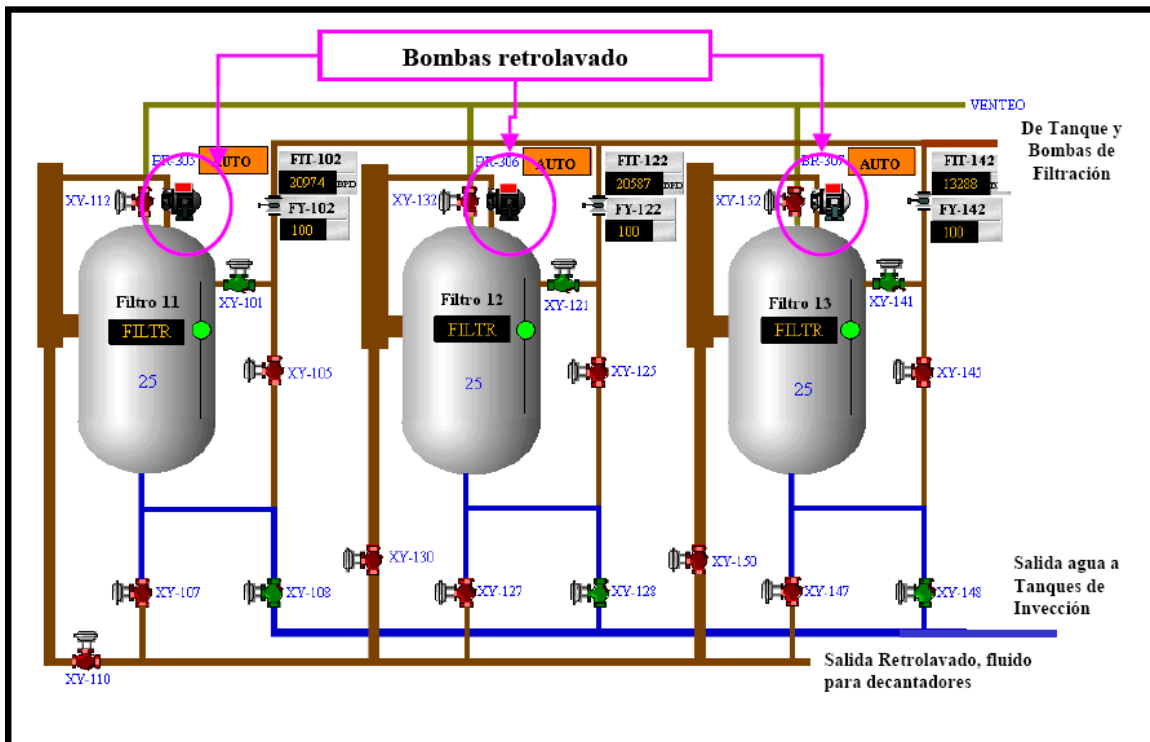


Figura 40. Bombas de retrolavado para Filtros con cáscara de Nuez (F9, F11, F12 y F13).

FUNCIONAMIENTO NORMAL DE FILTRACIÓN

El funcionamiento de filtración tendrá una serie de alternativas las cuales se explican a continuación.

Las bombas de filtración, BF-301, BF-302, BF-303, BF-304, BF-305, BF-306, BF-307, BF-308, BF-309 y BF-310 impulsan las aguas crudas hacia los filtros donde se abrirán las válvulas de entrada de agua del tanque de filtros y de salida hacia los tanques de inyección.

- Filtro 1: SV-300 y SV-301
- Filtro 2: SV-310 y SV-311
- Filtro 3: SV-320 y SV-321
- Filtro 4: SV-330 y SV-331
- Filtro 5: FV-001 y KV-008
- Filtro 6: FV-002 y KV-028
- Filtro 7: FV-041 y KV-048
- Filtro 8: FV-061 y KV-068
- Filtro 9: FV-01 y FCV-109
- Filtro 11: XY-101 y XY-108

Filtro 12: XY-121 y XY-128

Filtro 13: XY-141 y XY-148

En el momento que sea necesario realizar lavado de un filtro, en este se cierran las válvulas de entrada y salida, y los demás filtros quedan en funcionamiento y las bombas continúan en operación según el nivel del tanque de Filtros.

LAVADO DE FILTROS

El lavado de filtros, esta controlado por un diferencial de presión, por tiempo de filtración o por mando directo del operador. Un diferencial de presión nos indica las perdidas de carga en el lecho filtrante, cuanto más colmatado este el filtro, el diferencial será mayor, por lo tanto este equipo da una señal para el lavado cuando se presente una diferencia de presión de 10 psi.

Cada filtro tiene un switch de presión diferencial:

Filtro 1: PDISH-301

Filtro 2: PDISH-302

Filtro 3: PDISH-303

Filtro 4: PDISH-304

Filtro 5: PIDSH-003

Filtro 6: PIDSH-023

Filtro 7: PIDSH-043

Filtro 8: PIDSH-063

Filtro 9: DPSI_F9

Filtro 11: PDIS-104

Filtro 12: PDIS-124

Filtro 13: PDIS-144

Sé prevé un lavado de cada filtro al transcurrir una carrera de filtración de 24 horas. El tiempo de filtración el medido por el programador PLC, a donde adicionalmente van las señales de entrada de los diferenciales de presión.

Cuando en el PLC, se den las señales de diferencia de presión o cuando este haya cumplido el tiempo de filtración, este da como respuesta la parada del filtro y procede al lavado, siempre que se cumplan las siguientes condiciones.

- Que no este en lavado otro filtro
- Que en el decantador 2 este con la señal de bajo nivel activada (LSL-308) o que alguno de los decantadores 3 o 4 tenga menos de 1 metro de nivel.
- Que no este activada ninguna de las señales de bajo nivel de tanques inyectores (LSL-303 a LSL-304)

LAVADO FILTROS DEGREMONT.

Como ejemplo se da la operación de lavado del filtro No. 1 (para los otros tres filtros F2, F3 y F4, la operación es similar, cambiando el número de las válvulas)

PASO 1: Parada (60 seg.)

Cierre de válvulas SV-300 y SV-301, (entrada y salida de agua de filtración). Quedando todas las válvulas del filtro cerradas.

PASO 2: Desocupación Parcial (180 seg.)

Apertura de válvulas SV-306, SV-304 y (SV-350, KV-307 o KV-308 dependiendo del decantador que se va a utilizar). La primera permite la entrada de gas a 10 psi para desocupar el filtro, la segunda es la válvula de drenaje y la tercera es la entrada de agua de lavado a los decantadores 2 3 y 4 respectivamente.

El tiempo de esta operación está en función de tiempo manejado por el PLC, o por la señal de nivel bajo del filtro LSL-310.

PASO 3: Lavado con gas (180 seg.)

Apertura de válvulas SV-305, SV-303 y (SV-350, KV-307 o KV-308 en decantadores), y cerrado de las válvulas SV-304 y SV-306.

La primera es la válvula de entrada de gas para fluidificación del lecho. La segunda es la de salida de agua y gas de lavado y la tercera la entrada al decantador. 1, 2 o 3, dependiendo de la secuencia.

PASO 4: Parada (60 seg.)

Cierre de las válvulas SV-305 y SV-303, quedando todas las válvulas del filtro cerradas, y se deja el filtro en reposo.

PASO 5: Lavado de Gas-Agua (120 seg.)

Apertura válvulas SV-302, SV-303, SV-305 y (SV-350, KV-307 o KV-308), y encendido de la bomba de lavado BR-301 o BR-302; dependiendo de la secuencia.

La válvula SV-302 permite la llegada de agua de lavado, La SV-303 la evacuación de estas, SV-305 inyección de gas y la (SV-350, KV-307 o KV-308 alimentación decantador No.1, No. 2. y No. 3)

Nota: El lavado se produce siempre y cuando no exista nivel bajo del tanque No. TI-301 o TI-302.

PASO 6: Lavado Con surfactante (180 seg.)

Apagado de la bomba BR-301 o BR-302, Cierre de las válvulas SV-302, SV-303 y SV-305.

Apertura de la válvula SV-307 (entrada surfactante) y encendido de la bomba BS-301.

PASO 7: Lavado Agua (600 seg.)

Apertura válvulas SV-302 y SV-303 y encendido de la bomba de lavado BR-301 o BR-302; dependiendo de la secuencia.

La bomba BR-301 o BR-302 permanece en funcionamiento.

El tiempo de esta operación es de 600 seg., Siempre y cuando no se active la señal de alto nivel del decantador que este en secuencia.

PASO 8: Parada (60 seg.)

Cierre de las válvulas SV-302 y SV-303 y se apagan las bombas de retrolavado BR-301 y BR-302. quedando todas las válvulas del filtros cerradas. Se deja el filtro en reposo.

PASO 9: Enjuague (300 seg.)

Apertura de las válvulas SV-300 y SV-304, continua abierta la válvula (SV-350, KV-307 o KV-308), y cierre de las válvulas SV-302 y SV-303.

En este paso se ejecuta un enjuague con las bombas de filtrado entrando por la SV-300 y descargando por la válvula de drenaje SV-304, descargando a los decantadores.

PASO 10: Parada (60 seg.)

Cierre de las válvulas SV-300 y SV-304. (entrada de filtración y drenaje).

Quedando todas las válvulas del filtro cerradas. Se deja el filtro en reposo.

PASO 11: Funcionamiento normal del filtro

Nuevamente se abren las válvulas SV-300 y SV-301 (entrada y salida de agua de filtración).

LAVADO FILTROS BAKER CON ANTRACITA.

Como ejemplo se da la operación de lavado del filtro No. 7 (para los otros tres filtros F5, F6 y F8, la operación es similar, cambiando él numero de las válvulas)

PASO 1: Parada (60 seg.)

Cierre de válvulas FV-041 y KV-048, (entrada y salida de agua de filtración).

Quedando todas las válvulas del filtro cerradas.

PASO 2: Drenaje bajo 1 (180 seg.)

Apertura de las válvulas KV-051, KV-047 y (SV-350, KV-307 o KV-308 dependiendo del decantador que se va a utilizar). La primera es la válvula de drenaje, la segunda es la de venteo y la tercera es la entrada de agua de lavado a los decantadores 2 3 y 4 respectivamente.

PASO 3: Inyección surfactante (60 seg.)

Apertura de la válvula KV-052 (entrada surfactante) y Cierre de la Válvula KV-051 (Drenaje), continúan abiertas las válvulas KV-047 (Venteo) y SV-350, KV-307 o KV-308 en decantadores.

PASO 4: Inyección de agua (120 seg.)

Cierre de las válvulas KV-052 y KV-047 (Entrada surfactante y venteo)
Apertura de las válvulas KV-049 y KV-045 (entrada y salida de retrolavado), y se enciende la bomba de retrolavado BR-301 o BR-302; dependiendo de la secuencia.

PASO 5: Pausa (60 seg.)

Cierre de las válvulas KV-049 y KV-045 (entrada y salida de retrolavado) y se apaga la bomba de retrolavado BR-301 o BR-302. Quedando todas las válvulas del filtro cerradas. Se deja el filtro en reposo.

PASO 6: Limpieza con gas (180 seg.)

Apertura de las válvulas KV-050 y KV-047 (Entrada de gas y venteo).

PASO 7: Pausa (60 seg.)

Cierre de las válvulas KV-050 y KV-047 (entrada de gas y venteo). Quedando todas las válvulas del filtro cerradas. Se deja el filtro en reposo.

PASO 8: Retrolavado (180 seg.)

Apertura de las válvulas KV-049 y KV-045 (Entrada y salida de agua de retrolavado) y se enciende la bomba de retrolavado BR-301 o BR-302.

PASO 9: Parada (60 seg.)

Cierre de las válvulas KV-049 y KV-045 (entrada y salida de agua de retrolavado). Esta operación toma un tiempo de 60 seg.

PASO 10: Funcionamiento normal del filtro

Nuevamente se abren las válvulas FV-041 y KV-048 (entrada y salida de agua de filtración)

• **TRATAMIENTO DE DESECHOS.**

Los desechos producidos en el lavado de los filtros se tratan de acuerdo al siguiente esquema de proceso:

a) Decantación

b) Disposición de sólidos.



Figura 41. Decantadores.

La decantación consiste en remover sólidos suspendidos decantables bajo el concepto de sedimentación de partículas con mayor gravedad específica que la del agua y por otra parte la de remover partículas que flotan cuyo peso específico es menor que el del agua.

Esto se realiza en tres (3) decantadores (Foto 41), los cuales se utilizan para cualquier filtro dependiendo de la disponibilidad de cada uno. Estos se alimentan del afluente del lavado de los filtros.

En términos generales encontramos en los decantadores tres zonas plenamente definidas, la primera zona situada sobre la superficie tenemos aceite flotando, a continuación encontramos, una zona correspondiente a un agua clara totalmente decantada, con bajo contenido de sólidos suspendidos, y por último en la zona número tres (3) encontramos los sólidos suspendidos decantables.

En vista de las características de cada una de las aguas provenientes de cada zona se puede establecer, que las aguas de la zona número dos (2) se pueden nuevamente recircular a los desnatadores y así retornarlas a la planta de tratamiento de agua para ser nuevamente tratadas.

Mientras los desechos encontrados en las zonas números uno (1) y tres (3) (lodos con contenido de sólidos suspendidos) no podrán tener el mismo trato, lo cual hace necesario tener otro sistema de proceso llamado disposición de lodos del cual se trata mas adelante.

Las bombas centrifugas (BAC-301, BAC-302 y BAC-303), envían el lodo de la zona tres (3) y el aceite de la zona uno (1) hacia los lechos de secado, y el agua de la zona dos (2) hacia los tanques desnatadores. Ver Figura 22.

OPERACIÓN DE DECANTACIÓN.

Como ejemplo se da la operación de decantación del decantador número Dos (2) (para los otros dos decantadores, la operación es similar, cambiando él numero de las válvulas

PASO 1: Llenado

Apertura de la válvula SV-350 y las demás válvulas cerradas. La válvula se cierra si la señal de alto nivel del LSH-308 se activa.

PASO 2: Decantación

Cerrado de la totalidad de las válvulas, SV-350, SV-351, SV-352, SV-353, SV-354, Entrada de agua de lavado, salida de gas, Evacuación de natas, agua y sólidos, Evacuación hacia el tanque de licor y venteo.

El tiempo de duración de esta operación es de media hora.

PASO 3: Fin decantación y descarga lodos

Apertura de las válvula SV-352 y SV-360 (Evacuación natas, agua y sólidos, descarga lodos en los lechos de secado) e inicio de funcionamiento de dos de las bombas BAC-301, BAC-302 y BAC-303

El tiempo de duración de esta operación es de 2 minutos.

LECHOS DE SECADO.



Figura 43. Lechos de secado.

Las aguas de la zona uno (1) y tres (3) presentan un contenido de sólidos asociados con agua. El propósito de este proceso consiste en facilitar la remoción de los sólidos, para lo cual se hace necesario que el agua presente en la solución sea extraída. El fluido proveniente de las zonas uno (1) y tres (3) se transfiere a través de las bombas BAC-301, BAC-302 y BAC-303 y se envían a los lechos de secado (Foto 12), los cuales por medio de un sistema de sifón elimina el agua gradualmente durante su paso por cuatro (4) compartimientos, quedando agua con bajo contenido de sólidos en el último compartimiento. Esta agua se conduce al tanque de licor, luego al tanque auxiliar y finalmente al Gun Barrel de la batería Monal. Previamente será necesario inyectar algunos reactivos químicos, con el fin de reducir el contenido de oxígeno (O_2) y desinfectar este tipo de aguas. Las inyecciones se realizan mediante bombas dosificadoras del tipo diafragma (BDH-301, BDH-302, BDH-303, BDH-304).

Después de un tiempo se realiza el retiro de los desechos, por medio de un camión de vacío, que los lleva para realizarle el tratamiento adecuado y disponerlos de una forma segura ambientalmente.

OPERACIÓN LECHOS DE SECADO.

Para el tratamiento de los lodos y natas se cuenta con dos lechos de secado, los cuales están constituidos cada uno por cuatro (4) compartimientos.

El llenado de cada módulo esta comandado por una válvula automática SV-360 y SV-362, las cuales se abren 12 veces cada una durante el día (12 filtros que se lavan diariamente).

El sistema de sifón que existe en los lechos de secado en los cuatro compartimientos permite que una vez entre lodo o natas al sistema al mismo tiempo salga agua por las válvulas VL-01 y VL-02 (Estas válvulas permanecen abiertas) hacia el tanque de licor, y luego al tanque auxiliar y finalmente al Gun Barrel de la Batería Monal.

En el tanque de licor existe un magnetrol con tres (3) señales que se pueden visualizar en el PLC, la señal bajo nivel y de alto nivel (LSL- 315 y LSH-315), la intermedia que es el comando de las bombas, se activa en el magnetrol pero no se ve en el PLC. Cuando las dos señales del PLC estén en verde es decir que no este alarmado ni por bajo ni por alto nivel, se activa la señal intermedia y se arranca las bomba BFL-301 y BFL-302 y si el fluido incrementa hasta activar la alarma LSH-315 arrancan la bomba BFL-303, para operarán las tres (3) en línea y evitar que el tanque rebose.

Con el encendido de estas bombas se accionan simultáneamente las bombas BDH-301 o BDH-302 (dosificación secuestrante de oxígeno) y BDH-303 o BDH-304 (dosificación desinfectante) las cuales son las encargadas de acondicionar este tipo de afluente; cada pareja de bombas trabaja alternándose cada vez que una bomba de filtrado de los lechos opere.

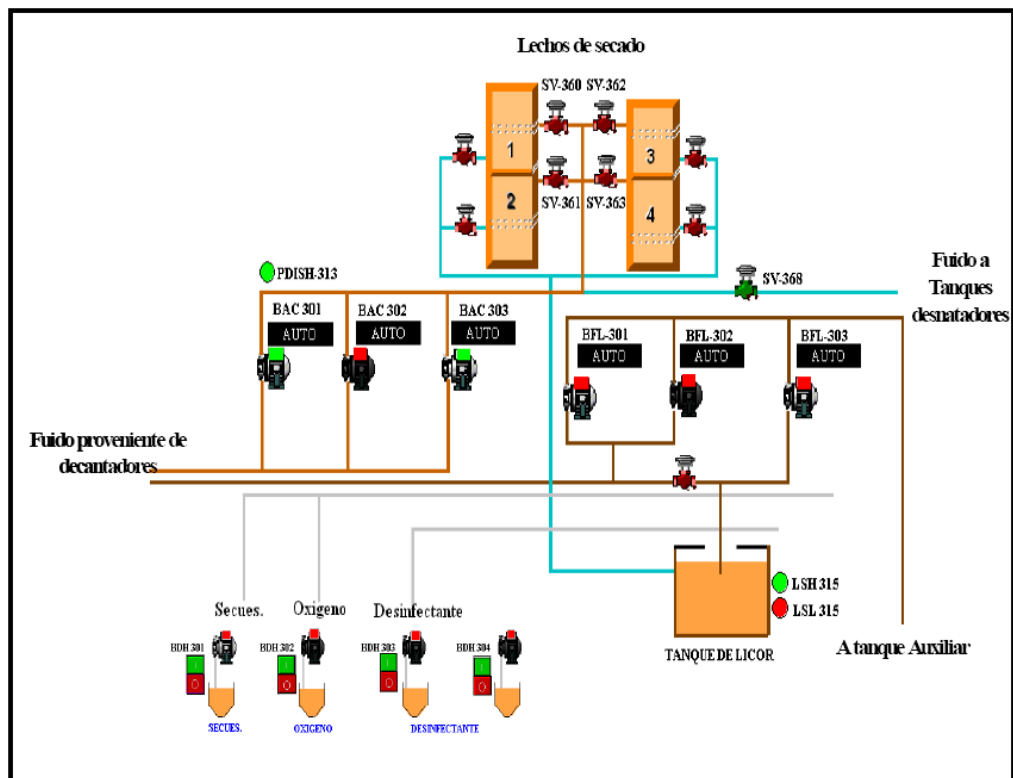


Figura 44. Sistema de bombeo fluido decantadores a Lechos de secado.

INYECCIÓN DE AGUA



Figura 45. Tanques de Inyección

El área de inyección de agua en la planta cuenta con dos tanques de almacenamiento TI-301 y TI-302 (Figura 45) de 5000 BLS cada uno, los cuales reciben la mezcla de agua externa y el agua filtrada, estos tanques están contenidos en un dique que tiene una capacidad de 6700 bbl en caso de que se presente algún derrame. Estos tanques tienen gas blanket y para regular su presión cuentan cada uno con su respectiva válvula (PRV-306 y PRV-307). Ver Figura 45.

Los tanques de almacenamiento del área de inyección alimentan el cabezal de succión del sistema de bombeo de inyección, el cual está constituido por once (11) bombas BI-301 a BI-311(Foto 46) instaladas en paralelo (Operando diez (10) y una (1) en stand by). Cada succión tiene su válvula de corte. Ver Figura 47.

Las descargas de las bombas van a un cabezal de "16øpor donde se conduce el agua a la red de distribución para inyección.



Figura 46. Bombas de inyección.

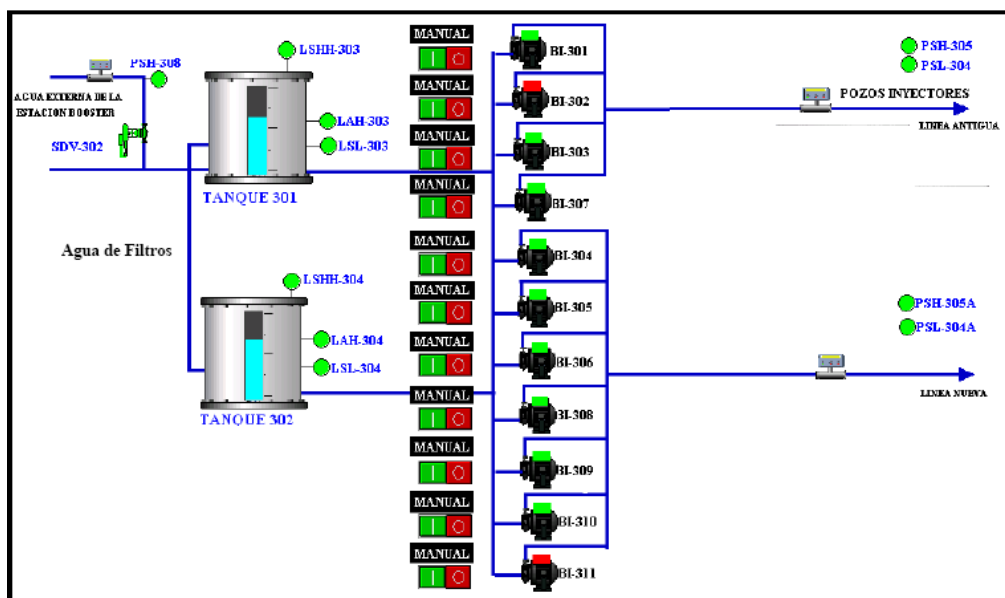


Figura 47. Tanques y Bombas de Inyección de agua.

- SISTEMA DE MANDO Y CONTROL**

CENTRO DE CONTROL DE MOTORES

CENTRO DE CONTROL DE MOTORES A 4160 V (MCC1)

El centro de control de motores MCC1, recibe en su baraje la tensión de los dos transformadores de 2500 KVA, 13200/4160-2400 VAC en paralelo pertenecientes al circuito PIA 1 y el transformador de 6.25 MVA de la PIA 2. Siempre se tiene trabajando un solo circuito, PIA 1 o PIA 2 y el otro esta en stand by, aunque si se requiere se puede trabajar con los dos circuitos en paralelo según requerimientos de carga.



Figura 48. Transformador de 2500 KVA PIA 1.



Figura 49. Transformador de 5-6.25 MVA PIA 2.

En el centro de control de motores MCC1 se controlan los motores de las bombas de inyección a 4160 VAC que existen en el campo.

Básicamente, consta de un conjunto de entrada con medida y protección formado por:

- Dos celdas AEG que contienen interruptores de potencia, equipo de medida y protecciones de llegada de los transformadores de 2500 KVA
- Una celda AREVA para el transformador de 6.25 MVA

- Siete celdas de arranque directo cada una de las cuales actúa como arrancador de cada una de las bombas de inyección de 500 HP a 4160 V (BI-301 a BI-307) que están en el campo con sus interruptores, contadores y protecciones y equipo de mando y control.
- Cuatro celdas Rock Well Allen-Bradley de arranque suave para las bombas de inyección de 500 HP a 4160 V (BI-308 a BI-311)

CENTRO DE CONTROL DE MOTORES A 460 V. (MCC2).

El centro de control de motores MCC2, recibe en su barraje la tensión del transformador de 225 KVA, 13200/460 VAC del circuito PIA 1 y el transformador de 225 KVA, 13200Y460 VAC de la PIA 2. Siempre se tiene trabajando un solo circuito, PIA 1 o PIA 2 y el otro se encuentra en stand by, aunque si se requiere se puede trabajar con los dos circuitos en paralelo según requerimientos de carga.

En el centro de control de motores MCC2 se controlan los motores e instalaciones de 460 VAC que existen en el campo.



Figura 50. Transformador 225 KVA, 13200/460 VAC PIA 1



Figura 51. Transformador 225 KVA, 13200/460 VAC PIA 2.

Básicamente consiste en:

- Una celda de entrada, medida y protección tipo SK de AEG que contiene interruptores, equipos de medida, protecciones de llegada de transformadores, que alimentan los dos interruptores de 225 KVA
- Cuatro módulos de salida tipo SL-18 de AEG donde están contenidos los arrancadores, equipo de mando y control de los motores que existen en el campo a 460 VAC y 120 VAC monofásicos.

SISTEMA DE CONTROL

La siguiente figura muestra el diagrama funcional de la red de control.

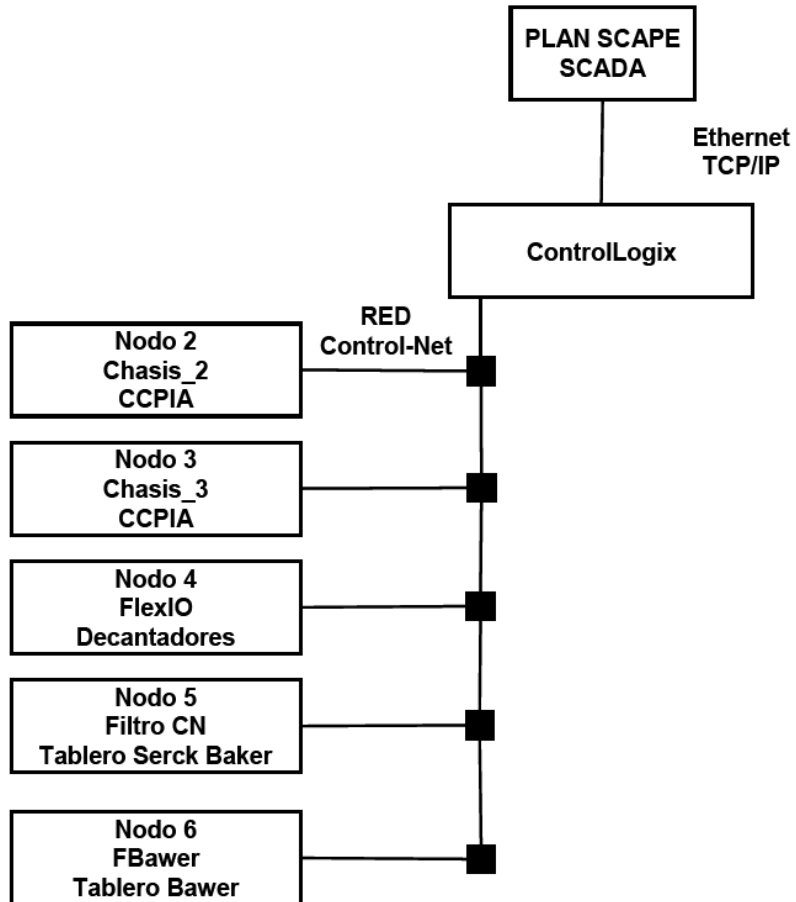


Figura 52. Diagrama red de control PIA Monal

PLC

Para el control de todas las señales del campo análogas y digitales se tiene un PLC ControlLogix Configurado así:



Figura 53. Chasis Local con CPU.

Chasis 1756-A13 de 13 slots: (Chasis Local)

Fuente de poder 120 VAC

Slot 0: 1756-L1 ControlLogix5550 Controller Version 13.24

Tabla 11. Costos de mantenimiento

Mes/ Año 08	Tarifa fija O&M PIA Monal	Tarifa total PIA Monal variable	COSTO TOTAL
	COP	COP	COP
Enero	32.937.505,24	53.999.400,42	86.936.905,66
Febrero	32.937.505,24	52.779.245,90	85.716.751,14
Marzo	32.937.505,24	54.468.496,90	87.406.002,14
Abril	32.937.505,24	54.068.118,65	87.005.623,89
Mayo	32.937.505,24	54.990.647,73	87.928.152,97
Junio	32.937.505,24	54.763.577,00	87.701.082,23
Julio	32.937.505,24	55.897.441,17	88.834.946,41
Agosto	32.937.505,24	55.896.675,47	88.834.180,71
Septiembre	32.937.505,24	55.428.658,75	88.366.163,98
Octubre	32.937.505,24	55.989.453,30	88.926.958,54
Noviembre	32.937.505,24	55.497.430,81	88.434.936,05
Diciembre	32.937.505,24	56.758.173,20	89.695.678,44
TOTAL	395.250.063	660.537.319	1.055.787.382,16

Fuente: Planeación HOCOL-MASA.

El costo de inyección por barril de agua para el año 2008 resulta de dividir el volumen total inyectado por las unidades por el costo total de mantenimiento y operación.

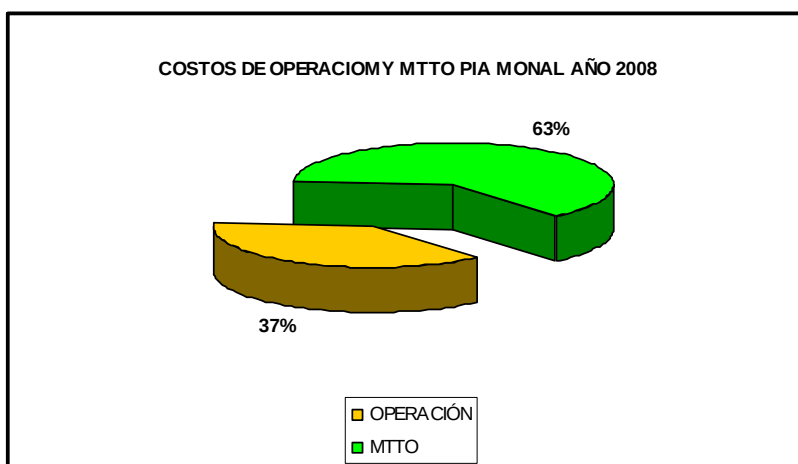
$$\text{\$ Costo De Barril Inyectado} = \frac{\text{\$ Costos De Operación y Mantenimiento 2008}}{\text{Volumen Total Inyectado 2008}}$$

$$\text{\$ Costo barril de agua} = \frac{\text{\$ 1.055.787.382 millones}}{88.695.171 \text{ millones de barriles de agua inyectados.}}$$

Costo del barril de agua para la planta de inyección en el 2008 fue de \$ 11.90 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 54. Operación y mantenimiento para Hocol 2008



Fuente: Planeación y Logística MASA – HOCOL

Figura 55. Costos de Operación y mantenimiento para Hocol 2008

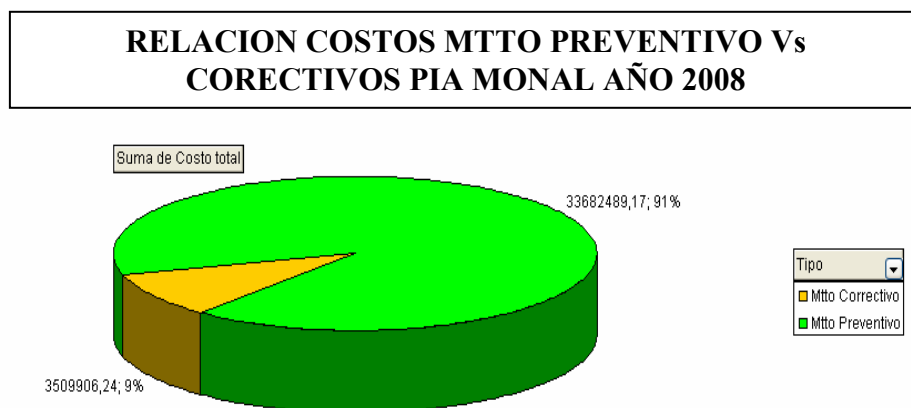
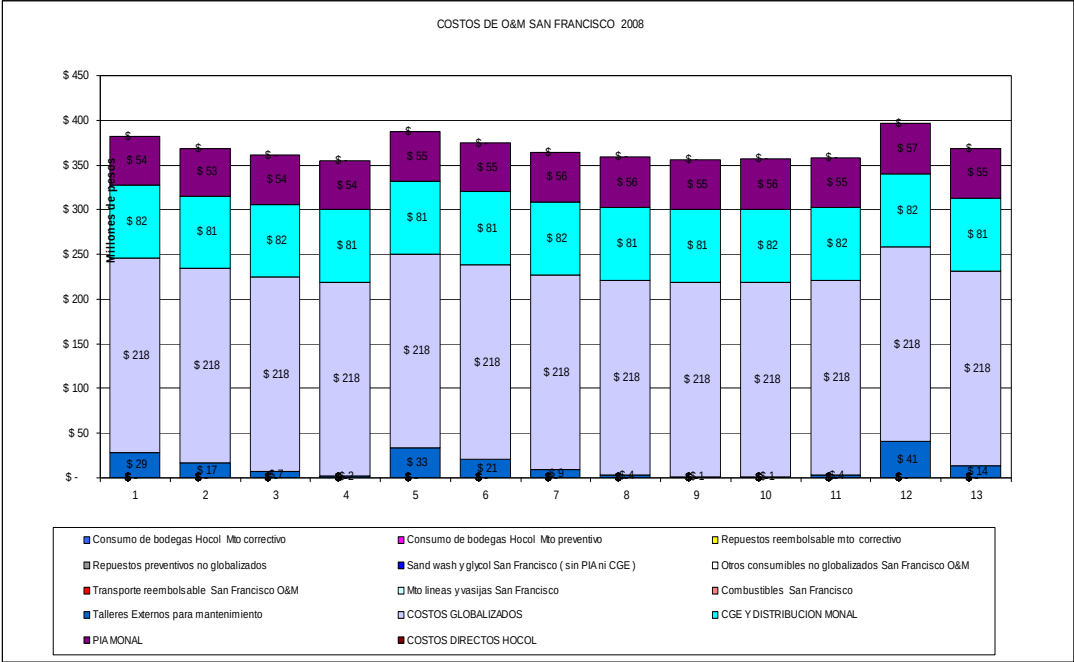
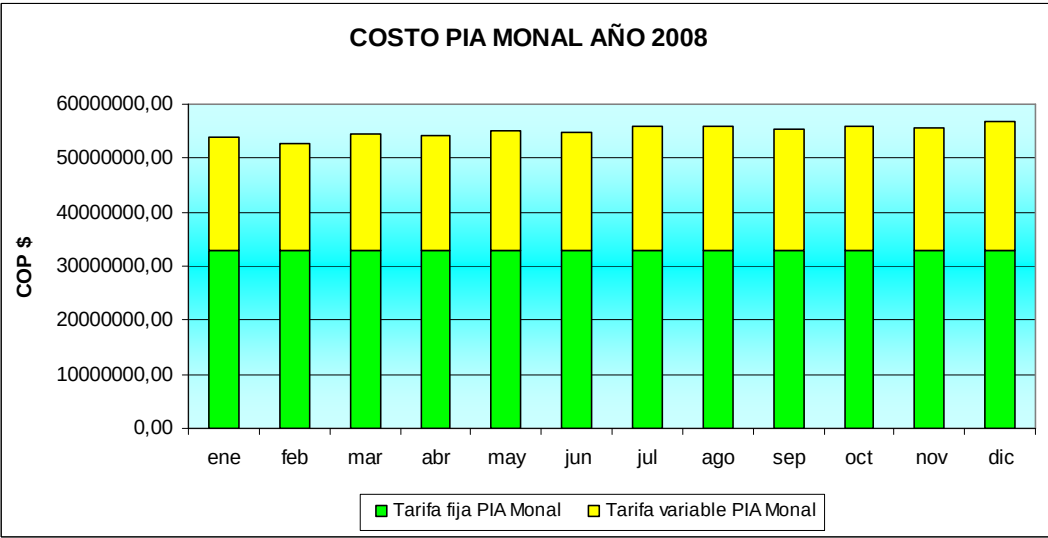


Figura 56. Costos de la PIA Monal



Fuente: Planeación y Logística MASA - HOCOL



4 RECOMENDACIONES PARA MODELO ESTRATEGICO DE IMPLEMENTACION DE RCM

4.1 DEFINICIÓN DE FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO.

La frecuencia de falla es empleada en la toma de decisiones de mantenimiento en lo que respecta a su costo y la determinación de los intervalos apropiados de mantenimiento, y no proporciona información sobre las tareas apropiadas de mantenimiento o las consecuencias asociadas a ellas. La diferencia básica entre los patrones de la falla de los componentes complejos y los componentes simples tiene implicaciones importantes para el mantenimiento. Los componentes simples demuestran con frecuencia una relación directa entre la confiabilidad y la edad. Esto es particularmente cierto donde los factores tales como la fatiga del metal o el desgaste mecánico están presentes o donde los componentes se diseñan como materiales consumibles (vidas cortas o fiables). En estos casos un límite de edad basado en ciclos del tiempo o del esfuerzo de funcionamiento puede ser eficaz en mejorar la confiabilidad total del componente del cual hace parte.

Para realizar la estimación de la frecuencia, se utiliza el RCMcost V4.0.2⁴. El software permite la introducción de parámetros de tiempo de falla del equipo y a través de dicha información el optimiza los tiempos de inspección y frecuencia de los activos.

4.2 DESARROLLO DE INDICADORES DE RCM.

Las tareas de mantenimiento implementadas deben ser medibles, por ello este proceso consiste en definir la métrica necesaria para el mantenimiento a través de indicadores de medición de la gestión del mantenimiento. Esto consiste en implementar alguna medida para la ejecución de tareas en instalación (disponibilidad, costos, confiabilidad, utilidad, seguridad, personas, calidad, entre

⁴ Copyright Isograph 1995-2003.

otros.), y otros específicos de las actividades del mantenimiento (porcentaje del número de horas gastadas en mantenimiento preventivo, costo de outsourcing, repuestos, etc).

Los procesos y sistemas de control de gestión están caracterizados por cinco aspectos que se derivan de los procesos de control precedentes.

- Conjunto de indicadores de control que permitan orientar y evaluar posteriormente el aporte de cada departamento a las variables claves de la organización.
- Modelo predictivo que permita estimar el resultado de la actividad que se espera que realice cada responsable y/o unidad.
- Objetivos ligados a indicadores y a la estrategia de la organización.
- Información sobre el comportamiento y resultados de la actuación de los diferentes departamentos.
- Evaluación del comportamiento y resultados de cada persona y/o departamento que permita la toma de decisiones correctivas.

4.2.1 Generación de reportes de la estrategia de mantenimiento.

Los reportes para la estrategia del mantenimiento son generados por el RCMcost y el CMMS INFOR la herramienta del generador de reportes del programa, permite diseñar el reporte de acuerdo a las necesidades o a la configuración que se requiera.

4.2.2 Aprobación de la estrategia de mantenimiento.

El equipo de RCM debe verificar y aprobar que todas las tareas de mantenimiento estén involucradas dentro del programa RCM generado en el reporte de la estrategia de mantenimiento. Esta verificación debe incluir:

- Resultado de las tareas de mantenimiento a ejecutar.
- Frecuencia de mantenimiento.
- Costos operativos adecuados de acuerdo al presupuesto de mantenimiento.
- Oportunidades de optimización del proceso.
- Efectividad al seguimiento de las tareas.
- Manejo de repuestos e inventario en almacén.
- Manejo de herramientas.
- Horas hombre para cada tarea de mantenimiento.
- Requerimientos de personal para las tareas de mantenimiento.
- Tiempos de mantenimiento.

4.2.3 Diseño del plan de mantenimiento.

Con base en la estrategia de mantenimiento generada por el RCMcost, se debe diseñar el plan de mantenimiento a implementar. Este plan de mantenimiento debe tener en cuenta las siguientes consideraciones y requerimientos para asegurar la expectativa de vida de los equipos:

4.2.4 Mantenible y fácil de monitorear

En los últimos años se ha desarrollado una serie de equipos y dispositivos para asegurar la confiabilidad de los equipos, sin embargo existen factores que afectan su operatividad:

- A. Factores de mantenibilidad asociados al diseño del área.
 - Acceso al equipo para ser mantenido.
 - Materiales que constituyen el equipo.
 - Estandarización de partes, con el fin de no tener componentes con materiales especiales, diseños o ajustes particulares.
 - Metas cuantitativas de mantenimiento, con indicadores como el MTBF, Downtime que permitan medir la efectividad del mantenimiento.
- B. Facilidades de monitoreo durante la operación:
 - Acceso al equipo para la recolección de datos operativos.
 - Recolección de datos en línea, a través de elementos y dispositivos en línea, con el fin de mantener la función, especialmente para equipos con altos costos, alta prioridad o escasa accesibilidad.
 - Manejo de indicadores claros de desempeño.

4.2.5 Revisión de la tecnología.

Como se mencionó anteriormente en los últimos años se han desarrollado una serie de herramientas tecnológicas para asegurar la mantenibilidad de los equipos, durante el diseño se deben reconocer dichas tecnologías con el fin de asegurar la adecuada transferencia tecnológica.

- A. Revisión continúa de los programas de mantenimiento, las nuevas tecnologías predictivas y nuevos desarrollos metodológicos.
- B. Retroalimentación, construir una línea base de retroalimentación, con base en la experiencia y las lecciones aprendidas.
- C. Alcance del trabajo claramente establecido con el fin de mantener un correcto enfoque el programa RCM durante su diseño y construcción.
- D. Documentación apropiada se debe tener con el fin de mantener la base de conocimiento actualizado, planos, diagramas, manuales de operación.

Finalmente el plan de mantenimiento diseñado, involucra tanto las actividades de mantenimiento, como las herramientas de mantenimiento y control, además de una adecuada documentación. Todos estos elementos, constituyen el plan de mantenimiento a implementar dentro del programa RCM:

- Hojas de trabajo de la revisión de la estrategia.
- Actualización del inventario de activos
- Actualización del registro de activos “data sheets”
- Revisión las rutinas de mantenimiento sistemático o planeado y sus frecuencias
- Programa de reacondicionamientos y sustituciones
- Programa de monitoreo de condiciones y registros de tendencias
- Programa de tareas de búsqueda de fallas ocultas o “safe guarding”
- Inventario de requerimientos repuestos por año y plan de compras y existencias.
- Presupuesto de mantenimiento para tres años. Detallado basado en actividades y sistemas para el primer año.

4.2.6 Diseño de procesos logísticos

En el proceso de diseño del RCM y en su etapa de implementación se debe tener previsto el cambio en la rutina de mantenimiento y sus consecuencias dentro de la organización. Para ello se hace necesario diseñar un plan logístico que permita hacer la transferencia entre programas y permita manejar la logística asociada a dicho cambio. Para ello se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- Políticas de reposición de equipos e instalaciones.
- Efectividad en el manejo de la organización y del personal.
- Manejo óptimo de inventarios de materiales y repuestos.
- Estandarización de procedimientos de mantenimiento.
- Sistema de información apropiado y documentación apropiada.
- Control de costos por actividades y sistemas.
- Capacitación y entrenamiento.
- Metas para las estrategias adoptadas e indicadores de desempeño para las estrategias más críticas.
- Balance de fuerza laboral y requerimiento de otros recursos (herramientas, equipos de monitoreo y diagnóstico, etc)
- Actualización de la política de contratación.
- Plan de rediseños o modificaciones.
- Recomendaciones / planes de reposición de equipos

Este proceso logístico se debe diseñar y ejecutar con el fin de mitigar el impacto cultural y técnico sobre la organización de mantenimiento.

4.2.7 Documentación de la estrategia de mantenimiento.

La estrategia de mantenimiento se debe documentar adecuadamente con el fin de no permitir alteraciones o modificaciones sin control en el proceso de implementación. Esta documentación finalmente es el fundamento para la replica del programa de RCM en la organización.

4.3 SEGUIMIENTO EFECTIVIDAD DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO.

La verificación de la estrategia de mantenimiento se realiza a través de la identificación de indicadores de desempeño claros que permitan medir la efectividad de las tareas de mantenimiento implementadas a través del RCM.

Para establecer una estrategia de mantenimiento efectiva, se necesita de indicadores que midan las tareas de mantenimiento ejecutado en planta, teniendo en cuenta:

- La complejidad operacional y estructural de la planta o instalación
- La dinámica de la relación entre producción y mantenimiento. Esto indica cual es el beneficio sobre el producto al aplicar las rutinas de mantenimiento RCM.
- La relación entre la estrategia de mantenimiento, la carga de trabajo de mantenimiento y la disponibilidad de recursos. Son indicadores claros de mantenibilidad que aseguran que la labor se este realizando adecuadamente con el mínimo de recursos y la máxima productividad operativa.

Estos procesos analizados correctamente permiten seguir la efectividad de la estrategia de mantenimiento. Como resultado de la evaluación de estos indicadores se pueden obtener las lecciones aprendidas y las recomendaciones de mejoramiento propias de la implantación del programa de RCM. Este último proceso de medición de las recomendaciones de mejoramiento, proporciona un bucle de retroalimentación que permite optimizar la estrategia de mantenimiento, al definir parámetros de mantenimiento y rutinas claves en el mejoramiento continuo.

Esta etapa de implementación, comprende las siguientes actividades como se puede observar en el diagrama 3 “implementación de planes de mantenimiento”:

4.3.1 Cálculo de indicadores del proceso RCM

A partir del plan de mantenimiento implementado y su verificación, dependiendo de la información de operación y mantenimiento con la cual se cuente, se desarrollan indicadores de proceso, que midan aspectos como:

- Efectividad den el cumplimiento de las órdenes de trabajo programadas.
- Efectividad en la programación de las actividades.
- Efectividad de los análisis de predictivo.
- Efectividad de las órdenes de compra.
- Evaluación de la gestión de servicios externos.
- Horas de trabajo hombre por labor.
- Disminución en costos de mantenimiento con la estrategia RCM.

4.3.2 Análisis de indicadores de proceso RCM.

Con base en un benchmarking adecuado, se analizarán los indicadores de proceso RCM desarrollados para medir la efectividad en la gestión del mantenimiento y con ello visualizar el desempeño del programa de mantenimiento y las oportunidades de mejoramiento que se puedan encontrar dentro de la estrategia.

4.3.3 Generación y divulgación de lecciones aprendidas.

Las lecciones aprendidas sobre la estrategia de mantenimiento con base en RCM, deben ser documentadas y divulgadas con el fin de crear un sistema de gestión del conocimiento en torno al proceso de RCM y replicar las buenas prácticas de mantenimiento encontradas.

4.3.4 Definición de recomendaciones de mejoramiento de RCM

El proceso de mejoramiento continuo implementado dentro del plan de mantenimiento a partir del RCM, permite identificar las oportunidades de mejoramiento del mismo proceso y definir las recomendaciones adecuadas dentro del proceso, que contribuyan a la optimización del mismo.

4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL RCM.

El programa de mantenimiento desarrollado en la etapa anterior contiene los elementos necesarios para permitir una correcta migración entre planes de mejoramiento. Para completar esta tarea se hace necesario introducir todas las rutinas de mantenimiento dentro del programa CMMS que se tenga para el gerenciamiento del mantenimiento. Partiendo de los planes de mejoramiento diseñados a través del RCMcost, y el diseño logístico que se construyó, se hace el proceso de migración de la información hacia el CMMS teniendo en cuenta las implicaciones y requerimientos de información que se han descrito anteriormente.

Esta etapa de implementación, comprende las siguientes actividades como se puede observar en el diagrama 3 “implementación de planes de mantenimiento”:

4.4.1 Ejecución pruebas de migración al CMMS.

Una vez se tengan los formatos cargados al Datastream, se debe valorar su contenido y validar que la estrategia de mantenimiento, contenga los elementos con los que originalmente fueron diseñados. Esta verificación se debe realizar antes de poner en marcha el programa de mantenimiento.

4.4.2 Actualización del plan de mantenimiento en el CMMs.

El plan de mantenimiento cargado en el Datastream 7i, se debe actualizar por el plan de mantenimiento RCM desarrollado. Esta actualización consiste en generar los formatos de mantenimiento adecuados, las tareas y rutinas a desarrollar en el proceso diario de mantenimiento, empezando por las rutinas y tareas de los equipos de menor criticidad y aumentando de nivel. Esta labor se realiza con el fin de tener un proceso controlado sobre el programa RCM a implementar.

4.4.3 Verificación de integridad del programa.

Una vez el programa RCM se encuentre integrado al sistema de información CMMs, se debe poner a consideración de los mantenedores y supervisores de área con el fin de verificar que el programa de mantenimiento sea el adecuado y pueda ser desarrollado por la organización, se debe valorar el programa buscando la completa integridad del mismo dentro de las tareas y rutinas de mantenimiento. Esta segunda revisión se hace necesaria para evitar problemas de sesgado en las rutinas de mantenimiento o pérdida de información en el momento de la transferencia o migración de programas. A su vez esta verificación se realiza acompañada de la implementación de los ajustes logísticos necesarios, complemento del programa RCM.

5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con el modelo estratégico de implementación de RCM permiten obtener las siguientes conclusiones.

- Se toman acciones enfocadas a eliminar fallas potenciales que afecten el sistema de filtración analizadas en el diagrama de flujo del proceso tanto de operación como de mantenimiento.
- Se realizan compromisos laborales desde la gerencia hasta la parte técnica, e interrelacionándose para conformar grupos multidisciplinarios de trabajo y lograr consolidar el plan de mantenimiento.
- Se establece un cronograma de capacitación para sensibilizar y capacitar al personal enfocado a los objetivos trazados.
- Se mejoran procesos, procedimientos y planes de mantenimiento del proceso funcional de los componentes mantenibles con el objetivo de generar un buen clima laboral enfocado al desarrollo sostenible.
- Se establecen tiempos para evaluar procedimientos recomendados y generar una mejora continua.
- Se implementan indicadores de desempeño encaminados a los objetivos estratégicos de cada compañía.
- Se diseñan métodos de recolección de la información como formatos o bases de datos automáticas para analizar tendencias.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS DE CONSULTA

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

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.

ARTÍCULOS DE CONSULTA

-----, 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.

MONROOE, Tood. HOW TO JUSTIFY MACHENERY IMPROVENMENTS USING RELIABILITY ENGINERING. 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.

-----, 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.

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.arms_reliability.com

www.reliabilitydirect.com

www.centerfortpm.com.uk.

www.reliabilityradio.com

www.diagnosticsenginiers.org.uk

www.reliabilityweb.com

www.reliabilityanalysiscenter.com

www.maintenancebenchmarking.com

www.weibullnews.com

www.wsw.com

www.weibull.com

www.orbitnewsletterarchives.com

www.pride-in-maintenance.com

ANEXOS

ANEXO 1 - FUNDAMENTOS DE RCM

6 GENERALIDADES

6.1 Confiabilidad operacional

Debido a la gran cantidad de variables que se pueden presentar dentro de un contexto operacional determinado, se hace difícil determinar una relación directa y única entre el tiempo de vida útil de los equipos y sus probabilidades de falla. Estas probabilidades de falla están sujetas a variaciones en el tiempo, lo que hace más difícil su determinación. La confiabilidad es la probabilidad de que un equipo o componente trabaje cumpliendo con los requerimientos y especificaciones de servicio deseado.

Los análisis de confiabilidad están conformados por una serie de elementos propios de los procesos, los cuales al correlacionarse, proporcionan las directrices para la toma de decisiones dentro de los planes de mantenimiento. Se pueden mencionar entre ellos:

6.1.1 Falla

La falla es la disminución o pérdida de capacidad de un equipo de cumplir con los requerimientos mínimos de servicio y funcionalidad dentro de un sistema. Esta condición puede interrumpir la continuidad de un proceso. Existen dos tipos de falla:

- Falla funcional: es el estado de cualquier elemento constitutivo de un sistema al no cumplir con los requerimientos de funcionalidad operativa.
- Fallas parciales: las fallas parciales son condiciones físicas que pueden determinar o identificar una falla funcional.

Las causas de cualquier falla también se pueden clasificar dentro de las siguientes categorías:

- Defectos de diseño.
- Materiales defectuosos.
- Procesos de fabricación defectuosos.
- Ensamble defectuoso.
- Imprevisiones en las condiciones de servicio.
- Mantenimiento deficiente.
- Malas prácticas de operación.

6.1.2 Probabilidad de falla

Posibilidad de ocurrencia de un evento en función del número de fallas que ha ocurrido para un equipo o familia de equipo en un periodo específico de tiempo; su representación gráfica puede tener diferentes modelos, estos modelos se pueden apreciar en la figura 57.

Modelo A - curva de bañera: existen tres periodos visibles de falla; la primera es el periodo de mortalidad infantil, este periodo es seguido por una estabilización de eventos donde pueden ocurrir aleatoriamente y una etapa final donde hay un periodo de crecimiento de fallas por envejecimiento.

Modelo B - índice de fallas tradicional: la probabilidad de falla aumenta a medida que transcurre el tiempo.

Modelo C: se genera a partir de un deterioro constante desde el principio y aumenta constantemente en el tiempo.

Modelo D: la probabilidad de falla es baja cuando el equipo es nuevo y ocurre un comportamiento creciente rápido, seguido por un comportamiento aleatorio.

Modelo E: representa una probabilidad de falla constante en el tiempo y no hay relación entre la edad funcional de los equipos y la probabilidad de que fallen.

Modelo F: muestra una mortalidad infantil alta, seguida por un comportamiento constante.

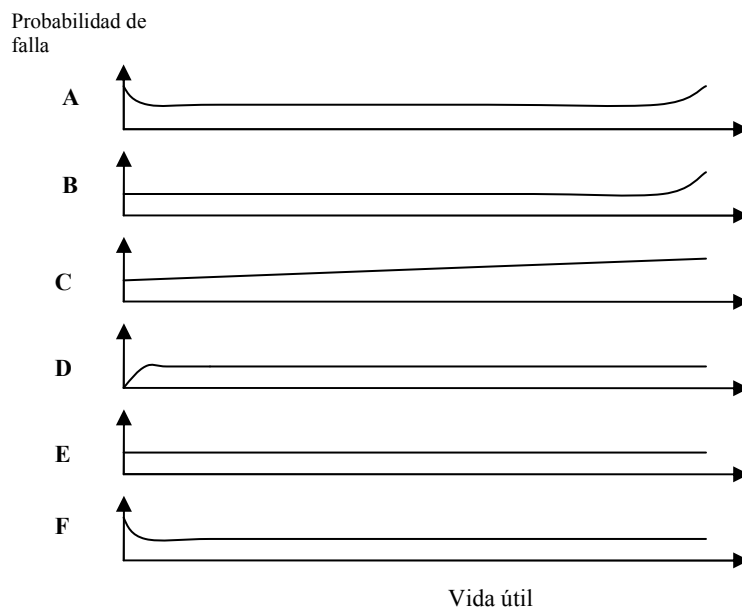


Figura 57. Modelos de probabilidades de falla.

6.1.3 Riesgo

Es el nivel ponderado de un equipo dentro de una matriz que determina la pérdida de eficiencia y seguridad en la continuidad de un sistema ante una falla. En él se

estudian las distintas fallas que se pueden producir y las consecuencias asociadas a ellas. El riesgo esta asociado a cuatro tipos de consecuencias:

- Consecuencias operacionales.
- Consecuencias en la seguridad.
- Consecuencias ambientales.
- Consecuencias económicas.

6.1.4 Incertidumbre

Es el grado de falta de conocimiento sobre el comportamiento de una falla o condición de un activo dentro de un sistema.

6.1.5 Predictibilidad

Es el pronóstico de la ocurrencia de un evento o falla en función del nivel de riesgo y la condición de operatividad del equipo.

6.2 EQUIPOS Y COMPONENTES CRÍTICOS

Para el mantenimiento predictivo de un conjunto de equipos y componentes, se debe estudiar con prioridad aquellos llamados críticos, de mayor relevancia para el proceso. Esta definición obedece a la importancia de sus fallos en el sistema completo. Los equipos y componentes críticos requieren un análisis de los modos de fallos y sus efectos para esclarecer la política más apropiada que garantice la disponibilidad o fiabilidad al mínimo coste. En la medida de lo posible, se intenta controlar las condiciones de funcionamiento del equipo, monitorizando aquellos parámetros de interés para su mantenimiento preventivo. Los aspectos a considerar en esta fase de selección de equipos, por orden de prioridad son:

- La seguridad de la persona en caso de fallo.
- Los fallos provocados en el entorno.
- Las prescripciones legislativas en materia de control periódico y de verificación.
- La disponibilidad requerida al bien por el plan de producción
- La existencia de equipos de reserva, entre otros.

6.3 POLÍTICAS DE MANTENIMIENTO

La figura 58, ilustra los pasos a seguir a la hora de formular la política de mantenimiento para mejorar el comportamiento de un modo de fallo en particular.

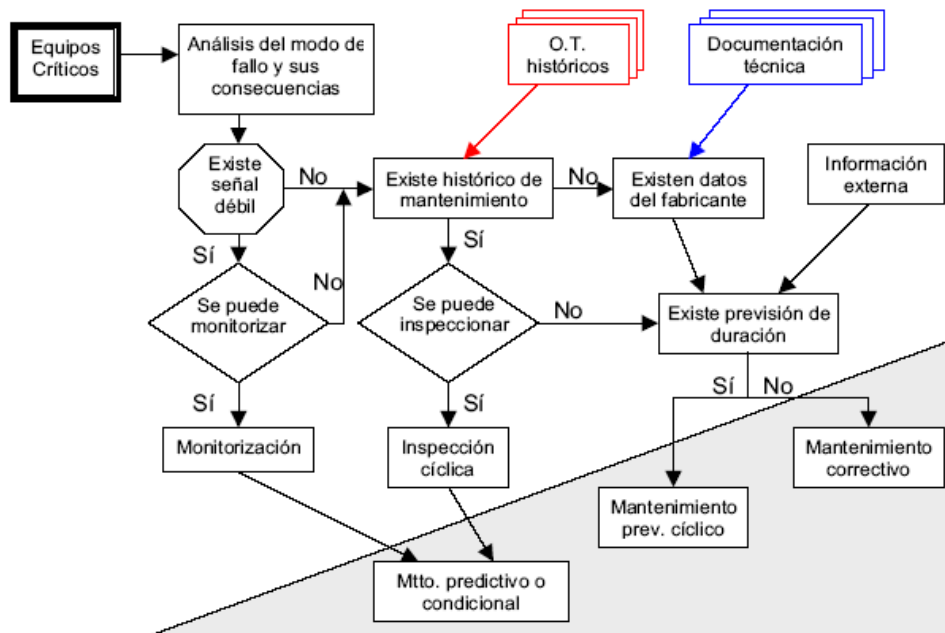


Figura 58. Formulación de la política de mantenimiento.

6.4 HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

La confiabilidad operacional de los sistemas debe soportarse por una serie de herramientas que permitan evaluar el comportamiento de un activo dentro de un sistema de una manera sistemática, con el fin de determinar su nivel de operacionalidad, la magnitud de los riesgos a los cuales puede estar operando, las acciones de mitigación de dichos riesgos y las acciones de mantenimiento que se requieren para asegurar la continua operación del activo de una manera integral.

Existen varias herramientas a nivel mundial para asegurar la confiabilidad operacional de un sistema, sin embargo entre las más comunes e importantes se pueden mencionar:

6.4.1 FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis) – Efecto de modos de falla y análisis crítico.

El FMECA es un método inductivo y cualitativo que apareció con el fin de analizar la fiabilidad de los sistemas y la criticidad de los fallos, este método se realiza en

todas las fases del proyecto de un sistema, definiendo los tipos de fallo reales o potenciales, las causas posibles de los fallos, las consecuencias sobre la producción y los medios para evitar o eliminar esas consecuencias.

Su objetivo es identificar las causas iniciales y encontrar aquellas que no se han producido todavía, evaluando su criticidad, es decir teniendo en cuenta la frecuencia de aparición de los fallos y su gravedad. Para una mayor precisión se suele incluir dos parámetros adicionales: la probabilidad de detectar el fallo y la un factor de incertidumbre que depende del conocimiento que se tenga de la falla. El parámetro de frecuencia de aparición de fallos se determina por procedimientos de adquisición de datos estadísticos, en la comparación con materiales idénticos y cuidando de detallar las condiciones particulares de trabajo. Este procedimiento de análisis de los fallos permite una búsqueda sistemática del tipo de fallo, de la causa posible de fallo y de los efectos y consecuencias. A través de hojas más o menos personalizadas, en función de las aplicaciones, se catalogan las fallas y las ponderaciones de las mismas; esta clasificación permite facilitar las acciones correctivas o preventivas que se deben emprender. Este método necesita ser desarrollado en función del tiempo, ya que las fallas varían en función del período de vida en que se encuentre el equipo, haciendo variar los objetivos perseguidos.

El FMECA es un método que permite determinar los modos de falla de los componentes de un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan. De esta forma se podrán clasificar las fallas por orden de importancia, permitiendo directamente establecer tareas de mantenimiento en aquellas áreas que están generando un mayor impacto económico, con el fin de mitigarlas o eliminarlas por completo.

6.1.1 (Analysis Mode and Effect Failure) - Análisis de Modos y Efectos de Fallas.

Este método requiere de un período de tiempo más prolongado de estudio antes de que pueda ser aplicado en un sistema, un análisis más detallado y una documentación acertada para poder generar una jerarquía clara y bien relacionada. Su procedimiento como tal implica las siguientes actividades:

- Definir el sistema: se refiere a que se debe definir claramente el sistema a ser evaluado, las relaciones funcionales entre los componentes del sistema y el nivel de análisis que debe ser realizado.
- El análisis de los modos de fracaso: consiste en definir todos los modos de falla potenciales a ser evaluados en el nivel más bajo. Por ejemplo, la pérdida del rendimiento, funcionamiento intermitente, etc.
- Análisis de los efectos de fallas: define el efecto de cada modo de falla en la función inmediata, los niveles más altos de riesgos en el sistema, y la función misión a ser realizada. Esto podría incluir una definición de síntomas disponible al operador.

- Proceso de rectificación de fallas: determina la acción inmediata que debe ejecutar el operador para limitar los efectos de las fallas o para restaurar la capacidad operacional inmediatamente, además de las acciones de mantenimiento requeridas para rectificar la falla.
- Cuantificación de la rata de fallas: si existe suficiente información acerca de la rata de fallas, la proporción de la rata, o la probabilidad de falla de cada modo de fallo pueden ser definidas con base en esta información. De esta forma se puede cuantificar la proporción de fracaso total o la probabilidad de falla asociada con un efecto de un modo de fallo.
- Análisis de criticidad: permite determinar una medida que combina la severidad o impacto de la falla con la probabilidad de que ocurra. Este análisis puede ser cuantitativo o cualitativo.
- Acción correctiva: define cambios en el diseño de la operación y el mantenimiento a través de procedimientos o planes de prueba, que mitiguen o reduzcan las probabilidades críticas de falla.

6.1.2 Optimización Costo Riesgo (O.C.R.)

La Optimización Costo Riesgo es una metodología que permite determinar los costos asociados a la realización de actividades de mantenimiento preventivo y los beneficios esperados por sus ejecuciones, sin dejar de considerar los riesgos involucrados, para identificar la frecuencia óptima de las acciones de mantenimiento con base al costo total mínimo/óptimo que genera.

Objetivo de una Optimización Costo Riesgo:

Determinar la frecuencia óptima de las acciones de mantenimiento preventivo por medio de la realización de un balance de costos / riesgos asociados a estas actividades y los beneficios que generan. Figura 59.

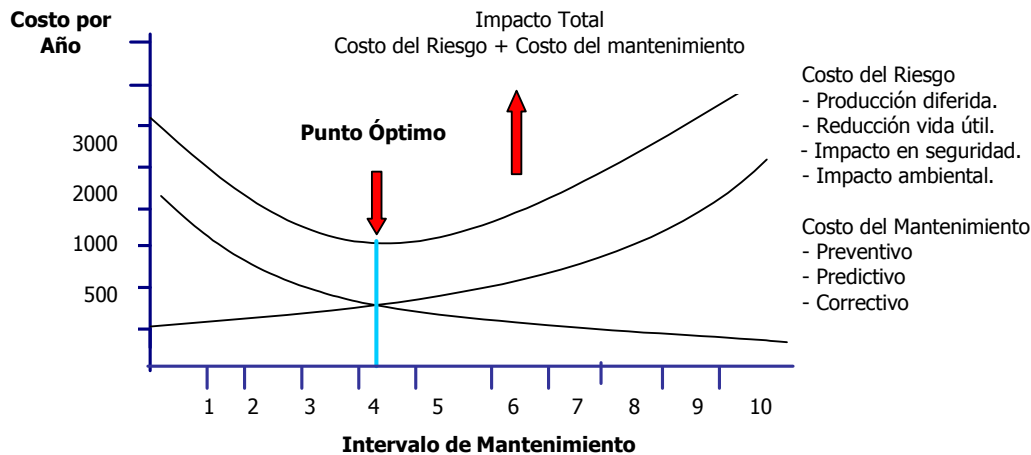


Figura 59. Costos de Riesgos vs. Costos de Mantenimiento.

6.1.3 RCA (Root Cause Analysis) – Análisis Causa Raíz.

Dentro del marco de confiabilidad es la herramienta fundamental para determinar las causas fundamentales que generan una falla repetitiva o en su defecto dentro de un conjunto de fallas, la anomalía de mayor peso en cuanto al impacto operacional, económico, de seguridad y ambiente. Es una herramienta sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición, para luego mitigarlas o suprimirlas totalmente. Se aplica generalmente en problemas puntuales para equipos críticos de un proceso o cuando existe la presencia de fallas repetitivas.

6.5 RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM) – MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD.

Al igual que el TPM (Total Productive Maintenance), el RCM no es una política de mantenimiento, sino un conjunto de comportamientos organizativos, reglas, métodos y procedimientos para la gestión económica del mantenimiento con base en técnicas de fiabilidad, y acompañado de métodos de análisis como el FMECA.

Dentro de los resultados encontrados a través del RCM se han llegado a situaciones como:

- o Disminución del mantenimiento cíclico de 50 al 70%.
- o Reducción del consumo de repuestos hasta el 50%.

- o Mejora de las relaciones entre el mantenimiento y la producción. .
- o Eliminación total de las sustituciones programadas.
- o Sensible disminución de los trabajos que requieren especialización.

El RCM es un procedimiento que tiene como fin descubrir qué mantenimiento es requerido por un activo en su contexto operativo. Particularmente, lo que se debe hacer para asegurar la continuidad de las funciones de diseño del sistema y la confiabilidad del mismo. Sin embargo no debe ser el único objetivo, ya que el mantenimiento es principalmente un problema económico y no solamente un problema de fiabilidad.

EL RCM proviene de la industria aeronáutica, y más particularmente de las aerolíneas civiles. Los aviones de transporte generalmente tienen equipos y sistemas del control redundante y sus estructuras se diseñan para tolerar ciertos daños sin peligro. Los operadores se dieron cuenta en los años cincuenta que aumentando la frecuencia de reparación general de los motores y otros equipos, no aumentaba la confiabilidad de los mismos, a menos que hubiese un modo de fallo dominante. Esto no tiene sentido desde el punto de vista tecnológico y surge desde conceptos erróneos sobre la curva de la tasa de fallos (curva de la bañera).

En conclusión el RCM es una metodología que intenta determinar los requerimientos de mantenimiento de los activos en su contexto de operación. Consiste en analizar las funciones de los activos, ver cuales son sus posibles fallas y detectar los modos de fallas o causas de fallas que presenta cada activo. En resumen, estudia los efectos de cada falla y analiza sus consecuencias y a partir de la evaluación de las consecuencias se determina la estrategia más adecuada dentro del contexto de operación, siendo exigido que no sólo sean técnicamente factibles, sino económicamente viables. A través del planteamiento de siete preguntas, contenidas en el estándar JAE1011 “**Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes**”, el RCM consolida su objetividad dentro del proceso de mantenimiento, proporcionando mayor confiabilidad y disponibilidad al sistema. Estas preguntas son:

1. Cuáles son las funciones que debe desempeñar el activo?
2. De qué manera puede fallar?
3. Qué originó la falla?
4. Qué sucede cuando falla?
5. Importa si falla?
6. Qué podemos realizar para prevenir la falla?
7. Qué ocurre si no podemos prevenir la falla?

El RCM centra su atención en la relación existente entre la organización y los elementos físicos que la componen. Por lo tanto es importante que antes de comenzar a explorar esta relación detalladamente, se conozca el tipo de elementos físicos existentes y decidir cuál de ellos debe estar sujeto a una revisión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad a través del estandar JAE1011.

6.1.4 Ventajas del RCM

El proceso de RCM tiene ventajas sobre otras políticas de mantenimiento, ya que proporciona elementos de confiabilidad para cualquier sistema mantenible, que contribuyen al mejoramiento de la producción y la reducción de las pérdidas por malfuncionamiento de los activos. Dentro de las ventajas tangibles que se pueden observar en el RCM encontramos:

- Permite relacionar los riesgos a los cuales están sometidos los activos con los costos asociados a dichos riesgos.
- Optimiza en forma sistemática los recursos necesarios para cumplir con las funciones de mantenimiento.
- Mejora la seguridad de los activos y su rendimiento operacional.
- Minimiza la ocurrencia de fallas o las consecuencias de ellas una vez ocurran.
- Promueve el uso de nuevas tecnologías desarrolladas para el campo del mantenimiento.
- Optimiza los procesos de producción y disminuye al máximo los riesgos asociados a la seguridad del personal y del ambiente.
- Incrementa la disponibilidad de los activos a bajos costos dentro de un contexto operacional, permitiendo que dichos activos funcionen eficiente y correctamente.
- Mejora las capacidades técnicas de las personas encargadas del mantenimiento.

6.1.5 Componentes del RCM

Un programa RCM mezcla varios componentes en forma adecuada con el fin de permitir en un sistema o planta, tener prácticas de mantenimiento efectivas. Estas estrategias de mantenimiento incluyen mantenimiento correctivo (reactivo), intervalos de mantenimiento preventivo (PM), mantenimiento basado en condición (CBM) y mantenimiento proactivo.

A través del mantenimiento preventivo, se puede determinar estadísticamente la probabilidad de falla de cada maquina y componente, con el objeto de determinar cuando se debe remplazar o ajustar antes de que una falla aparezca. Los intervalos de mantenimiento preventivo se deben llevar a cabo con una alta confiabilidad con el fin de anticiparse a las fallas y programar tiempos apropiados de reparación, sujetos a estimaciones de errores con respecto al tiempo en que un equipo puede fallar.

Una pequeña cantidad de equipos presentan características de falla (modos de fallas), dadas por el envejecimiento o relacionados con su uso, y la otra gran mayoría presentan características de fallas diversos, que no están asociados con las dos primeras causas mencionadas anteriormente. Este hecho ha

incrementado que se haga mayor énfasis en el mantenimiento basado en condición, ocasionando reducciones considerables en los intervalos de mantenimiento preventivo (PM).

El RCM busca disminuir el mantenimiento y mejorar la confiabilidad en todo el sistema a través del estudio de los ciclos de vida útil del equipo, este proceso se puede igualmente mejorar al utilizar técnicas proactivas que involucren especificaciones de diseño, integración de las condiciones de monitoreo en los procesos de producción y los procesos de exploración de la edad.

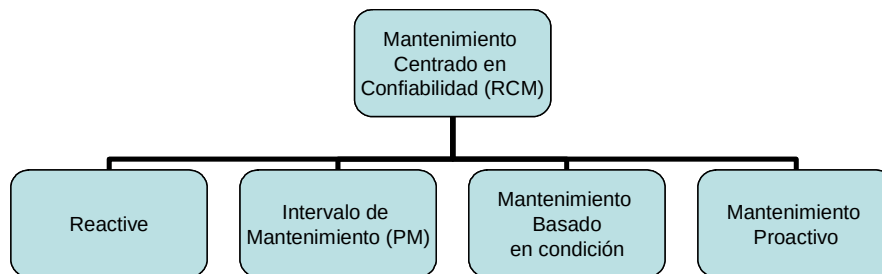


Figura 60. Componentes de un programa RCM.

6.1.6 Tipos de RCM

En la implementación de un programa de RCM, se encuentran muchas tipos de metodologías. El programa puede tener como base el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), complementado con probabilidades de falla calculadas con base en datos históricos y datos experimentales y empíricos. Estos diferentes tipos de RCM pueden ser llamados: clásicos, rigurosos, intuitivos, aerodinámico o abreviado entre otros. La decisión de que técnica debe ser aplicada y cumple correctamente con las expectativas de mantenimiento debe hacerse con base en:

- Consecuencia de la falla.
- Probabilidad de falla.
- Datos históricos disponibles.
- Tolerancia al riesgo.
- Fuentes disponibles.

6.1.7 RCM clásico y riguroso

Este tipo proporciona conocimiento acerca de las funciones de los sistemas, los modos de falla, las directrices de las acciones de mantenimiento de las fallas funcionales. Esta metodología puede ser limitada por las tres situaciones:

- Los resultados de las consecuencias de falla son catastróficos en términos medio ambientales, salud y seguridad y/o completa falla económica de la unidad de negocio.
- La confiabilidad de los resultados y los costos de mantenimiento asociados son inaceptables después de desarrollado e implementado un tipo aerodinámico de FMEA.
- Los sistemas y equipos son nuevos en la organización y el conocimiento mantenimiento corporativo sobre las fallas y modos de falla son insuficientes.

6.1.8 RCM abreviado, intuitivo y aerodinámico

El proceso RCM intuitivo generalmente identifica e implementa procesos obvios, usualmente basados en condición, tareas y análisis mínimos. Este proceso elimina tareas de bajo nivel de mantenimiento con base en los datos históricos y las entradas de mantenimiento y operación (M&O). La desventaja de este método es que la confianza en los datos históricos y/o el conocimiento del personal pueden introducir errores en el proceso que podrían llevar a apantallar fallas con una baja probabilidad de ocurrencia. Esta metodología puede ser usada cuando:

- La función del sistema y/o equipo es entendida.
- La falla funcional del sistema y/o equipo no tiene como resultado la pérdida de vidas o impactos catastróficos sobre el ambiente o el negocio.

6.2 ANÁLISIS RCM

El análisis RCM se puede implementar a través de las preguntas planteadas en el inicio de esta sección. Estas preguntas a su vez se pueden plantear a través del árbol lógico de la figura 61.

El proceso de análisis del diagrama de flujo tiene 4 posibles terminaciones:

- Desarrollo de acciones basadas en condición.
- Desarrollo de acciones basadas en intervalos (tiempo o ciclo).
- Determinar medidas de rediseño de equipos o componentes para resolver el problema y aceptar el riesgo de falla, o determinar que acciones no asociadas al mantenimiento reduce la probabilidad de falla instalando sistemas redundantes.
- No ejecutar labores de mantenimiento y esperar a que los componentes fallen para ser reparados.

6.6 MANEJO DE LAS FALLAS EN EL RCM

El RCM examina las fallas desde diferentes niveles: fallas del sistema, fallas del subsistema, fallas de los componentes, y fallas en las partes de los componentes.

6.6.1 Sistemas y fronteras de los sistemas

Un sistema esta conformado por un grupo de componentes, equipos o facilidades que soportan un requerimiento operacional. Los requerimientos operacionales de un sistema están dados por la misión o por las regulaciones medio ambientales, de seguridad y salud, políticas de calidad u otras políticas institucionales. Las fronteras de un sistema pueden ser definidas dividiendo los sistemas hacia subsistemas cuando su análisis se torna complejo.

Una frontera de un sistema o interfase, contiene una descripción de las entradas y salidas a través de una frontera.

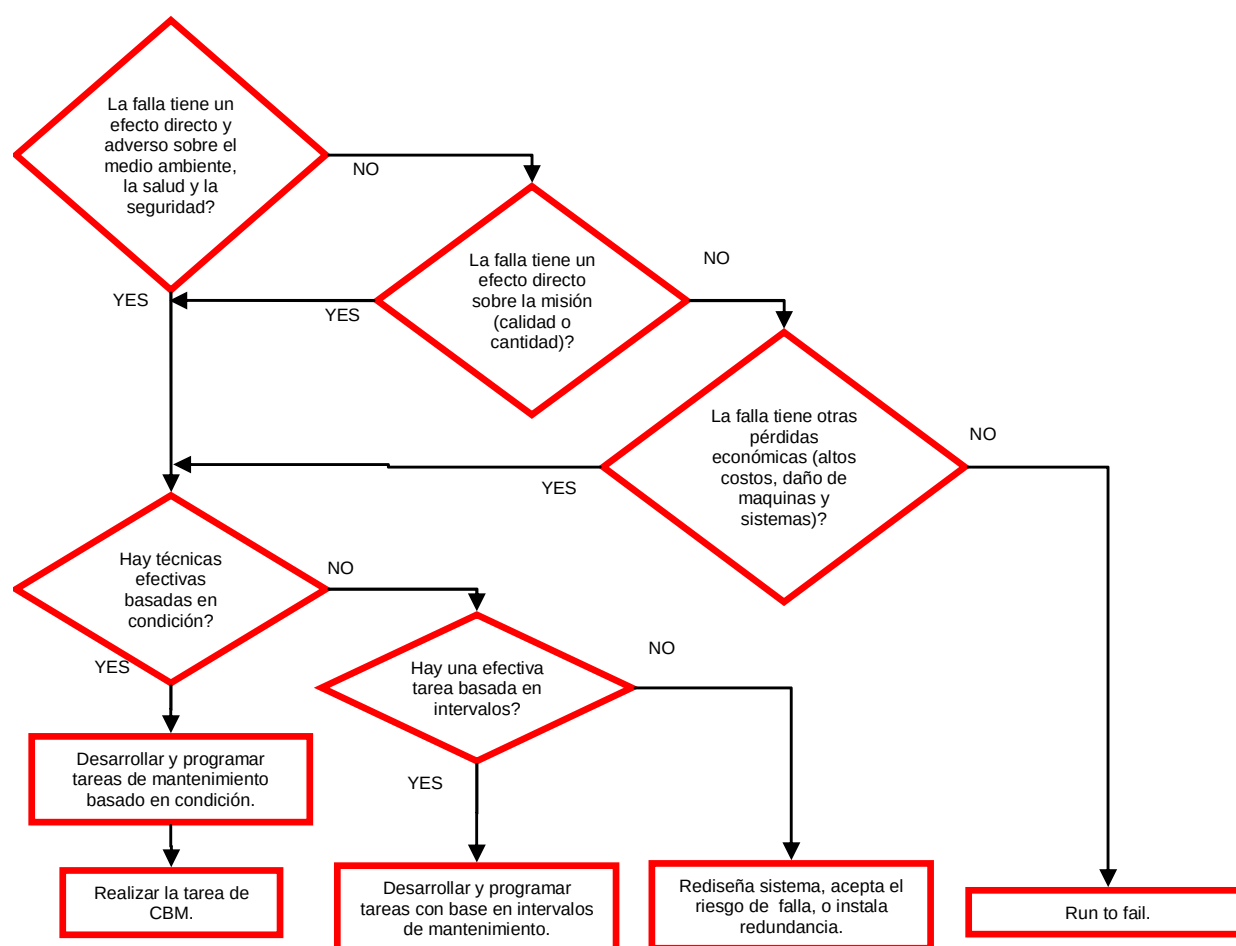


Figura 61. árbol lógico de análisis para RCM

6.5.1 Funciones y fallas funcionales.

La función define las expectativas de funcionamiento y tiene varios elementos que incluyen las propiedades físicas. La funcionalidad operacional incluye tolerancias de salida y requerimientos de tiempo para la operación continua o límites de disponibilidad requerida. Las fallas funcionales son la descripción de las diferentes formas o caminos por los cuales un equipo o un sistema pueden fallar. Es importante determinar todas las funciones de un ítem que pueden ser significativas en contexto operacional.

6.5.2 Modos de falla

Los modos de falla son fallas específicas de equipos y componentes de equipos, que tienen como consecuencia una falla funcional del sistema o subsistema. Los modos de falla dominantes por otro lado, son todos los modos de falla que son responsables de una buena proporción de falla dentro de un ítem.

6.5.3 Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que un ítem sobreviva en un periodo de tiempo dado, bajo condiciones de operación dados, en ausencia de fallas. Usualmente se expresa como vida $B_{10}(L_{10})$ o tiempo medio de falla (MTTF) o tiempo medio entre fallas (MTBF). La probabilidad condicional de falla mide la probabilidad de que un ítem dentro de un intervalo de edad falle durante este mismo intervalo.

Si la probabilidad de falla condicional se incrementa con la edad, el ítem muestra características de salida de servicio acelerada. La probabilidad de falla condicional muestra todos los efectos adversos de la edad sobre la confiabilidad. La frecuencia de mantenimiento es tomada en cuenta para determinar las decisiones de mantenimiento en función de sus costos. Sirve para determinar los intervalos de mantenimiento, pero no contribuyen en la determinación de las tareas de mantenimiento y las medidas apropiadas en la consecuencia de la falla.

6.5.4 Características de falla.

La probabilidad de falla condicional P_{cond} se puede determinar a través de las curvas de la figura 57, donde se encuentra la relación entre la probabilidad de falla de un equipo en función del tiempo de servicio. Estas diferencias entre las curvas de probabilidad de falla radican en factores propios de un equipo, como lo son los materiales de construcción y la operatividad de las máquinas en su entorno.

Debido a esto se presenta una relación entre los niveles de confiabilidad de un ítem o equipo y su edad o tiempo de operación. En el caso de componentes e ítems simples es particularmente importante este tiempo de vida útil, ya que generalmente son diseñados como elementos consumibles (periodos de vida útil cortos), y dentro de un equipo constituyen un componente reactivo límite, es decir

un elemento que determina el tiempo mínimo de funcionalidad de un equipo. Este componente reactivo límite tiene las características de un elemento consumible o reparable, dependiendo de factores como la fatiga de metal y el desgaste mecánico.

En el caso de ítems complejos, estos elementos demuestran una mortalidad infantil alta, debido a que en los procesos de instalación y puesta en marcha dentro del contexto operativo, sufren problemas de acople al sistema, después presentan un periodo de estabilización seguido de un aumento de probabilidad de falla gradual o constante antes del cumplimiento de su vida útil.

6.5.5 Prevención de fallas.

Los equipos e ítems mantenibles tienen características de funcionamiento llamadas resistencia o margen de falla. Estas características determinan, al igual que las características de falla, los límites de funcionalidad del equipo. Las características de resistencia o margen de falla pueden ser modificadas con el fin de extender la edad operativa del equipo y brindar mayor confiabilidad al sistema, al disminuir los riesgos por envejecimiento. A través de tres formas, representadas en la figura 62, se puede lograr esta variación de la característica de margen de falla:

- Disminuyendo la cantidad de esfuerzo aplicado al ítem. Se extiende según la grafica, en un periodo de tiempo de T_0 a T_1 .
- Incrementando la resistencia del ítem a la falla. Extensión entre T_1 y T_2 .
- Disminuyendo la velocidad de degradación de los ítems. Extensión del periodo de vida entre T_2 y T_3 .

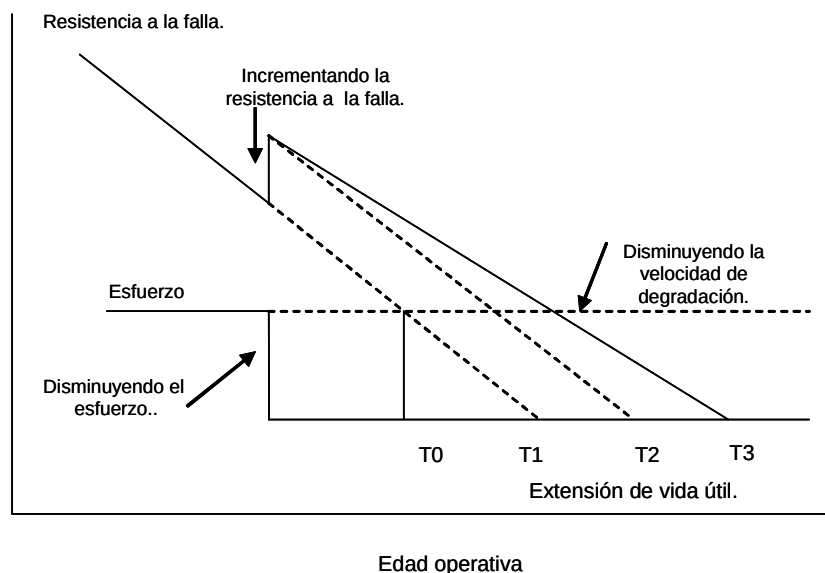


Figura 62. Extensión de la edad operativa de un equipo.

El esfuerzo sobre un ítem puede variar a lo largo del tiempo, y hace que la extensión de la vida útil del equipo sea igualmente variante con el tiempo. En un número de ítems mantenibles simples, con características similares, se puede apreciar que en todos ellos, se presenta la misma edad de falla y éstas están sujetas a las mismas variaciones estadísticas y a los mismos modos de falla. Si se puede medir la resistencia o el margen de falla de un ítem simple, se puede igualmente determinar la tarea preventiva a aplicar sobre él y la frecuencia de la misma para aumentar o extender la vida útil del equipo.

Para incrementar la resistencia a la falla o disminuir la velocidad de degradación de los ítems se hace necesario realizar tareas que incluyen, agregar material en exceso o cambiar los tipos de materiales que usan. El método más común para aumentar la vida útil de los ítems es reemplazándolo.

6.6 PROCESO DE RCM

El proceso de RCM se puede dividir en dos fases. La primera es el Inventario RCM, donde se recoge información de los activos y equipos que pertenecen a la función a analizar, identificación de los modos de falla dominantes, sus efectos y consecuencias (análisis de riesgos) para determinar su criticidad y en un posterior análisis, determinar las tareas de prevención y mitigación adecuadas para los sistemas

La segunda fase, constituye la elaboración de las tareas de mantenimiento, su programación y ejecución, junto a una verificación de las mismas y un ajuste con base en el análisis RCM.

6.7 PERSONAL DE MANTENIMIENTO INVOLUCRADO EN RCM

El equipo de trabajo de RCM debe estar constituido por personal involucrado en la gestión de los activos y que tenga experiencia en las funciones de mantenimiento y producción. Deben tener un conocimiento adecuado de los equipos que se están estudiando, su diseño, construcción, operación, mantenimiento, funciones dentro del sistema y su contexto operacional.

A través de la formación de un grupo RCM, se pueden repartir los problemas de mantenimiento dentro de un sistema y las soluciones que se tienen para cada uno de ellos, además que se tiene la información, el conocimiento y la experiencia de los miembros en una forma sistemática. En la figura 21 se puede apreciar el grupo de trabajo RCM.

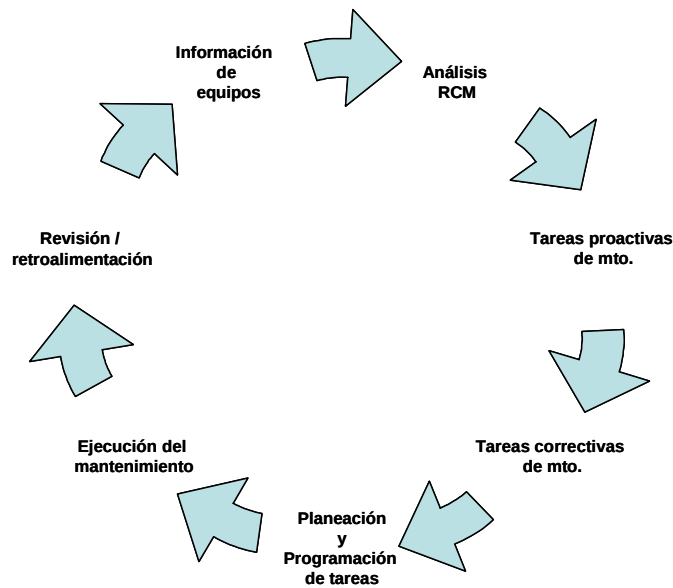


Figura 63. Etapas del proceso de RCM.

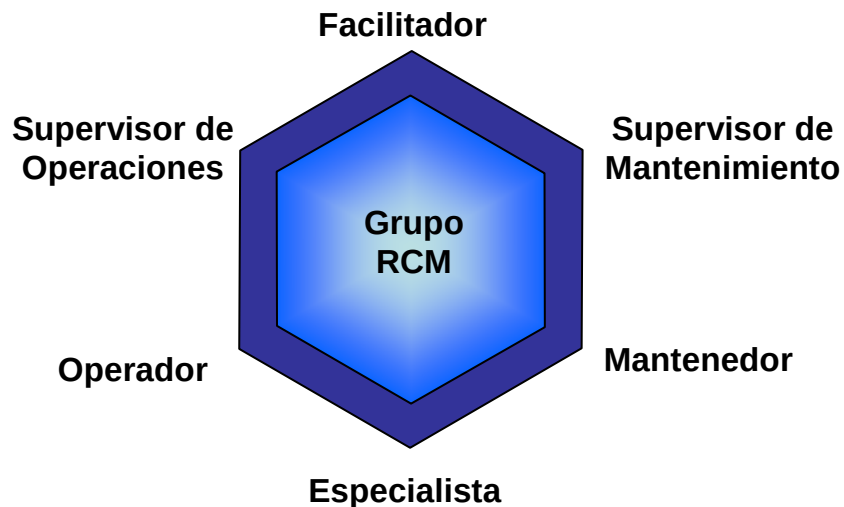


Figura 64. personal de mantenimiento para el proceso RCM

6.7.1 Facilitador.

El papel del facilitador es asegurar que el proceso de RCM se lleve a cabo a través de las siguientes actividades:

- Se apliquen correctamente las preguntas del RCM.
- Se logre un correcto consenso sobre las respuestas del RCM.
- Mantener a todos los equipos y componentes dentro del plan de trabajo.
- Hacer que las reuniones tengan el efecto esperado y el avance que se requiere.
- Generar conciencia sobre el diligenciamiento de los documentos y verificar que se haga correctamente el proceso.

6.7.2 Operaciones.

Representado por un supervisor y un operador, deben ser los encargados de:

- Proporcionar información.
- Proporcionar información sobre la operación del sistema.
- Mantener informado al grupo sobre las eventualidades del sistema en cuanto a fallas se refiere.

6.7.3 Mantenimiento.

Conformado por un supervisor de mantenimiento y los técnicos encargados del mismo. Contribuyen con el grupo en:

- Proporcionar información sobre las medidas preventivas y correctivas aplicadas a los componentes del sistema.
- Aportar al grupo información sobre las causas de falla y sus soluciones desde el punto de vista de mantenimiento.

6.7.4 Especialista.

Puede estar formado por los ingenieros de confiabilidad o proceso. Sus funciones son:

Brindar apoyo al sistema desde el punto de vista de confiabilidad mecánica y operacional.

Conocer la globalidad de la planta y sus procesos.

Aportar conocimientos sobre las fallas, causas y soluciones desde el punto de vista operativo, mecánico o conjugación de los dos.

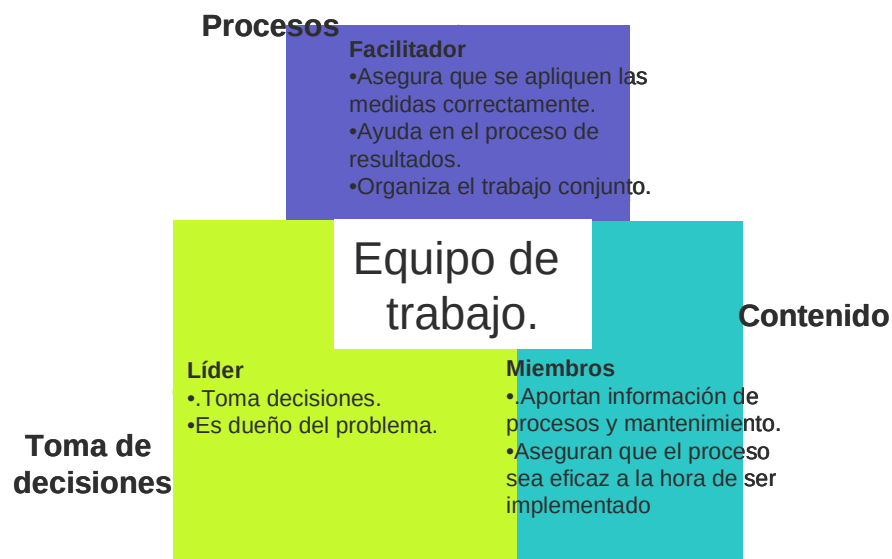


Figura 65. Equipo de trabajo RCM – roles.

6.8 PROCESO DE APLICACIÓN DEL RCM.

La metodología del RCM permite identificar las necesidades de mantenimiento de un activo, desde el punto de vista de contexto operativo. A partir del análisis de las siete preguntas centrales del análisis RCM, planteadas en secciones anteriores, se empieza el trabajo de implementación del RCM. En la figura 23 se puede apreciar este esquema de implementación.

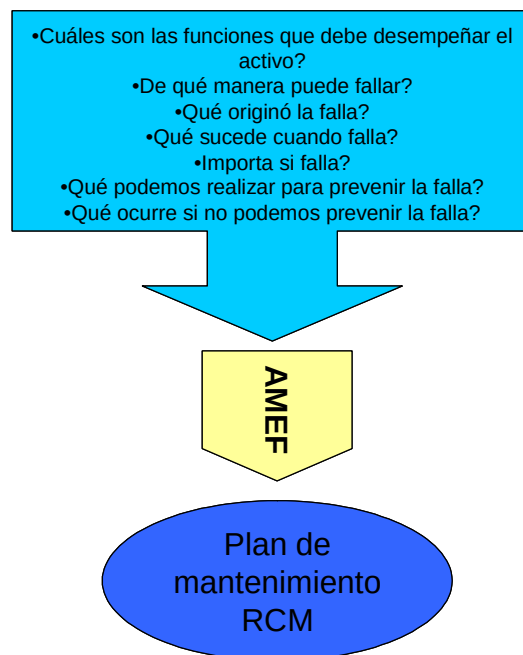


Figura 66. Proceso de implementación del RCM.

A continuación se presentan los pasos más generales para realizar un análisis RCM, en la figura 66 se puede observar el diagrama del proceso. El ciclo significa que una vez implementadas las tareas de mantenimiento, hay que evaluar el proceso para verificar que las fallas funcionales se hayan mitigado o eliminado.

6.8.1 Análisis de fallas funcionales.

El programa RCM comienza con la recolección de información sobre el sistema y los programas de mantenimiento existentes. Hace una revisión en primera medida de los equipos y componentes que integran las plantas y sus funciones dentro de ella. Posteriormente se hace un análisis de las fallas y los modos de falla existentes para cada equipo dentro del sistema total.

El análisis de fallas funcionales se realiza de la siguiente forma:

- 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 de falla.

Es importante conocer el contexto operacional sobre el cual se realiza el RCM y para ello es necesario plantear la definición y estructura de las unidades de proceso y sistema:

6.8.2 Unidades de proceso

Agrupación lógica de sistemas que suministran un servicio y funcionan conjuntamente.

6.8.3 Sistemas.

Conjunto de elementos interrelacionados dentro de las unidades de proceso y que tienen una función específica dentro de ellas.

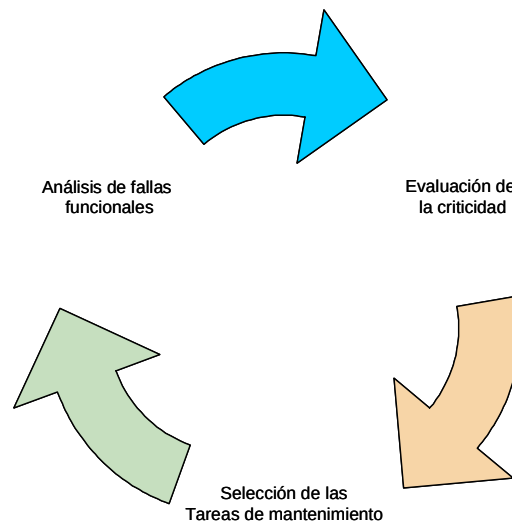


Figura 67. Proceso de análisis RCM, proceso general.

6.8.4 Estructura de equipos y componentes en una planta

Si el equipo es muy grande se deben dividir en unidades lógicas asegurando que tengan un enfoque estructurado o jerárquico de equipo o componente. La estructura de los equipos constitutivos de una planta con RCM se hace con base en las funciones del activo, por esta razón los negocios se estructuran de acuerdo a las unidades de proceso y a los sistemas. En el esquema de planta se pueden presentar dos tipos de estructuras, una estructura de operación y una estructura de mantenimiento. La primera corresponde a la definición de los equipos y los sistemas dentro de una unidad de proceso, esta es una descripción general de cada uno de los ítems mantenibles desde el punto de vista operativo y de funcionalidad. El segundo grupo corresponde a la estructura de mantenimiento en

sí; esta es la estructura sobre la cual se debe aplicar el proceso de RCM y hacen parte de ella los activos de mayor relevancia funcional y criticidad dentro de la planta.

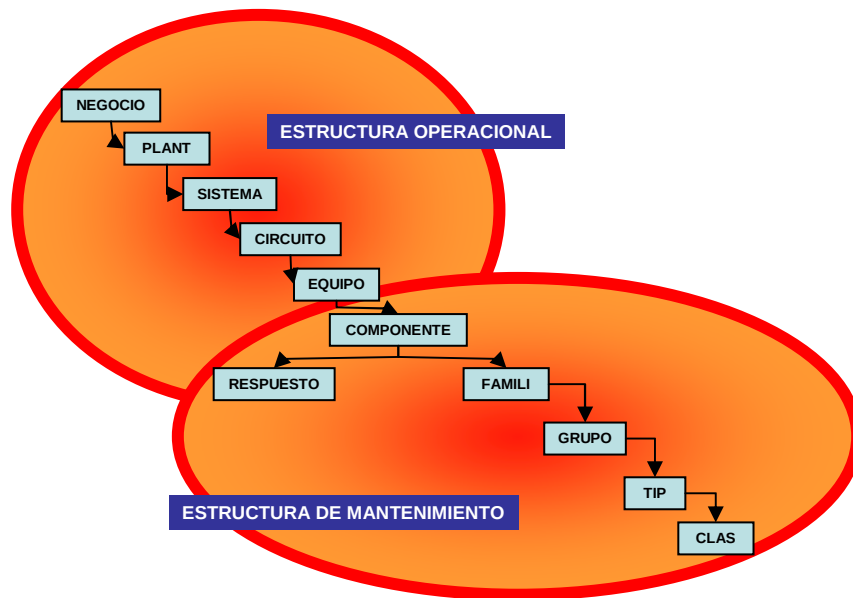


Figura 68. Estructura de equipos y componentes de planta

6.8.5 Actores del proceso operacional.

Constituyen los factores que intervienen dentro del proceso operacional y que definen un sistema de otro en cuanto operatividad.

- Perfil de operación.
- Ambiente operativo.
- Calidad y disponibilidad de los insumos requeridos para el normal funcionamiento del sistema.
- Alarmas y señales de disparo del sistema.
- Sistema de monitoreo de primera línea.
- Políticas de repuestos, recursos y logística.
- Condiciones de personal,
- Especificaciones del sistema.

6.8.6 Diagramas de entrada, proceso y salida.

A través de este diagrama se visualiza el sistema funcional y se analiza su proceso, con el fin de determinar como es el comportamiento del sistema y cuales son sus principales entradas, salidas y puntos relevantes dentro de él. Con esta información se tiene control sobre el proceso y sobre los componentes relevantes del mismo.

- Insumos: materia prima a transformar.
- Servicios: energía, aire comprimido, gas, agua de enfriamiento, entre otros.
- Controles: controles del sistema, que permiten su funcionamiento y parada.
- Proceso: descripción de la función o proceso que realiza el sistema.
- Productos primarios y productos secundarios: productos del sistema que hacen parte del proceso.
- Servicios: que requiere el sistema para funcionar o que presta a otros sistemas.
- Alarmas: señales que funcionan como control o alarma a otros sistemas, o señales que provienen de otras plantas y afectan la operación del sistema.

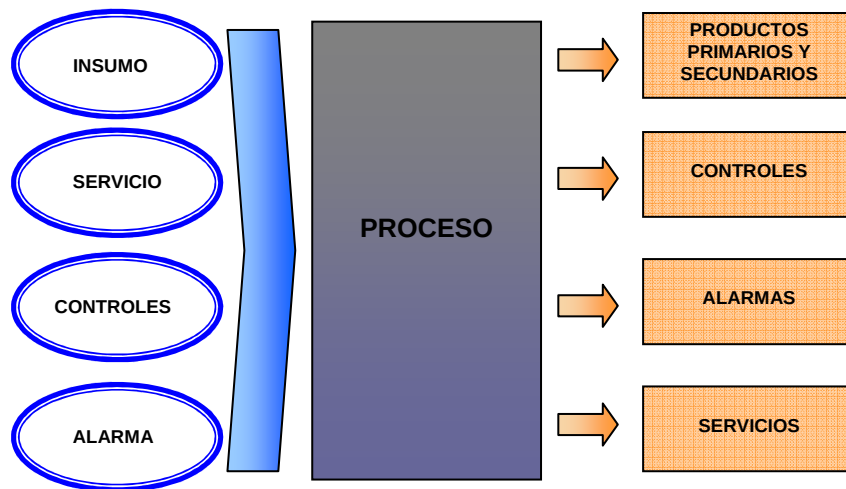


Figura 69. Estructura de un proceso a través de un diagrama EPS.

6.8.7 Evaluación de la criticidad.

La evaluación del riesgo de los equipos en su contexto operacional, es una labor que proporciona la criticidad de los mismos con base, en primera medida, de la severidad de la falla o las consecuencias que tenga desde el punto de vista seguridad, ambiental, económica, pérdidas de producción y las consecuencias de falla del mismo en el sistema; en segunda medida se tiene en cuenta la probabilidad de la falla en el sistema, o la frecuencia con que esta se presenta en el entorno operativo. La evaluación de la criticidad se realiza por medio de los siguientes pasos:

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

A continuación se pueden apreciar un esquema de tablas para la valoración de la criticidad de falla. Las dos primeras tablas valorativas se asocian a la tabla de matriz de criticidad para determinar este valor en un equipo dado.

Tabla 12. Escala de probabilidad de falla.

Escala	Tipo de Evento	Probabilidad
1	Extremadamente improbable.	1.10^{-6}
2	Improbable.	2.10^{-5}
3	Algo Probable.	4.10^{-4}
4	Probable.	8.10^{-3}
5	Muy Probable.	2.10^{-2}

Tabla 13 Clasificación de la Severidad de las Consecuencias

Nivel	Severidad de las Consecuencias
A	No severas
B	Poco Severas
C	Medianamente Severas
D	Severas
E	Muy Severas

Tabla 14. Matriz de criticidad de falla.

MATRIZ DE CRITICIDAD		CONSECUENCIA				
		A	B	C	D	E
PROBABILIDAD	5	Medio	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto
	4	Medio	Medio	Alto	Alto	Muy alto
	3	Bajo	Medio	Medio	Alto	Muy alto
	2	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto
	1	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio	Alto

6.8.8 Selección de las tareas de mantenimiento.

La selección de las tareas de mantenimiento dentro del programa de RCM, es una de las tareas más importantes de su implementación. A partir de la determinación de la criticidad, las fallas y los modos de falla de los componentes y equipos, se puede determinar un plan de mantenimiento acorde al grado de criticidad y la funcionalidad requerida por el equipo o componente dentro del sistema.

El mantenimiento preventivo dependerá del comportamiento de la probabilidad condicional de falla del equipo, de tal forma que este mantenimiento pueda ser aplicado antes de que el equipo cumpla su ciclo de vida y éste pueda ser incrementado proporcionalmente al grado de repotenciación de falla del equipo. Este grado de repotenciación depende de las características preventivas que se apliquen al equipo, el tiempo de anticipación de la falla y la disminución del riesgo latente en el equipo.

Las tareas de mantenimiento preventivo a aplicar pueden ser de tres tipos, dependiendo las necesidades del equipo dentro del contexto operacional y la importancia del mismo dentro del sistema. Se pueden realizar las tareas:

Tareas cíclicas a condición: incluyen las técnicas de mantenimiento predictivo y CBM, con el fin de determinar en que momento se debe realizar un mantenimiento con el fin de determinar el punto de falla potencial y estimar mediante las condiciones físicas inidentificables y medibles la ocurrencia de una falla funcional (parada total).

Tareas de reacondicionamiento cíclico y sustitución cíclica: independiente de la condición del equipo y las características funcionales, los equipos son revisados y reparados a frecuencias determinadas.

Acciones “a falta de”: las tareas de mantenimiento además de ser técnicamente factibles, deben ser eficientes frente a la consecuencia de fallo que se quiere prevenir. Si no son eficientes y no tienen el efecto deseado sobre la operación, no merecen la pena hacerlas y requiere otro tipo de acción. Este proceso implica acciones de rediseño de equipos y medidas de prevención indirectas.

Los pasos para la implementación de las tareas de mantenimiento son los siguientes:

- **Tareas de mantenimiento potenciales realizadas o realizables.**
- **Tiempo estimado de falla con equipo mantenido.**
- **Análisis costo beneficio.**
- **Selección de tareas pro activas, preventivas de mantenimiento.**
- **Racionalización de las tareas, optimización de dichas actividades.**
- **Análisis de la efectividad de las tareas.**