

**PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO
BASADO EN RCM, PARA LA NUEVA PLANTA DE INYECCIÓN DE AGUA PIA3
DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES LA CIRA INFANTAS DE LA
GERENCIA REGIONAL MAGDALENA MEDIO ECOPETROL S.A**

**LIBIA PAOLA FAJARDO RODRIGUEZ
FABIAN EMIRO MARTINEZ SANTIS**

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

2013

**PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO
BASADO EN RCM, PARA LA NUEVA PLANTA DE INYECCIÓN DE AGUA PIA3
DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES LA CIRA INFANTAS DE LA
GERENCIA REGIONAL MAGDALENA MEDIO ECOPETROL S.A**

**LIBIA PAOLA FAJARDO RODRIGUEZ
FABIAN EMIRO MARTINEZ SANTIS**

**Monografía de Grado presentada como requisito para optar el título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

**Director: RODRIGO ALONSO MANZANO MANZANO
Ingeniero Mecánico
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

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

2013

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Paola Ojeda y mis hijas Valery y Luciana, de igual forma a mi Madre hermano por el apoyo incondicional brindado en esta época y por la paciencia por el tiempo sacrificado que deje de dedicarles a ellos.

FABIAN EMIRO MARTINEZ SANTIS

A Dios, a mi esposo y a mi familia por acompañarme y apoyarme en todo momento ayudándome a resolver las dificultades encontradas a lo largo del camino de mi formación profesional.

PAOLA FAJARDO RODRIGUEZ

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. HISTORIA DE ECOPETROL S.A	21
2.1 MISIÓN	23
2.2 VISIÓN.....	24
2.3 MARCO ESTRATÉGICO GRUPO EMPRESARIAL 2012-2020	24
2.4 EL REGRESO DE LA CIRA INFANTAS	27
2.5 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS	30
2.6 PROCESO DE PRODUCCION EN LA CIRA INFANTAS	32
2.7 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA EN LA PIA 3	32
2.8 ORGANIGRAMA PRODUCCION ECOPETROL S.A.	33
2.9 ORGANIZACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO LA CIRA INFANTAS	34
2.9.1 Definición del proceso de mantenimiento en La Cira Infantas.	36
2.9.2 Objetivos del proceso de mantenimiento	36
2.9.3 Subprocesos.	37
2.9.4 Planeación.	38
2.9.5 Programación.....	38
2.9.6 Ejecución.	38
2.10 ORGANIGRAMA MANTENIMIENTO EN LA CIRA INFANTAS	40
2.11 MEDICIÓN DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO	41
3. MARCO TEORICO	44

TEORÍA Y GENERALIDADES DE LA METODOLOGÍA RCM “MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD”	44
3.1 Mantenimiento y RCM	49
3.2 RCM. Las siete preguntas básicas	49
3.2.1 Funciones y niveles de desempeño.....	50
3.2.2 Fallas funcionales.	53
3.2.3 Modos de fallas.....	55
3.2.4 El diagrama de decisión de RCM.....	70
3.2.5 Aplicación del proceso de RCM.	72
3.2.6 Que logra el RCM.	75
3.2.7 La Norma SAE y el RCM	78
4. INDICADORES CLAVES EN LA GESTION DEL MANTENIMIENTO.....	83
4.1 DISPONIBILIDAD	84
4.2 CONFIABILIDAD	84
4.3 MANTENIBILIDAD.....	85
5. MODELO DE IMPLEMENTACION PROPUESTO.....	88
5.1 PLANEAR	89
5.1.1 Planeación.	89
5.1.2 Alcance.	92
5.1.3 Factores de éxito.	93
5.1.4 Conformación del equipo de trabajo.	94
5.2 DESARROLLO DE LA ESTRATEGIA METODOLOGICA DE RCM PARA LOS EQUIPOS DE PIA 3.....	96
5.2.1 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DONDE SE PROPONE APLICAR LA METODOLOGÍA RCM	97
5.2.2 Conformación del equipo de trabajo RCM.	102
5.3 DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL.....	103
5.3.1 Diagrama Entrada-Procesos-Salidas.....	105
5.4 CONTEXTO OPERACIONAL DETALLADO DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA EN LA PIA 3.....	107

5.4.1. Propósito.....	107
5.4.2 Descripción general del sistema.	107
5.4.3 Sistema de Inyección- Bombas principales de inyección de agua P-3251/52/53/54/55/56.....	126
5.4.4 Sistemas Auxiliares.....	149
5.5 INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO	153
5.5.1 Lazos de control On-Off.....	154
5.6 LAZOS DE CONTROL REGULATORIO.....	154
5.7 FILOSOFÍA DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE PIA- 3....	157
5.7.1 Subestación eléctrica.....	157
5.8 DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DEL SISTEMA DE BOMBAS DE INYECCIÓN DE AGUA.....	160
5.8.1 Motor Eléctrico.....	161
5.8.2 Bomba Booster (reforzadoras).....	164
5.9 DEFINICION DE FUNCIONES	165
5.9.1 Funciones principales PIA 3.....	166
5.10 ANALISIS DE MODOS DE FALLA Y EFECTOS –FMEA	167
5.10.1 FMEA. Definición de Fallos funcionales.....	168
5.10.2 FMEA. Definición de modos de falla.....	169
5.10.3 FMEA. Definición de los efectos y consecuencias de los modos de falla.	170
5.11 SELECCIÓN DE LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO (ARBOL LOGICO DE DECISION)	174
5.11.1 Actividades Preventivas	175
5.11.2 Actividades correctivas.....	179
5.12 ANALISIS COSTO BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACION DEL RCM EN LA PIA 3.....	181
6. CONCLUSIONES	185
BIBLIOGRAFIA.....	187

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista Parcial Refinería de Barrancabermeja.	22
Figura 2. Marco estratégico Ecopetrol S.A. 2012-2020.	24
Figura 3. Estructura Organizacional ECOPETROL S.A.	25
Figura 4. Estructura Organizacional Gerencia Regional Magdalena Medio.	26
Figura 5. Grafica de producción del Campo La Cira Infantas.	30
Figura 6. Mapa del campo La Cira Infantas.	31
Figura 7. Panorámica General Planta de Inyección No. 3.	33
Figura 8. Organización estructural Área de Inyección.	34
Figura 9. Sistema típico de mantenimiento.	35
Figura 10. Proceso de mantenimiento en Ecopetrol S.A.	39
Figura 11. Proceso Mantenimiento a nivel de subprocesos.	40
Figura 12. Organigrama de mantenimiento en La Cira Infantas.	41
Figura 13. Un bien conservable.	51
Figura 14. Una situación fuera del alcance de mantenimiento.	51
Figura 15. Límites superior e inferior.	52
Figura 16 Planilla Informativa de RCM.	53
Figura 17. Estados de falla.	54
Figura 18. Modos de falla de una bomba.	56
Figura 19. Categoría I de modos de fallas.	57
Figura 20. Categoría II de modos de fallas.	58
Figura 21. Tiempo de inactividad versus tiempo de reparación.	60
Figura 22. Identificación y desarrollo de una estrategia de mantenimiento para una falla que afecta la seguridad o el medioambiente.	62
Figura 23. Identificación y desarrollo de una estrategia de mantenimiento para una falla que posee consecuencias operativas.	63
Figura 24. Identificar y desarrollar estrategias de mantenimiento para fallas ocultas.	64

Figura 25. Evaluación de las consecuencias de la falla.....	65
Figura 26. Proceso de selección de tareas.....	69
Figura 27. Planilla de Decisión RCM	70
Figura 28. Diagrama de decisión de RCM.....	71
Figura 29. Organización de un grupo típico de revisión.....	73
Figura 30. Implementación de las recomendaciones del RCM.....	74
Figura 31. Algoritmo de decisión MCC	80
Figura 31. Indicadores claves de mantenimiento.....	83
Figura 32. Fases de Implementación del RCM.....	88
Figura 33. Diagrama de Flujo del proceso RCM.....	97
Figura 34. Modelo básico de criticidad.....	99
Figura 35. Matriz de Clasificación de criticidad para los equipos de PIA 3.....	101
Figura 36. Definición de Contexto Operacional	104
Figura 37. Diagrama Entrada-Procesos-Salidas.....	105
Figura 38. Esquema general proceso Planta de inyección PIA 3	108
Figura 39. Tanques K-3011 y K-3012, recibo de agua de producción.....	109
Figura 40. Válvula SDV-3011 PIA-3.....	110
Figura 41. Bombas P-3031/32/33/34 carga a filtros cascara de nuez.....	113
Figura 42. Filtros cascara de nuez F-3071/72/73/74.....	115
Figura 43. Filtro interno cascara de nuez.....	116
Figura 44. Esquema del sistema de filtración PIA 3.....	116
Figura 45. Tanque K-3211 de Agua Filtrada.....	118
Figura 46. Tanque Almacenamiento Agua Filtrada Y Bombas Booster	120
Figura 47. Bombas reforzadoras (booster) P-3231/32/33/34/35/36.....	122
Figura 48. Diagrama General Instrumentación Bombas Inyección PIA3.....	127
Figura 49. Bomba Centrifuga Inyección de Agua – PIA3.....	129
Figura 50. Bomba inyección capacidad 25.000 bpd	132
Figura 51. Bomba Centrifuga Inyección de Agua – PIA3.....	134
Figura 52. Bomba inyección capacidad 30.000 BWPD.....	137
Figura 53. Decantadores DE-3091/92 PIA-3.....	140
Figura 54. Esquema general del proceso de decantación en PIA-3.....	141

Figura 55. Conexión Para Inyección De Flocculante PIA-3.....	143
Figura 56. Bombas de agua a reproceso P-3035/36/37.	145
Figura 57. Bombas verticales agua a reproceso, P-3038/39	147
Figura 58. Caja de lodos y bombas de reproceso PIA3.....	148
Figura 59. Sistema de compresión de aire para instrumentos.....	150
Figura 60. Lazo Control presión recirculación.....	156
Figura 61. Lazo control de presión de inyección.....	156
Figura 62. Diagrama EPS para la PIA 3.	159
Figura 63. Componentes del sistema horizontal de inyección de agua.	161
Figura 64. Flujograma para el desarrollo del AMEF.....	168
Figura 65. Diagrama de flujo para determinar consecuencias de modos de falla.	172
Figura 66. Identificación de las consecuencias de los modos de fallas.	175
Figura 67. Curva de comportamiento de las fallas potenciales.....	177
Figura 68. Árbol lógico de decisión, basado en la norma SAE JA1012.	180

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores de gestión y seguimiento al mantenimiento.....	42
Tabla 2. Factores importantes en la gestión del mantenimiento.....	45
Tabla 3. Criterios de Valoración para la evaluación de la criticidad de los equipos de PIA 3.	100
Tabla 4. Instrumentación asociada a las bombas P-3031/32/33/34.....	114
Tabla 5. Instrumentación asociada al sistema de filtración.....	117
Tabla 6. Instrumentación asociada al tanque K-3211	121
Tabla 7. Instrumentación asociada a bombas booster P-3231/32/33.	124
Tabla 8. Instrumentación asociada a las bombas P-3234/35/36.....	126
Tabla 9. Instrumentación asociada a las bombas principales de inyección P-3251/52/53.....	133
Tabla 10. Instrumentación asociada bombas Centrilift P-3251/52/53.....	138
Tabla 11. Instrumentación asociada a los decantadores en PIA-3.	143
Tabla 12. Instrumentación asociada a las bombas P-3035/36/37.....	146
Tabla 13. Instrumentación asociada al sistema de bombeo de reproceso P-3038/39.....	147
Tabla 14. Caso 1 Ahorros costos de mantenimiento.	182

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Clasificación de criticidad de los equipos PIA 3.....	189
Anexo B. Hoja FMEA para los modos de falla definidos.....	194
Anexo C. Listado de tareas de mantenimiento.....	211

RESUMEN

TÍTULO: PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN RCM, PARA LA NUEVA PLANTA DE INYECCIÓN DE AGUA PIA3 DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES LA CIRA INFANTAS DE LA GERENCIA REGIONAL MAGDALENA MEDIO ECOPETROL S.A.*

AUTORES: FABIAN EMIRO MARTINEZ SANTIS**
PAOLA FAJARDO RODRIGUEZ**

PALABRAS CLAVES: Mantenimiento centrado en confiabilidad, RCM, CRITICIDAD, AMEF, Contexto Operacional, inyección de agua.

DESCRIPCION: La presente monografía consiste en el desarrollo de un modelo de propuesta para la implementación del plan de mantenimiento para la nueva planta de inyección de agua 3 en La Cira Infantas, basado en la metodología RCM, que permita alcanzar los estándares de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de los equipos.

El alcance del presente documento es determinar todo el plan de mantenimiento en la PIA 3, a partir de un modelo sistemático y ordenado, como es el RCM. En el presente trabajo se muestra toda la metodología paso a paso de cómo se debe desarrollar la estrategia al interior de la organización. El desarrollo de la propuesta, parte de un análisis de criticidad, con criterios de evaluación definidos por el equipo de trabajo, en donde se definen los equipos críticos, a los cuales se les debe aplicar la metodología, posteriormente se desarrolla toda la metodología RCM, partiendo de los modos de fallas de los equipos. Los resultados permitirán determinar todo el plan de mantenimiento requerido para los equipos definidos, en un modelo de gestión del mantenimiento, basado en el riesgo y la confiabilidad.

Se presenta al final del documento un análisis económico que permite ver los ahorros en costos de mantenimiento, que se obtienen al aplicar esta metodología, comparadas con métodos tradicionales, como por ejemplo, realizar el mantenimiento basado en las recomendaciones dadas por los fabricantes de los equipos.

* Monografía

**Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Especialización en Gerencia de mantenimiento. Director: Ing. Rodrigo Alonso Manzano Manzano.

ABSTRACT

TITLE: PROPOSAL FOR THE IMPLEMENTATION OF THE PLAN OF MAINTENANCE BASED ON RCM, FOR THE NEW PLANT OF WATER INJECTION PIA3, OF THE SUPERINTENDENCE OF OPERATIONS, LA CIRA INFANTAS OF THE REGIONAL MANAGER MAGDALENA MEDIO ECOPETROL S.A.*

AUTHORS: FABIAN EMIRO MARTINEZ SANTIS**
PAOLA FAJARDO RODRIGUEZ**

Keywords: Maintenance focused on reliability, RCM, CRITICALITY, FMEA, operational context, water injection.

Description: This monograph consists of the development of a proposal for the implementation of the maintenance plans for the new plant of water injection 3 at La Cira Infantas, based on the RCM methodology, enabling to meet the standards of reliability, availability and maintainability of the equipment. The scope of this document is to determine all the maintenance plan in PIA3, based on a model of systematic and orderly, as it is the RCM. The present work shows all the step by step methodology of how the strategy within the Organization should be developed. The development of the proposal, based on an analysis of criticality, with assessment criteria defined by the work team, where are defined the critical equipment, which must apply the methodology, subsequently all RCM, starting in the equipment failure modes. The results will help determine all maintenance plan required for the defined equipment, in a model of maintenance, risk and reliability-based management.

An economic analysis that allows you to see the savings in maintenance costs, which are obtained by applying this methodology, compared to traditional methods, as for example, to perform maintenance based on the recommendations given by the manufacturers of the equipment is presented at the end of the document.

*Model for using SAP as a tool to operate a model of reliability-centered maintenance

**School of Mechanical Engineering. Maintenance management Specialization. Director: Ing. Rodrigo Alonso Manzano Manzano.

INTRODUCCIÓN

Mantenimiento tiene como objetivo: asegurar la competitividad de la empresa por medio de esfuerzos, acciones y decisiones porque debe mantener la disponibilidad y confiabilidad de las funciones deseadas, el cumplimiento de los requisitos del sistema de calidad de la empresa, el cumplimiento de todas las normas de seguridad y medio ambiente y el máximo beneficio global.

El mantenimiento está reaccionando ante nuevas expectativas. Estas incluyen una mayor importancia a los aspectos de seguridad y del medio ambiente, un conocimiento creciente de la conexión existente entre el mantenimiento y la calidad del producto, y un aumento de la presión ejercida para conseguir una alta disponibilidad de la maquinaria al mismo tiempo que se optimizan.

Frente a esta avalancha de cambios, el personal que dirige el mantenimiento está buscando un nuevo camino. Quiere evitar equivocarse cuando se toma alguna acción de mejora. Trata de encontrar un marco de trabajo estratégico que sintetice los nuevos avances en un modelo coherente, de forma que puedan evaluarlos racionalmente y aplicar aquellos que sean de mayor valía para ellos y sus compañías.

El plan de mantenimiento es el elemento en un modelo de gestión de activos que define los programas de mantenimiento a los activos (actividades periódicas preventivas, predictivas y detectivas), con los objetivos de mejorar la efectividad de estos, con tareas necesarias y oportunas, y definir las frecuencias, las variables de control, el presupuesto de recursos y los procedimientos para cada actividad.

El plan de mantenimiento, no es más que una serie de tareas que de manera planeada y programada se deben realizar a un equipo o sistema productivo con una frecuencia determinada.

El plan de mantenimiento influye de manera notable en la confiabilidad de un activo, ya que si es certero, adecuado y justificado está constituido por las tareas absolutamente necesarias, es decir no más actividades de las requeridas y no menos de las que se requieren, el plan de mantenimiento facilita por su contribución a la gestión de mantenimiento, a la realización de presupuestos confiables, siempre y cuando no lleve a la empresa a hacer más mantenimiento del requerido y en el peor de los casos a introducir mortalidad infantil en las instalaciones.

Esta monografía introduce una filosofía que provee justamente ese esquema de trabajo. Se llama Reliability Centred Maintenance, o RCM (Mantenimiento centrado en la confiabilidad).

ECOPETROL S.A, adopto a partir del año 2000, la metodología RCM, para aplicarla en sus plantas, es así como inicio la aplicación de esta metodología en las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena, y posteriormente fue extendiendo su aplicación a los otros negocios, la Vicepresidencia de Producción y la Vicepresidencia de transporte. Es así como ECOPETROL S.A, desarrolló sus procedimientos e instructivos corporativos para el desarrollo de la metodología en sus activos, y a través de todos estos años, se ha venido aplicando, de hecho se han desarrollado varios trabajos de grado a nivel de especialización, relacionados con la aplicación de esta metodología, en diferentes plantas, estaciones y facilidades ubicadas en diferentes áreas geográficas y que manejan diversos procesos. Si se aplica correctamente, RCM transforma la relación entre el personal involucrado, la planta en sí misma, y el personal que tiene que hacerla funcionar y mantenerla. También permite poner en funcionamiento nueva maquinaria a gran velocidad, seguridad y precisión.

1. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El impacto económico es el principal motivo para establecer estrategias que aumenten y mantengan la disponibilidad y confiabilidad de los equipos que permitan cumplir las funciones para los cuales fueron diseñados. La Planta de Inyección de Agua No. 3 es un proyecto nuevo para la gerencia y por ende es la metodología RCM la apropiada para establecer todo el plan de mantenimiento de la planta, lo que le permitirá operar de manera confiable y segura, optimizando de manera significativa los costos de repuestos y horas hombre, mejorando los indicadores de gestión del Departamento de Mantenimiento La Cira Infantas.

El presente trabajo pretende proponer y posteriormente establecer un modelo de estrategia de mantenimiento que apunte a reducir los tiempos de indisponibilidad y aumentar la confiabilidad de los equipos que hacen parte de dicha planta, y establecer métodos que permitan actuar preventivamente ante las potenciales fallas que puedan presentarse en estos equipos, lo que indudablemente contribuirá en gran parte con la MEGA de Ecopetrol del millón de barriles limpios producidos.

Adicionalmente, tomando como referencia la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad, así como los altos costos de mantenimiento correctivo, y los malos actores en las plantas de inyección de agua existentes, se ha creado la necesidad de aplicar una metodología que permita obtener mejoras porcentuales considerables en estos indicadores, así como la optimización efectiva de los costos de mantenimiento, es por ello que se ha escogido la metodología RCM como la apropiada, para solucionar estos inconvenientes, pues tiene como eje principal, la implementación de las tareas de mantenimiento más apropiadas acorde con los modos de falla de los equipos y que busca siempre preservar la función de los equipos, para los cuales fueron diseñados.

Con el desarrollo del presente trabajo se busca realizar un análisis comparativo que permita evidenciar una optimización de los costos en mano de obra y repuestos, siempre enmarcado dentro de un análisis costo-riesgo-beneficio, en las tareas de mantenimiento, conservando siempre la función de los equipos, al pasar de la manera tradicional, como se está haciendo actualmente, a como sería con la metodología propuesta de RCM, en cuanto a las tareas de mantenimiento, se refiere.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Superintendencia de Operaciones La Cira Infantas, para su operación cuenta como método para la extracción del crudo, la recuperación secundaria, la cual se sustenta básicamente en la inyección de agua a la formación a alta presión, y con ciertas condiciones de sólidos y niveles de oxígeno.

Por esta razón, es muy importante, dentro de su operación, garantizar una alta confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad en sus cuatro plantas de inyección de agua, la cual le permitirá cumplir con los pronósticos de inyección, y a su vez redundara en incrementos graduales de su producción de crudo.

Para ello, se ha tomado como planta piloto, la PIA 3, para la aplicación de la metodología RCM, metodología que permitirá implementar todo el plan de mantenimiento requerido para los activos que la conforman.

Aunado a esto, La Cira Infantas, como modelo de inyección de agua para los demás campos de ECOPETROL S.A, requiere estar alineado con la metodología corporativa que ECOPETROL S.A ha establecido para sus modelos de implementación y optimización de planes de mantenimiento, basado en el riesgo y la confiabilidad, la cual es el RCM.

2. HISTORIA DE ECOPETROL S.A

Ecopetrol S.A. es una Sociedad de Economía Mixta, de carácter comercial, organizada bajo la forma de sociedad anónima, del orden nacional, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, de conformidad con lo establecido en la Ley 1118 de 2006, regida por los Estatutos Sociales que se encuentran contenidos de manera integral en la Escritura Pública No. 5314 del 14 de diciembre de 2007, otorgada en la Notaría Segunda del Círculo Notarial de Bogotá D.C.

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

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

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

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

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

La empresa funciona como sociedad de naturaleza mercantil, dedicada al ejercicio de las actividades propias de la industria y el comercio del petróleo y sus afines,

conforme a las reglas del derecho privado y a las normas contenidas en sus estatutos, salvo excepciones consagradas en la ley (Decreto 1209 de 1994).

Figura 1. Vista Parcial Refinería de Barrancabermeja.



Fuente. www.ecopetrol.com.co

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

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

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

Con la expedición del Decreto 1760 del 26 de Junio de 2003 modificó la estructura orgánica de la Empresa Colombiana de Petróleos y la convirtió en Ecopetrol S.A.,

una sociedad pública por acciones, ciento por ciento estatal, vinculada al Ministerio de Minas y Energía y regida por sus estatutos protocolizados en la Escritura Pública número 4832 del 31 de octubre de 2005, otorgada en la Notaría Segunda del Circuito Notarial de Bogotá D.C., y aclarada por la Escritura Pública número 5773 del 23 de diciembre de 2005.

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

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

Actualmente, Ecopetrol S.A. es la empresa más grande del país con una utilidad neta de \$15,4 billones registrada en 2011 y la principal compañía petrolera en Colombia. Por su tamaño, pertenece al grupo de las 40 petroleras más grandes del mundo y es una de las cuatro principales de Latinoamérica.

2.1 MISIÓN

Encontramos y convertimos fuentes de energía en valor para nuestros clientes y accionistas, asegurando la integridad de las personas, la seguridad de los procesos y el cuidado del medio ambiente, contribuyendo al bienestar de las áreas donde operamos, con personal comprometido que busca la excelencia, su desarrollo integral y la construcción de relaciones de largo plazo con nuestros grupos de interés

2.2 VISIÓN

Ecopetrol, Grupo Empresarial enfocado en petróleo, gas, petroquímica y combustibles alternativos, será una de las 30 principales compañías de la industria petrolera, reconocida por su posicionamiento internacional, su innovación y compromiso con el desarrollo sostenible.

2.3 MARCO ESTRATÉGICO GRUPO EMPRESARIAL 2012-2020

Figura 2. Marco estratégico Ecopetrol S.A. 2012-2020.

Upstream	Producción equivalente (KBPED) (Miles de Barriles de Petróleo Equivalente)	1 millón de barriles de petróleo equivalente al 2015 y 1.300 barriles limpios al 2020
	Incorporación de reservas 1p (Nuevas, revaluación y compra)	6.200 MBOE (Millones de Barriles de Petróleo Equivalente)
	ROCE Upstream (%)	28%
Downstream	ROCE Downstream (%) (2020 - 2025)	9-11%
	ROCE de Refinación (%) Estar entre los líderes en refinación, en Latinoamérica	9-11%
	Petroquímica	(ROCE) del 13%
	Biocombustibles (KTA)	Producir 450 KTA en el 2020 (en todos los proyectos que participe el GE)
	Gas (GBTUD)	Ventas Nacionales e Internacional 1.000 GBTUD incluyen regalías
Transporte	ROCE de Transporte (%)	11%

* ROCE: Criterio de Rentabilidad Sobre Capital Empleado

Fuente. ECOPETROL S.A.

Ecopetrol S.A. es una Sociedad de Economía Mixta, de carácter comercial, organizada bajo la forma de sociedad anónima, del orden nacional, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, de conformidad con lo establecido en la Ley 1118 de 2006, regida por los Estatutos Sociales que se encuentran contenidos de manera integral en la Escritura Pública No. 5314 del 14 de diciembre de 2007, otorgada en la Notaría Segunda del Círculo Notarial de Bogotá D.C. Ecopetrol S.A presenta la siguiente estructura organizacional:

Figura 3. Estructura Organizacional ECOPETROL S.A.



Fuente. www.ecopetrol.com.co

A su vez la Gerencia Regional Magdalena Medio, la cual pertenece a la Vicepresidencia de Producción y a la que pertenece la Superintendencia de Operaciones La Cira Infantas, presenta la siguiente estructura

La Gerencia Regional Magdalena Medio, se encuentra dividida en: Superintendencia de Operaciones del Rio, Superintendencia de Operaciones de Mares y la Superintendencia de Operaciones La Cira Infantas.

Figura 4. Estructura Organizacional Gerencia Regional Magdalena Medio.



Fuente. www.ecopetrol.com.co

2.4 EL REGRESO DE LA CIRA INFANTAS

El modelo de optimización de campos maduros en el mundo podría tener su máxima expresión en Colombia en La Cira-Infantas, uno de los tres hallazgos más importantes en la historia nacional, ubicado en el Magdalena Medio y con una producción acumulada cercana a los 800 millones de barriles desde su descubrimiento, en los albores del siglo XX.

El campo se caracteriza por tener las mayores reservas de petróleo “in situ” de Colombia, estimadas en 3.500 millones de barriles. Sin embargo, su factor de recobro a lo largo de casi un siglo de producción es de aproximadamente 20%. Es decir, de cada diez barriles que existen en el subsuelo, sólo dos se podrían extraer.

Este factor de recobro responde a los procesos y tecnologías usadas desde el inicio de la explotación del campo en los años 20, pero es bajo con respecto a los estándares actuales en otros campos petroleros de Colombia y el mundo. Lo anterior permite vislumbrar posibilidades materiales de incremento de reservas y producción, mediante la incorporación de tecnologías de recobro mejorado, tales como inyección de agua, gas, vapor, drenaje gravitacional y perforación horizontal y radial.

El potencial y la aparición de tecnologías a costos razonables en el mundo llevaron a Ecopetrol a estudiar desde hace algún tiempo la posibilidad de “revivir” uno de sus campos más significativos del país, pero que hoy se encuentra en su etapa de agotamiento, con cerca de 5.500 barriles por día, cuando en su pico, en los 60, el campo bordeó los 60.000 barriles por día. Desde el primer momento se reconoció que para darle una nueva vida a La Cira-Infantas era necesario adelantar cuantiosas inversiones para la incorporación de tecnologías que

permitieran aumentar su factor de recobro y acometer en paralelo actividades exploratorias en áreas aledañas. Es decir, la idea es aprovechar más lo que ya se tiene en el subsuelo y, además, buscar nuevas reservas en los alrededores.

Con el fin de adelantar este proceso, Ecopetrol invitó en julio de 2003 a un grupo de compañías de alto perfil y con reconocida experiencia mundial en este tipo de proyectos. Entre las ocho firmas invitadas estaban BP, Total, Chevron-Texaco, Nexen, China National Oil Corporation y Occidental de Colombia. Esta última empresa fue la seleccionada para suscribir un acuerdo de intención con el objetivo de analizar conjuntamente la viabilidad técnica y comercial de estructurar un proyecto de aplicación tecnológica y recobro incremental en el campo. Con el estudio se decidirá si el proyecto es viable y, en caso de serlo, la forma en que se llevará a cabo.

Para tener una dimensión de lo que podría significar el proyecto de La Cira-Infantas se puede destacar que por cada punto porcentual en el que se mejore el factor de recobro, se incorporarían 35 millones de barriles de reservas adicionales. Para lograr incorporar ese potencial se requerirá realizar millonarias inversiones, cuya forma de ejecución todavía no ha sido definida. Se contempla que Ecopetrol continuaría como operador de las actividades de producción.

El proyecto no sólo es importante para el país, por el aumento de las reservas recuperables y la mayor producción, sino para la región, que se beneficiaría de las inversiones y del impulso a la economía y al empleo, y para Ecopetrol, que reviviría uno de los campos que dio comienzo a su historia, para beneficio de sus trabajadores y de su nuevo rol de empresa eficiente

Los campos La Cira-Infantas están ubicados en la parte central de la antigua Concesión de Mares, al oriente del río Magdalena y al sur del río Sogamoso, abarcando un área de 160 kilómetros cuadrados y a 22 kilómetros de

Barrancabermeja. Son los campos de mayor producción a lo largo de la historia en la cuenca del valle medio del Magdalena.

En la actualidad se han perforado en el área de La Cira-Infantas 1.703 pozos, de los cuales 794 son productores, 239 son inyectores de agua y 603 inactivos. La producción promedio de aceite es hoy de cerca de 36.000 barriles por día. Infantas: El pozo descubridor del campo fue el Infantas 2, terminado en abril de 1918. Inicialmente, la mayor parte de los pozos produjeron por flujo natural; luego se pasó a un sistema de levantamiento por gas, el cual fue desmontado en 1935 para dar paso al sistema actual de bombeo mecánico.

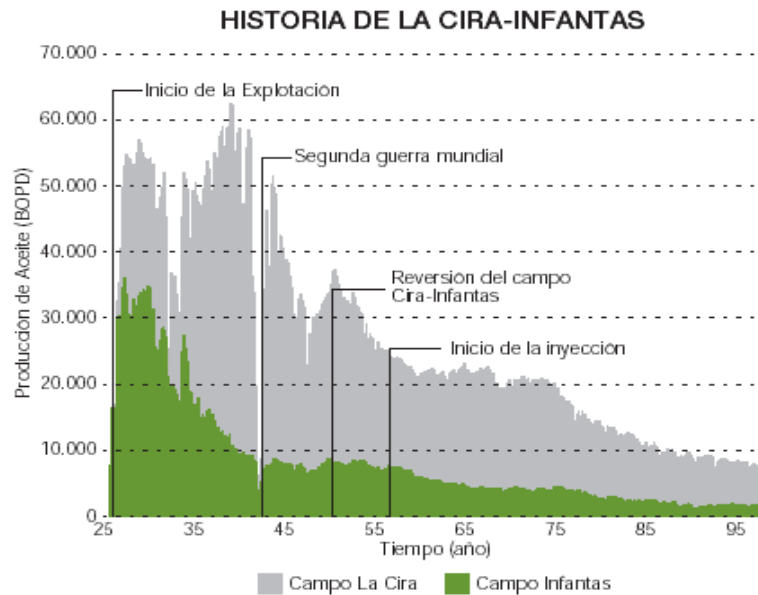
La máxima producción se alcanzó en 1927, con una tasa de 37.900 barriles por día.

La Cira: La perforación del anticlinal de La Cira comenzó en febrero de 1925, con el pozo LC-58. En este mismo año se descubre la zona B y las arenas 116 de la zona A, mediante la perforación del pozo LC-116.

Con la perforación y la terminación del pozo LC-125 se descubre la zona C. A finales de 1940 se había perforado un total de 675 pozos. Luego de algunos proyectos de inyección de gas en los años 30, se emprende el primer programa de inyección de agua en el campo La Cira entre 1946 y 1949. En 1957 se inició la ejecución de recobro de aceite por inyección de agua en la zona C del campo La Cira, en un área de 280 acres.

Entre 1964 y 1966, Ecopetrol perforó 19 pozos que permitieron el desarrollo del Área La Cira Norte, considerando el pozo LC-1753 como el descubridor del área. En los años 70, Ecopetrol realizó otros programas de inyección. La producción máxima del campo se obtuvo en 1939, con 53 mil barriles por día. El pico de producción secundaria se alcanzó en octubre de 1974, con una tasa de 11.780 barriles por día.

Figura 5. Grafica de producción del Campo La Cira Infantas



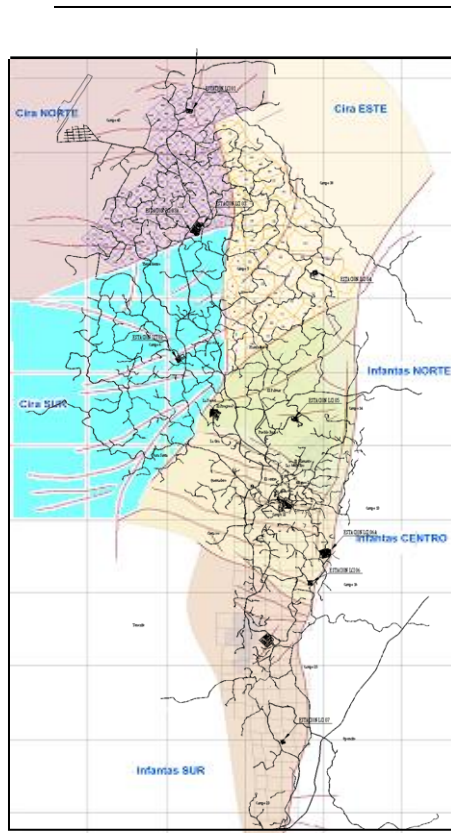
Fuente. Carta Petrolera Edición 108.

2.5 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS

Los campos La Cira-Infantas están ubicados en la parte central de la antigua Concesión de Mares, al oriente del río Magdalena y al sur del río Sogamoso, abarcando un área de 160 kilómetros cuadrados y a 22 kilómetros del suroeste de Barrancabermeja en el corregimiento El Centro, Departamento de Santander, Colombia, Sur América. Son los campos de mayor producción a lo largo de la historia en la cuenca del valle medio del Magdalena, consta de 31 veredas, 3984 viviendas (dato del 2011 incremento del 30%, respecto del 2008), actualmente viven 3.361 familias con 14.000 personas y tiene una producción diaria de 36.000 Barriles promedio día de crudo, tiene aproximadamente 1.500 Km de vías, el crudo extraído tiene arena y alto corte de agua (Recobro secundario por inyección de agua) y que usa los sistemas de levantamiento artificial como: unidades de

bombeo mecánico, bombas de cavidades progresivas (PCP, por sus siglas en inglés Progressing Cavity Pumping). Geologicamente el campo se encuentra situado en la sección central del Rio Magdalena sobre sedimentos terciarios transportados por el mismo rio, que descansan sobre material cretácico predominantemente marino. Hay muchos campos de petróleo más pequeños que se encuentran en las vecindades de La Cira Infantas, notablemente el campo Casabe 20 Km al oeste y Provincia a 65 Km al norte. El área Cira Este, en la cual se encuentra la Planta de Inyección, PIA 3, se encuentra al Nororiente del Campo La Cira-Infantas y tiene una extensión de aproximadamente veinte (20) Kilómetros cuadrados (2000 Hectáreas).

Figura 6. Mapa del campo La Cira Infantas



Fuente. Presentación Facilidades La Cira Infantas. ECOPETROL S.A.

2.6 PROCESO DE PRODUCCION EN LA CIRA INFANTAS

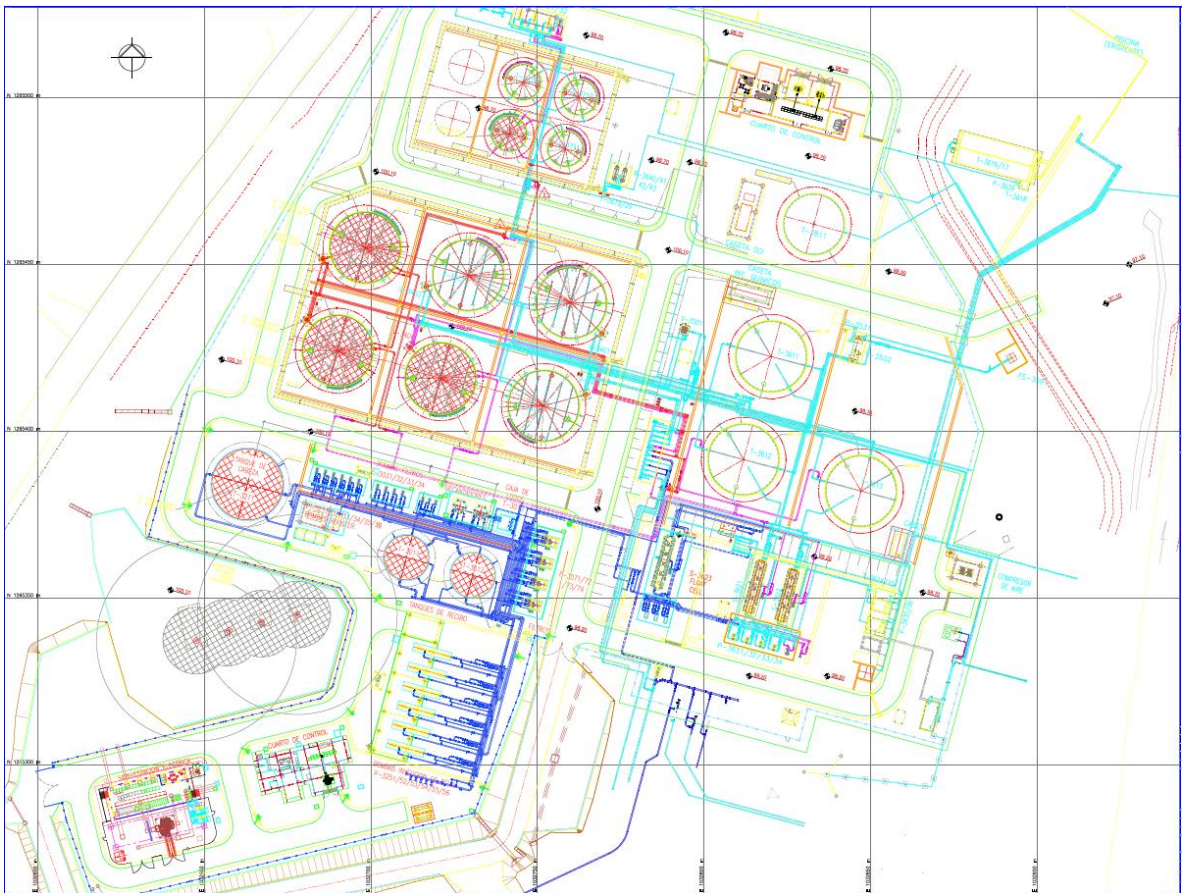
Actualmente, la Superintendencia de Operaciones La Cira Infantas, cuenta para su proceso de extracción, recolección y tratamiento del crudo, con 7 estaciones de recolección, 2 mega estaciones de recolección y tratamiento, 1 planta deshidratadora de crudo, 1 planta de captación y tratamiento de agua, 4 plantas de inyección de agua o PIA's, líneas de transporte de agua, gas y crudo, dentro de estas últimas se cuenta con la planta de inyección de Agua, PIA 3, la cual es la más nueva del campo, inicio su arranque en Enero de 2013, cuenta con una tecnología de última generación, completamente automatizada y controlada remotamente, fue construida por el socio Occidental Andina de Colombia y es operada por ECOPETROL S.A.

2.7 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA EN LA PIA 3

La planta de inyección PIA 3, tiene una capacidad de filtración e inyección de 160.000 Barriles de agua diarios, el proceso inicia con el recibo del agua de reinyección, que proviene de la mega estación LCI 3^a, la cual es separada del crudo que se recibe de los pozos que llegan a dicha estación. El agua es recibida en dos (2) tanques de acero API, posteriormente, esta agua es bombeada a unos filtros cuyo medio filtrante es cascara de nuez, una vez el agua ha sido filtrada, es enviada de los filtros a un tanque de agua de producción (tanque de cabeza), de este tanque es bombeada a través de bombas booster, a las bombas principales de inyección, y de estas es bombeada al anillo de inyección, el cual es repartida a los diferentes pozos de inyección, del área Cira Este y Cira Sur.

En la siguiente figura se puede apreciar el esquema general de inyección de agua en la PIA 3.

Figura 7. Panorámica General Planta de Inyección No. 3.



Fuente. Sistema de Información Superintendencia de Operaciones La Cira Infantas. ECOPETROL S.A.

2.8 ORGANIGRAMA PRODUCCION ECOPETROL S.A.

El Departamento de Producción, al cual pertenece el área de Inyección de Agua, se encuentra dividido así:

Figura 8. Organización estructural Área de Inyección.



Fuente. Los Autores

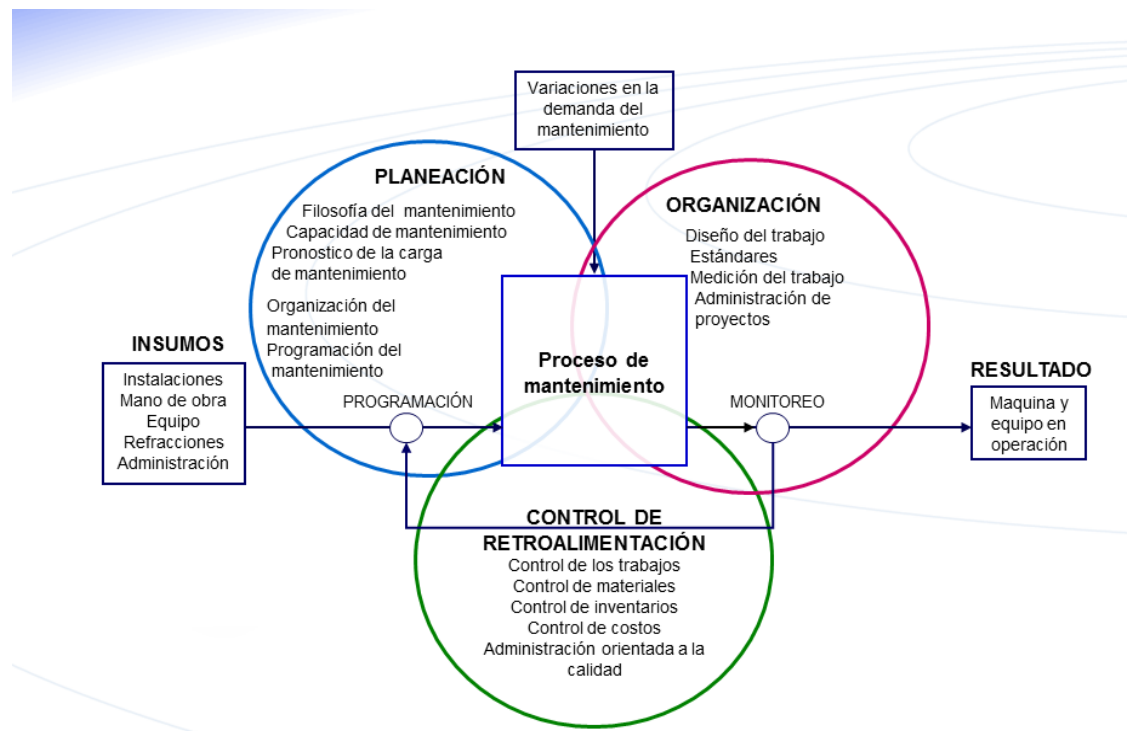
2.9 ORGANIZACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO LA CIRA INFANTAS

El objetivo del Departamento de Mantenimiento La Cira Infantás, es maximizar la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos con seguridad para las personas y responsabilidad con el medio ambiente, mediante la ejecución de actividades y programas costo efectivos para la organización.

Un sistema de mantenimiento puede verse como un modelo sencillo de entrada-salida. Las entradas de dicho modelo son mano de obra, administración, herramientas, refacciones, equipo, etc., y la salida es equipo funcionando,

confiable y bien configurado para lograr la operación planeada de las plantas.¹ Esto nos permite optimizar los recursos para aumentar al máximo las salidas de un sistema de mantenimiento. En la siguiente figura, se muestran las actividades necesarias para hacer que este sistema sea funcional, a saber, planeación, organización y control.

Figura 9. Sistema típico de mantenimiento.



Fuente. Duffuaa, Salih; Raouf, A y Campbell, John Dixon. Sistemas de mantenimiento: Planeación y control.

¹ Duffuaa, Salih; Raouf, A. y Campbell, John Dixon. Sistemas de mantenimiento: Planeación y control. p. 31-32

2.9.1 Definición del proceso de mantenimiento en La Cira Infantas. El proceso de mantenimiento se puede definir como una secuencia de actividades que determinan el QUE (alcance de la OT², tareas, secuencia), el CÓMO (normas técnicas y de seguridad asociadas con cada tarea, variables de control, uso de herramientas), con CUANTO (recursos, horas-hombre, herramienta y materiales, propios o contratados, tipo o especialidad y cantidades requeridas, duración y Presupuestación de la OT), agrupadas en procedimientos y en conjuntos de procedimientos o planes de trabajo, el QUIEN (proceso ejecutor, frente de trabajo, supervisor asignado y nombres específicos de los recursos utilizados) y el CUANDO (fechas calendario asignadas a través de una programación para el periodo y afinadas finalmente mediante una programación diaria) para optimizar el uso de los recursos con el fin de garantizar la disponibilidad de los activos de Ecopetrol mediante la ejecución de programas de mantenimiento preventivo y por condición, órdenes de trabajo, eventos de mantenimiento a equipos y emergencias cuya intervención no requiera parar la unidad productiva, aplicando las políticas de mantenimiento en concordancia con las necesidades y expectativas técnicas de seguridad, salud ocupacional, económicas, ecológicas y de calidad de Ecopetrol y su entorno.

2.9.2 Objetivos del proceso de mantenimiento

- Ejecutar con calidad programas de mantenimiento preventivo, por condición, correctivo, OT y eventos menores que garanticen la disponibilidad requerida de los equipos de ECOPETROL S.A.

² OT: Hace referencia a la Orden de Trabajo, por sus iniciales.

- Garantizar la seguridad de las personas de mantenimiento, la infraestructura operativa de ECOPETROL S.A y eliminar y/o minimizar los efectos en el ecosistema atribuibles a las actividades de mantenimiento mediante la implementación de las mejores prácticas de HSE.
- Garantizar la confiabilidad en cada uno de los equipos para cumplir con la disponibilidad requeridas por las unidades productivas.
- Suministrar información actualizada y confiable de los equipos, componentes y listado de partes.
- Definir las estrategias de mantenimiento a través del análisis de la confiabilidad, disponibilidad y la mantenibilidad de los equipos.
- Soportar la elaboración de estudios técnicos para la implementación de nuevas técnicas de mantenimiento, actualización de tecnologías de equipos y evaluación de proveedores y contratistas, con el fin de obtener mayor confiabilidad, disponibilidad y/o mantenibilidad de la infraestructura operativa.
- Optimizar los costos de mantenimiento con el fin de contribuir a la rentabilidad del negocio implementando las mejores prácticas.
- Definir, registrar y hacer seguimiento a las acciones preventivas, correctivas y mejorativas del proceso

2.9.3 Subprocesos. El proceso de mantenimiento está conformado por tres subprocesos, cuyo alcance se detalla a continuación:

2.9.4 Planeación. Inicia con la recepción de la orden de trabajo clasificada, y termina con la orden de trabajo con alcances, recursos calculados (costos, mano de obra, equipos, herramientas), procedimientos definidos y lista para programar

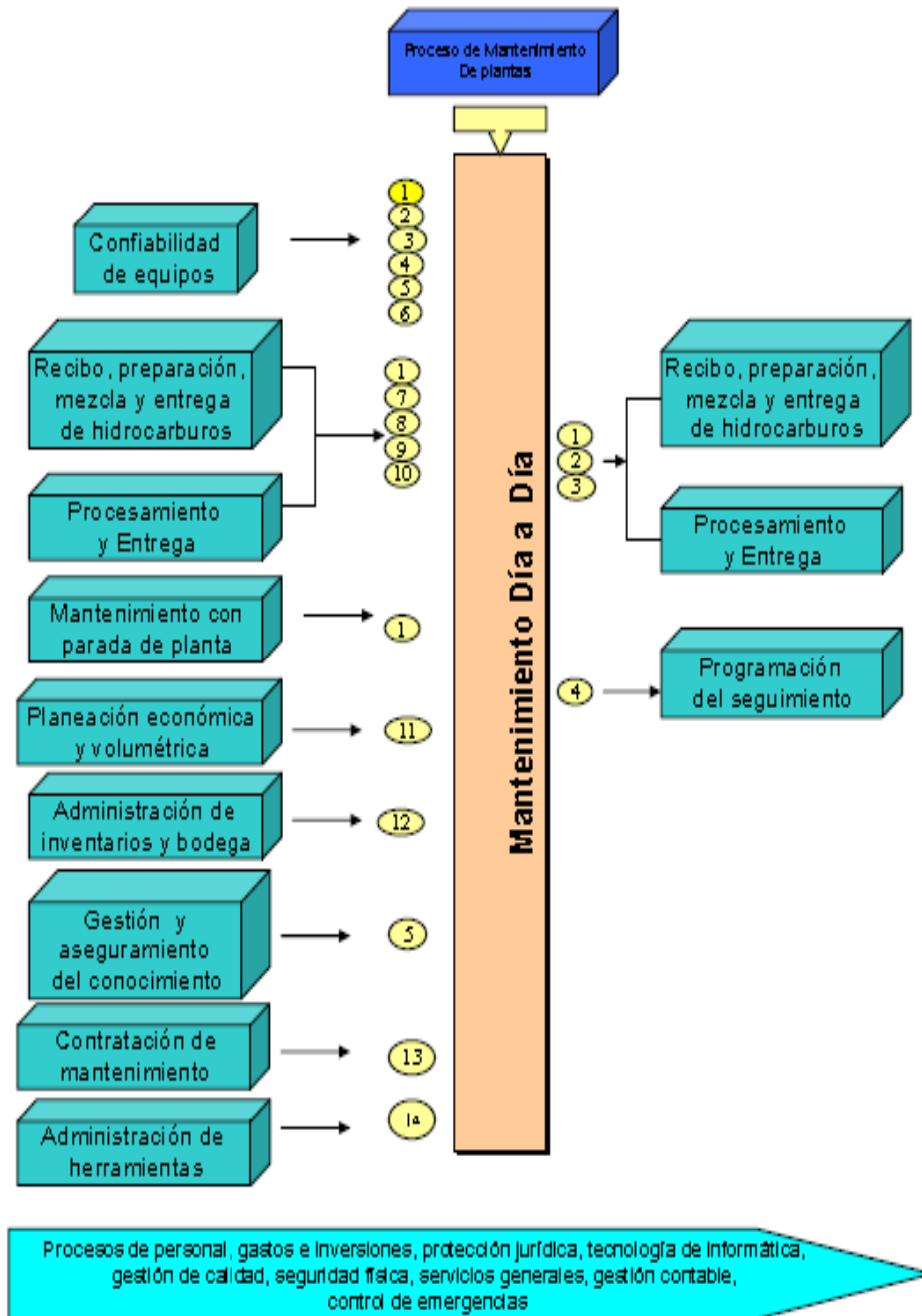
2.9.5 Programación. Inicia con las órdenes de trabajo planeadas y termina con la edición del programa semanal de las órdenes de trabajo de mantenimiento listas para ejecutar y la distribución del personal asignado a las plantas.

2.9.6 Ejecución. Comprende desde el alistamiento (preparativos, traslado de materiales, equipos y herramientas al sitio) y la emisión del permiso de trabajo, la ejecución de las órdenes de trabajo, eventos para mantenimiento de rutina, emergencias, el cierre del permiso y el registro final de toda la información concerniente a los trabajos realmente realizados.

El proceso de mantenimiento se inicia con la recepción de una orden de trabajo planeada y programada y termina con la entrega de la custodia del equipo a Operación de Plantas y la retroalimentación de la información a toda la organización a través de la herramienta informática y los documentos en papel que la organización defina (cierre de la orden de trabajo).

La siguiente figura muestra el esquema del proceso de mantenimiento, mediante un diagrama de entradas-procesos-salidas.

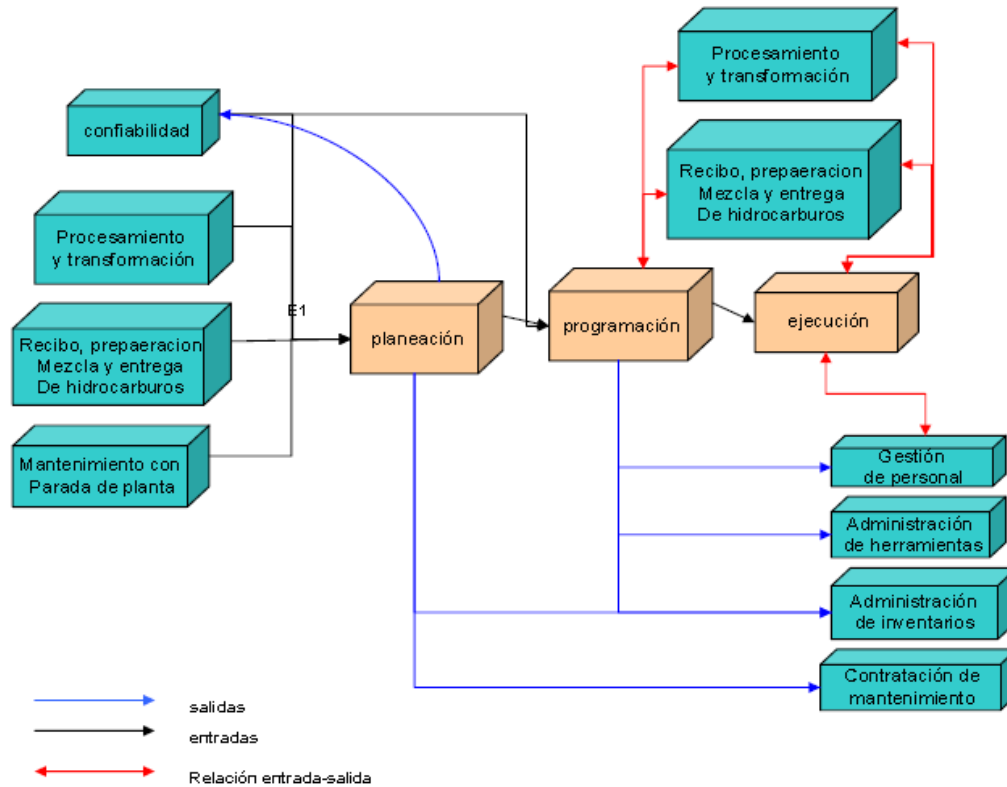
Figura 10. Proceso de mantenimiento en Ecopetrol S.A.



Fuente. Ecopetrol S.A.

La siguiente figura muestra el proceso de mantenimiento por subprocesos.

Figura 11. Proceso Mantenimiento a nivel de subprocessos.



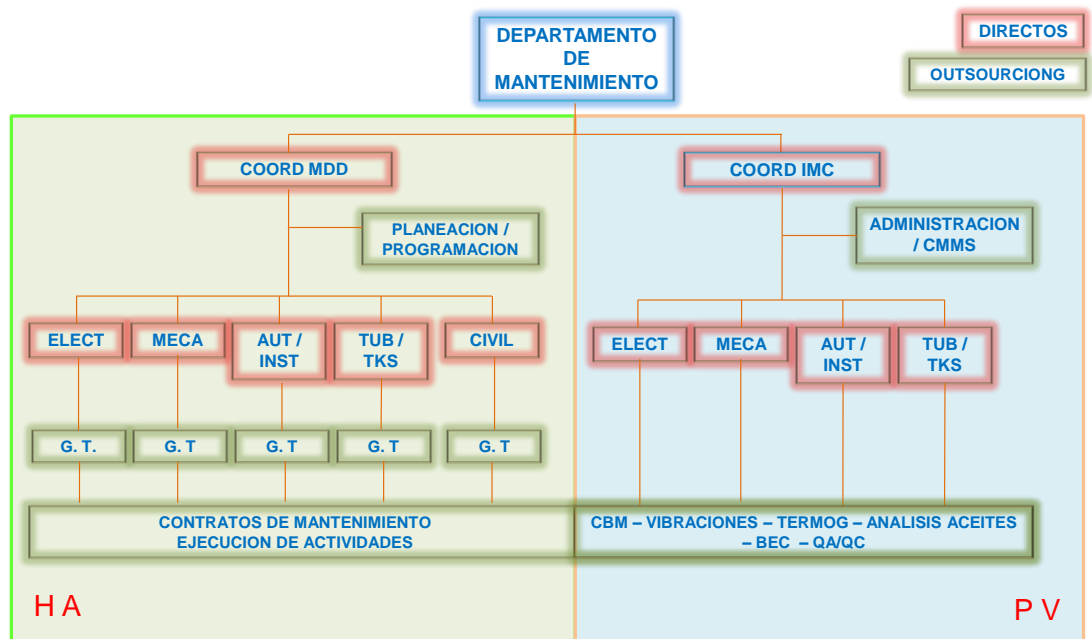
Fuente. ECOPEPETROL S.A.

2.10 ORGANIGRAMA MANTENIMIENTO EN LA CIRA INFANTAS

El Departamento de Mantenimiento La Cira Infantas, esta compuesto por dos coordinaciones, la de mantenimiento dia a dia (MDD) y la de Ingenieria de Mantenimiento y Confiabilidad (IMC). Cada coordinacion, esta compuesta a su vez, por lideres profesionales de mantenimiento de cada una de las areas a saber: un lider del area mecanica, quien es responsable por los equipos rotativos, unidades de bombeo mecanico, y equipo automotor pesado, un lider de Equipo electrico, un lider de redes electricas, un lider de equipo estatico y un lider de instrumentacion y control, para un total de 11 personas, funcionarios directos de

ECOPETROL, el personal restante, son contratadas bajo la figura de outsourcing, donde se tienen ingenieros de confiabilidad, planeadores de mantenimiento, programadores de mantenimiento, ingenieros de CBM, gestores tecnicos, entre otros.

Figura 12. Organigrama de mantenimiento en La Cira Infantas.



Fuente. ECOPETROL S.A.

2.11 MEDICIÓN DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO

La medición, seguimiento y mejora continua del proceso de mantenimiento de La Cira Infantas, se realiza a través de la medición y el cálculo de indicadores de gestión del mantenimiento, estos indicadores de gestión del departamento son elaborados por el programador de mantenimiento del departamento, y evaluados en la reunión semanal de seguimiento al mantenimiento.

Tabla 1. Indicadores de gestión y seguimiento al mantenimiento.

Indicador	Definición	Periodicidad	Seguimiento	Responsable
% Proactivo	Es el porcentaje de los tiempos de ejecución reportados en las Ordenes de trabajo de mantenimiento proactivo (mejorativo, preventivo y predictivo) versus el mantenimiento reactivo (correctivo) ejecutado en un periodo.	Mensual	Mensual	Líder funcional Ellipse
Workload	Número de semanas requeridas para ejecutar las órdenes de trabajo de mantenimiento sin gestión en el sistema Ellipse con la disponibilidad de personal con la que se cuenta en el periodo.	Mensual	Mensual	Líder funcional Ellipse
% Cumplimiento de la programación	Mide el cumplimiento de las tareas de mantenimiento programadas en un periodo de tiempo en Ellipse	Semanal	Semanal	Líder funcional Ellipse
% acierto de la planeación	Mide el nivel de asertividad en la estimación de los tiempos de planeación versus los tiempos reales de ejecución de las tareas de las órdenes de trabajo de mantenimiento.	Mensual	Mensual	Líder funcional Ellipse
% Gestión de Eventos	Mide el porcentaje de solicitudes (eventos) reportados en Ellipse relacionados a fallas o recomendaciones de mantenimiento a equipos que son tramitadas y concluidas en el sistema.	Mensual	Mensual	Líder funcional Ellipse
% documentación de Ots	Mide el número de Órdenes de trabajo de mantenimiento con texto extendido y horas hombres reportadas en ellipse de los trabajos ejecutados en el periodo.	Mensual	Mensual	Líder funcional Ellipse
% Diferida de crudo	Mide las de pérdidas de barriles de crudo por mantenimientos en equipos basados en los pronósticos de producción del campo.	Diaria	Semanal	Líder Confiabilidad
% Diferida de inyección por líneas rotas	Mide las pérdidas de barriles de agua de inyección por mantenimientos en líneas o tuberías de inyección del Campo basados en los pronósticos de inyección.	Diaria	Semanal	Líder Confiabilidad
% Diferida de Inyección por disponibilidad de equipos	Mide las pérdidas de barriles de agua de inyección por equipos que participan en este proceso y que no se encuentran disponibles a causa de mantenimiento.	Diaria	Semanal	Líder Confiabilidad
% Diferida de Inyección por fallas eléctricas	Mide las pérdidas de barriles de agua de inyección a causa de fallas eléctricas en el Campo.	Diaria	Semanal	Líder Confiabilidad

Fuente. Departamento de Mantenimiento La Cira Infantas. Ecopetrol S.A.

Otros indicadores, relacionados con costos de mantenimiento, de los cuales, también se lleva seguimiento, son:

- Tiempo Medio Entre Fallas
- Tiempo Medio Para Reparación
- Disponibilidad del Equipo
- Costo de Mantenimiento por Facturación
- Costo de Mantenimiento por el Valor de Reposición
- Costo de Mantenimiento con relación a la Producción
- Costo de Capacitación
- Tasa de Frecuencia de Accidentes
- Tasa de Gravedad de Accidentes

3. MARCO TEORICO

TEORÍA Y GENERALIDADES DE LA METODOLOGÍA RCM “MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD”

Definiciones³

El papel de mantenimiento es el de incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción al realizar actividades tales como planeación, organización, control y ejecución de métodos de conservación de los equipos. Sus funciones van más allá de las reparaciones; su valor se aprecia en la medida en que éstas disminuyan como resultado de un trabajo planificado y sistemático con apoyo y recursos de una política integral de los directivos.

La prolongación o la recuperación de las funciones de la maquinaria está directamente relacionada con el mantenimiento; sus objetivos son prevenir eventos indeseables y evitarlos, recobrar para el servicio los mecanismos que han fallado y, en general, asegurar la disponibilidad apropiada para la producción.

La labor que cumple mantenimiento, es la de procurar el buen estado de los equipos para la adecuada función de producir bienes en las organizaciones, mediante la sistematización de la información, como el medio eficaz para el buen desempeño de la organización.

Los doce principios más importantes en la gestión de mantenimiento son:

³ MORA GUTIERREZ, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. 2012.

Tabla 2. Factores importantes en la gestión del mantenimiento.

Temas Técnicos	Recursos Humanos	Campo Económico
<ul style="list-style-type: none"> •Servicios •Productos •Calidad de los productos •Métodos de trabajos de mantenimiento •Manejo de materiales óptimo •Control de todas las actividades de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> •Función de relaciones internas del personal •Función de relaciones externas •Función de la organización del mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> •Estructura de mantenimiento •Economía en la gerencia de mantenimiento •Economía frente a la producción

Fuente. Mantenimiento Industrial Efectivo. Luis Alberto Mora Gutierrez.

La función mantenimiento se ha convertido hoy en día, en una de las principales fuentes de ingreso y beneficios en plantas y centros industriales de empresas y compañías tanto en Colombia como en el resto del mundo. Es por ello que el concepto de mantenimiento a lo largo del tiempo, desde sus inicios, ha venido cambiando, lo que anteriormente se conocía como un “mal necesario”, hoy por hoy se ha convertido en uno de los puntos más rentables en las empresas, ya que entre otras cosas, permite cumplir las metas de producción, aumenta la vida útil de los equipos, optimiza recursos, como repuestos y mano de obra.

El mantenimiento está reaccionando ante nuevas expectativas. Estas incluyen una mayor importancia a los aspectos de seguridad y del medio ambiente, un conocimiento creciente de la conexión existente entre el mantenimiento y la calidad del producto, y un aumento de la presión ejercida para conseguir una alta disponibilidad de la maquinaria al mismo tiempo que se optimizan. Frente a esta avalancha de cambios, el personal que dirige el mantenimiento está buscando un nuevo camino. Quiere evitar equivocarse cuando se toma alguna acción de mejora. Trata de encontrar un marco de trabajo estratégico que sintetice los nuevos avances en un modelo coherente, de forma que puedan evaluarlos

racionalmente y aplicar aquellos que sean de mayor valía para ellos y sus compañías.

Al final de 1950, la aviación comercial mundial estaba sufriendo más de 60 accidentes por millón de despegues. Si actualmente se estuviera presentando la misma tasa de accidentes, se estaría oyendo sobre dos accidentes aéreos diariamente en algún sitio del mundo (involucrando aviones de 100 pasajeros o más). Dos tercios de los accidentes ocurridos al final de los 1950s eran causados por fallas en los equipos.

El hecho de que una tasa tan alta de accidentes fuera causada por fallas en los equipos implicaba que, al menos inicialmente, el principal enfoque tenía que hacerse en la seguridad de los equipos.

De esta manera RCM tiene sus inicios a principios de 1960. El trabajo del desarrollo inicial fue hecho por la Industria de la Aviación Civil Norteamericana. Y se hizo realidad cuando las aerolíneas comprendieron que muchas de sus filosofías de mantenimiento eran no sólo costosas sino también altamente peligrosas. Ello inspiró a la industria a aunar una serie de “Grupos de Dirección de Mantenimiento” (Maintenance Steering Groups - MSG) para reexaminar todo lo que ellos estaban haciendo para mantener sus aeronaves operando. Estos grupos estaban formados por representantes de los fabricantes de aeronaves, las aerolíneas y la FAA (Fuerza Área Americana).

El RCM nace con la finalidad de ayudar a las personas a determinar políticas para mejorar las funciones de los activos físicos y manejar las consecuencias de sus fallas. De estos procesos, el RCM es el más efectivo.

Una buena revisión de las estrategias de mantenimiento debe partir de cero e incluir la revisión de los requerimientos de mantenimiento de cada una de las partes o componentes de los equipos en funcionamiento. Esto, debido a que los requerimientos de mantenimiento han cambiado dramáticamente en los últimos

tiempos y la evaluación de políticas así como la selección de las tareas de mantenimiento que se deben llevar a cabo, son aspectos que realizan constantemente la mayoría de los ingenieros, pero nuevas técnicas y nuevas opciones aparecen a un ritmo tan acelerado, que estas evaluaciones y selecciones no se pueden llevar a cabo de forma aleatoria e informal.

La aplicación de RCM resuelve el problema anterior con una estructura estratégica que le permite llevar a cabo la evaluación y selección de procesos que se pueden implementar en forma rápida y segura. Esta técnica es única en su género y conduce a obtener resultados extraordinarios en cuanto a mejoras y rendimiento del equipo de mantenimiento donde quiera que sea aplicado.

El RCM pone tanto énfasis en las consecuencias de las fallas como en las características técnicas de las mismas y lo hace de esta manera:

- Integra una revisión de las fallas operacionales con la evaluación de aspectos de seguridad y amenazas al medio ambiente, esto hace que la seguridad y el medio ambiente sean tenidos en cuenta a la hora de tomar decisiones en materia de mantenimiento.
- Mantiene la atención en las actividades de mantenimiento que más incidencia tienen en el desempeño o funcionamiento de las instalaciones. Esto garantiza que cada peso gastado en mantenimiento se gasta donde más beneficio va a generar.

El RCM reconoce que todo tipo de mantenimiento es válido y da pautas para decidir cuál es el más adecuado en cada situación. Al hacer esto, ayuda a asegurarse de que el tipo de mantenimiento escogido para cada equipo sea el más adecuado y evita los dolores de cabeza y problemas que siguen a la adopción de una política general de mantenimiento para toda una empresa. Si RCM se aplica a un sistema de mantenimiento existente, reduce la cantidad de mantenimiento rutinario que se ha hecho generalmente a un 40% a 70%. De otro

lado, si RCM se aplica para desarrollar un nuevo sistema de mantenimiento, el resultado será que la carga de trabajo programada sea mucho menor que si el sistema se hubiera desarrollado por métodos convencionales.

Otra de las fortalezas del RCM es que su lenguaje técnico es sencillo y fácil de entender a todos los que tengan que ver con él, esto le permite al personal involucrado saber qué pueden y qué no pueden esperar de ésta aplicación y qué se debe hacer para conseguirlo. Además, le da confianza al trabajador y mejora su efectividad y su moral.

Una revisión RCM de los requerimientos de mantenimiento para cada uno de los equipos existentes y que opera en las instalaciones, permite tener una base firme para establecer políticas de trabajo, y decidir qué repuestos se deben tener en el inventario.

El RCM ha sido aplicado en una cantidad de empresas alrededor del mundo y con gran éxito. No obstante, es reciente en la industria, lo que quiere decir que las compañías que lo están aplicando tienen una ventaja comparativa, debido a que el mantenimiento afecta la competitividad. A pesar de ser nuevo en la industria en general, el RCM ha venido siendo aplicado hace aproximadamente 30 años en la que es probablemente el área más exigente del mantenimiento, la aviación civil. Se deduce que ha sido puesto a prueba y refinado en éste campo, más que ninguna otra técnica existente.

ECOPETROL S.A, adopto a partir del año 2000, la metodología RCM, para aplicarla en sus plantas, es así como inicio la aplicación de esta metodología en las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena, y posteriormente fue extendiendo su aplicación a los otros negocios, la Vicepresidencia de Producción y la Vicepresidencia de transporte. Es así como ECOPETROL S.A, desarrolló sus procedimientos e instructivos corporativos para el desarrollo de la metodología en sus activos, y a través de todos estos años, se ha venido aplicando, de hecho se

han desarrollado varios trabajos de grado a nivel de especialización, relacionados con la aplicación de esta metodología, en diferentes plantas, estaciones y facilidades ubicadas en diferentes áreas geográficas y que manejan diversos procesos.

Se formula una propuesta del plan de mantenimiento requerido para la nueva Planta de Inyección de Agua, PIA 3, basados en la metodología RCM, definiendo cada fase del desarrollo de la metodología.

3.1 Mantenimiento y RCM⁴. Desde el punto de vista de la ingeniería, existen dos elementos para el manejo de cualquier bien físico. Este debe ser mantenido y cada tanto ser modificado. Mantenimiento y Mantenimiento Centrado en la garantía de funcionamiento se definen de la siguiente manera:

Mantenimiento: Asegurar que los bienes físicos continúen cumpliendo las funciones que sus usuarios esperan. Mantenimiento Centrado en la garantía de funcionamiento: un proceso usado para determinar que debe hacerse para asegurar que todo bien físico continúe funcionando como sus usuarios lo desean en el presente contexto operativo.

3.2 RCM. Las siete preguntas básicas⁵. El proceso de RCM incita a responder las siguientes siete preguntas sobre el bien o sistema bajo revisión:

- ¿Cuáles son las funciones y respectivos estándares de desempeño de este bien en su contexto operativo presente?
- ¿En qué aspecto no responde al cumplimiento de sus funciones?

⁴ MOUBRAY, John. RCM II Reliability - Centred Maintenance [Mantenimiento Centrado en Confiabilidad]. 4 Ed. Estados Unidos: Aladon LLC, 2000. 433 p. ISBN 09539603-2-3

⁵ *Ibíd.*, p. 22-330

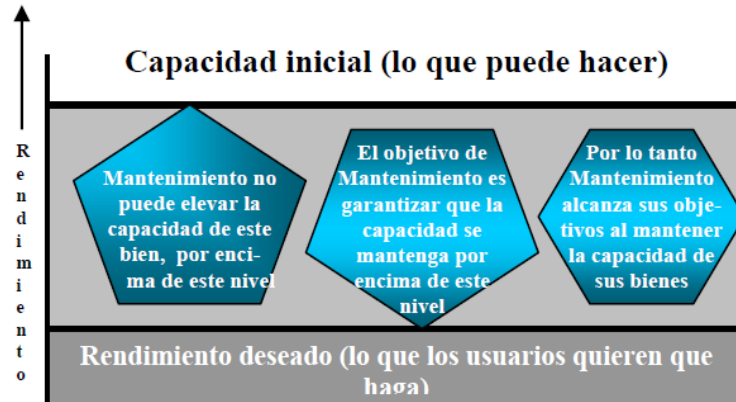
- ¿Que ocasiona cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando se produce cada falla en particular?
- ¿De qué modo afecta cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra el plan de acción apropiado?

3.2.1 Funciones y niveles de desempeño. El primer paso del RCM es definir las funciones de cada bien en su contexto operativo y los estándares de desempeño deseados. Las funciones se dividen en dos categorías:

- Funciones primarias: que sintetizan por qué el bien fue adquirido en primer lugar. Esta categoría de funciones cubren temas tales como velocidad, rendimiento, capacidad de transportación o almacenamiento, calidad del producto y servicio al cliente.
- Funciones secundarias, que indican que se espera que todo bien produzca más que simplemente su función primaria. Los usuarios también tienen expectativas en áreas como ser seguridad, control, contención, confort, integridad estructural, economía, protección, eficiencia de operación, cumplimiento con las normas medioambientales, y hasta la estética o apariencia del bien.

La mayoría de los bienes son diseñados y fabricados adecuadamente, de modo que es posible desarrollar programas de mantenimiento que aseguren que estos bienes continúen cumpliendo con las funciones requeridas.

Figura 13. Un bien conservable



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 25.

Tales bienes son conservables como se muestra en la figura 13. Por otro lado, si el desempeño deseado excede la capacidad inicial, no habrá mantenimiento capaz de lograr que se cumplan las expectativas. Es decir, esos bienes son no conservables como lo muestra la figura 14.

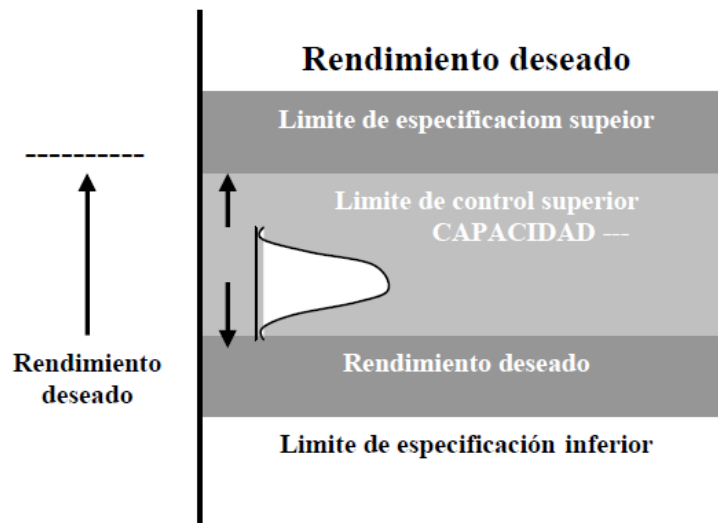
Figura 14. Una situación fuera del alcance de mantenimiento.



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 25.

Para que cualquier bien sea susceptible de mantenimiento, el funcionamiento deseado, debe estar cubierto por su capacidad inicial y para determinar esto, no solo se debe conocer la capacidad inicial del bien, sino que se necesita conocer cuál es el nivel de desempeño mínimo que el usuario puede aceptar en el contexto en el que se esté utilizando el equipo. Algunos sistemas presentan capacidad variable. Estos son sistemas que no pueden ser programados para funcionar a exactamente el mismo nivel cada vez que operan. La figura 15 indica que las variaciones de capacidad de esta naturaleza, generalmente varían en un medio. Para acomodar esta variabilidad, los niveles de desempeño deseados incorporan un límite superior y un límite inferior.

Figura 15. Límites superior e inferior.



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 28.

Las funciones deben estar alistadas en las planillas de trabajo de RCM en la columna de la izquierda, las funciones primarias están enunciadas primero, y están ordenadas numéricamente, como se muestra en la figura 16. .

Figura 16 Planilla Informativa de RCM.

PLANILLA INFORMATIVA RCM II

SISTEMA Turbina de Gas 5 MW		Sistema N° 216-05	Facilitador: N. Smith	Fecha: 7-07-1996	Hoja N° 1
SUBSISTEMA Sistema de Escape		Subsistema N° 216-05-011	Auditor: P Jones	Fecha 07-08-1996	De 3
FUNCION		FALLA FUNCIONAL (Perdida de Funcion)	MODOS DE FALLA (Causa de la Falla)		EFECTO DE LA FALLA (Que sucede cuando falla)
1	Canalizar todo el as de la turbina de calefacción sin restricción a un punto fijo de 10 m. por encima del techo del hall de la turbina.		1	Monturas silenciadoras corroidas	Montaje del silenciador colapsa y cae al fundo de la torre. La presión trasera causa que la turbina surja violentamente y se apague a altas temperaturas de gas de escape. El tiempo de inactividad para reemplazar el silenciador. Dependiendo de la naturaleza del bloqueo, la temperatura de escape puede aumentar hasta apagar la turbina. El despojos podría afectar partes de la turbina. El tiempo de inactividad para reparar el silenciador es de 4 semanas.
			1	Parte del silenciador falla por fatiga.	

Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 47.

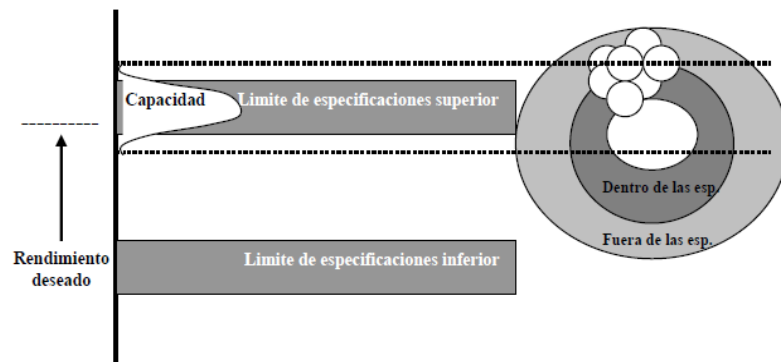
3.2.2 Fallas funcionales. El proceso de RCM identifica qué circunstancias llevaron a un estado fallido y luego investiga qué situaciones son las causantes de que un bien caiga en ese estado de falla. En el mundo de RCM, los estados de falla son conocidos como fallas funcionales, porque ocurren cuando un bien es *incapaz de cumplir una función a un nivel de desempeño que sea aceptable por el usuario*. En adición a la incapacidad total para funcionar, esta definición abarca fallas parciales, donde el bien todavía funciona, pero a nivel inaceptable de desempeño, (incluyendo también los casos donde no se alcanza el nivel de precisión o calidad). Pero éstas solo pueden ser identificadas una vez que las funciones y desempeño estándares hayan sido definidas con claridad.

3.2.2.1 Falla parcial y total. Situaciones en la que el bien continúa funcionando, pero se desempeña fuera de los límites deseados. Todas las fallas funcionales que pudieran afectar cada función deberían ser registradas.

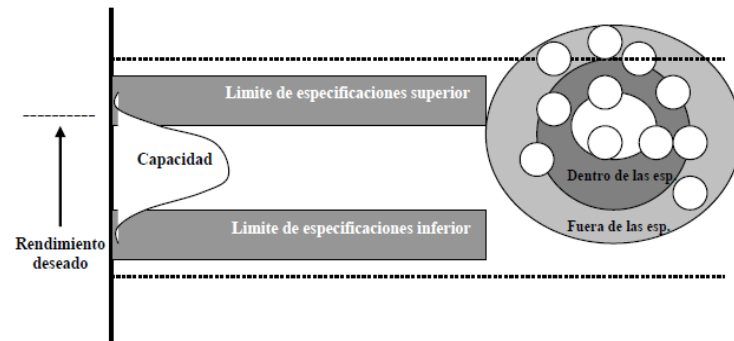
3.2.2.2 Límites superior e inferior. Tales límites implican que el bien falla si genera productos que están por arriba del límite superior o por debajo del límite inferior. Los estados de falla asociados a los límites superior e inferior pueden manifestarse de dos maneras. Primero, la capacidad podría violar los límites de especificaciones en una sola dirección. El segundo estado de falla ocurre cuando la capacidad se extiende a tal extremo que viola ambos límites el superior, y el inferior.

Figura 17. Estados de falla.

a) La capacidad viola solamente el límite superior.



b) La capacidad viola los límites superior e inferior.



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 52.

3.2.2.3 Marcadores e indicadores. Los límites superior e inferior también se aplican a normas de desempeño asociadas con marcadores, indicadores, y sistemas de control y protección. Dependiendo de los tipos de fallas y sus consecuencias, también puede llegar a ser necesario enlistar la brecha de estos límites en forma separada cuando enunciamos las fallas funcionales

3.2.2.4 El contexto operativo. Del mismo modo que no se debe generalizar las funciones de bienes idénticos, se tiene que ser cuidadosos de no generalizar las fallas funcionales

3.2.3 Modos de fallas. Este paso consiste en identificar *todas las posibles causas de este estado de error*. Estos eventos se conocen como modos de fallas. Los modos de falla “razonablemente similares” incluyen aquellas fallas que ocurrieron en el mismo equipo o en similares, operando en el mismo contexto, fallas que actualmente están siendo prevenidas por regímenes de mantenimiento ya existentes, y aquellas fallas que no ocurrieron aun, pero que se consideran como posibilidades muy reales en el contexto en cuestión.

La mejor manera de mostrar la conexión y distinción entre estados de fallas y los eventos que pueden causarlos, es alistar primero las fallas funcionales, luego registrar los modos de fallas que pueden causar cada falla funcional, como se muestra en la figura 18.

Figura 18. Modos de falla de una bomba.

PLANILLA INFORMATIVA RCM II

SISTEMA		<u>SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA</u>	
SUBSISTEMA			
	FUNCION	Falla Funcional	MODOS DE FALLA
<u>1</u>	<u>Transferir Agua del Tanque X Al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto.</u>	<u>A</u> Incapaz de transferir Agua	1 Rodamiento falla 2 El propulsor se suelta 3 Propulsor atascado por un objeto extraño 4 Campana de enganche falla por fatiga. 5 Se quema el motor 6 Válvula de entrada tapada
		<u>B</u> Transfiere menos de 800 litro Por minuto.	

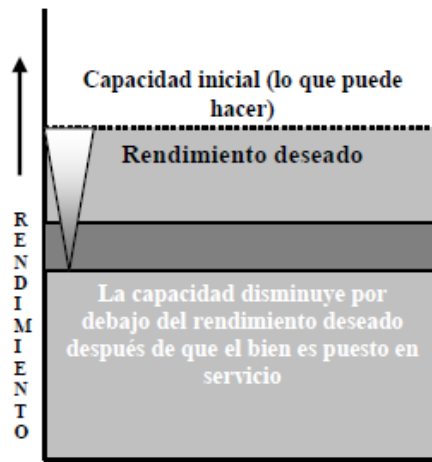
Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 57.

Una vez que cada modo de falla fue identificado, se hace posible considerar que sucede cuando se presenta, para así evaluar sus consecuencias y decidir (de ser posible) que se debe hacer para anticiparlo, prevenirlo, detectarlo o corregirlo- o hasta para rediseñarlo.

3.2.3.1 Categorías de modos de fallas. Los modos de falla pueden ser clasificados en uno de tres grupos:

a. Capacidad en descenso. Cuando la capacidad cae por debajo del desempeño deseado. Por deterioro, fallas de lubricación, suciedad, desmontaje, errores humanos.

Figura 19. Categoría I de modos de fallas



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 61.

b. Aumento en el Desempeño Deseado (o Aumento en el Esfuerzo Aplicado).

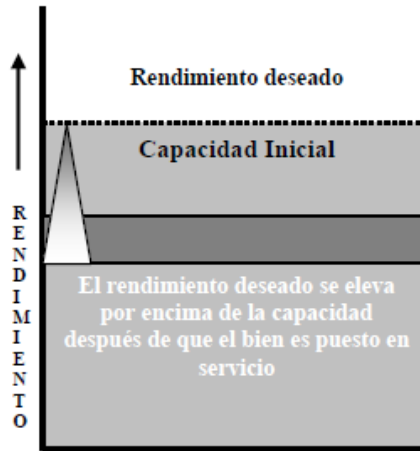
Cuando el desempeño deseado supera la capacidad inicial. Cuando el desempeño deseado es cubierto por la capacidad inicial del bien, pero posteriormente las expectativas crecen de tal manera que superan esa capacidad inicial. Esto provoca que el bien falle ya sea:

- El desempeño deseado aumenta hasta que el bien no puede cumplirlo,
- El incremento de esfuerzo causa deterioro, hasta el punto en que el bien pasa a ser tan poco confiable que se vuelve inútil.

Ocurre por dos razones, las primeras tres implican algún tipo de error humano.

- Sobrecarga sostenida deliberada
- Sobrecarga sostenida inintencionada
- Sobrecarga repentina inintencional.
- Material de proceso incorrecto.

Figura 20. Categoría II de modos de fallas



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 64.

c. Sobrecarga sostenida deliberada. Cuando el bien no es capaz de cumplir la función esperada desde un comienzo. En muchas industrias, los usuarios ceden rápidamente a la tentación de dar más velocidad a los equipos en respuesta a una creciente demanda de los productos. En otros casos, hay personas que utilizan equipos adquiridos con un fin, para procesar productos de distintas características (como ser más unidades de mayor tamaño y peso, o de estándares de calidad también mayores).

Los modos de falla deben ser definidos en suficientes detalles para que sea posible seleccionar una política de manejo de fallas apropiada.

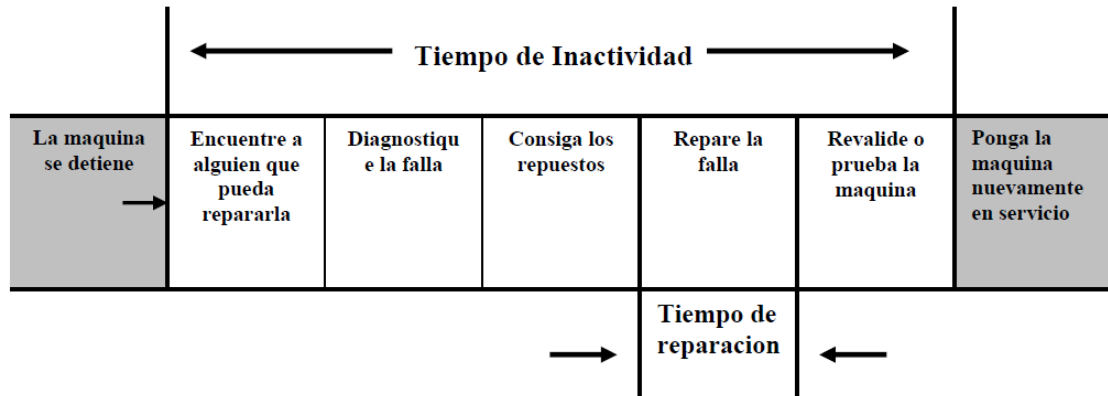
3.2.3.2 Efectos de las fallas. El cuarto paso en el proceso de RCM implica enlistar los efectos de las fallas, que describen lo que sucede cuando se presenta cada modo de falla. Esta descripción debe incluir toda la información necesaria para respaldar la evaluación de las consecuencias de las fallas, como ser,

- **Evidencias**, (si las hubiera), de que la falla ocurrió. Los efectos de las falla deben ser descriptos de tal manera que permita al equipo haciendo el análisis de RCM decidir si la falla será evidente para los operadores bajo circunstancias normales. Del mismo modo, la descripción debería establecer si la falla es acompañada o precedida por efectos físicos obvios como ser ruidos fuertes, fuego, humo, vapores, olores inusuales, o charcos de líquido en el suelo.

- **Riesgos medioambientales y de Seguridad.** Los efectos de la falla deberían describir cómo puede suceder esto. Por ejemplo:
 - Alto riesgo de incendio o explosiones.
 - El escape de químicos perjudiciales (gases, líquidos, sólidos.)
 - Electrocutación
 - Objetos que caen
 - Golpes de presión (especialmente en vasos de presión y sistemas hidráulicos.)
 - Exposición a materiales muy calientes o fundidos.
 - La desintegración de componentes rotativos de gran tamaño
 - Accidentes o descarrilamientos de vehículos.
 - Exposición a extremos filosos, o maquinarias en movimiento.
 - Niveles de ruido crecientes.
 - Colapso de estructuras
 - El aumento de bacterias.
 - El ingreso de suciedad en alimentos o productos farmacéuticos.

- **Daños secundarios, y efectos de producción.** Se debe indicar como se ve afectada la producción (si es así) y por cuanto tiempo. Esto se calcula generalmente por la cantidad de tiempo de inactividad asociado a cada falla.

Figura 21. Tiempo de inactividad versus tiempo de reparación.



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 79.

- **Acción Correctiva.** Que debe hacerse para reparar la falla. Los efectos de las fallas deberían también establecer que debe hacerse para repararla. Esto puede ser incluido en los enunciados sobre tiempo de inactividad, y mostrados en cursivas.

3.2.3.3 Consecuencias de las fallas. Las fallas pueden afectar la operatividad. También pueden afectar la calidad del producto, servicio al cliente, seguridad del medioambiente. Todas significaran el gasto de tiempo y dinero para repararlas.

El proceso de RCM clasifica estas consecuencias en los siguientes cuatro grupos:

- **Consecuencias de fallas ocultas:** Exponen a la empresa a fallas múltiples, con consecuencias serias y frecuentemente catastróficas.
- **Consecuencias medioambientales y de seguridad:** Una falla trae consecuencias de seguridad si potencialmente puede dañar o causar la muerte. Tiene consecuencias medioambientales si provoca la violación de

cualquier norma medioambiental corporativa, regional, nacional o internacional.

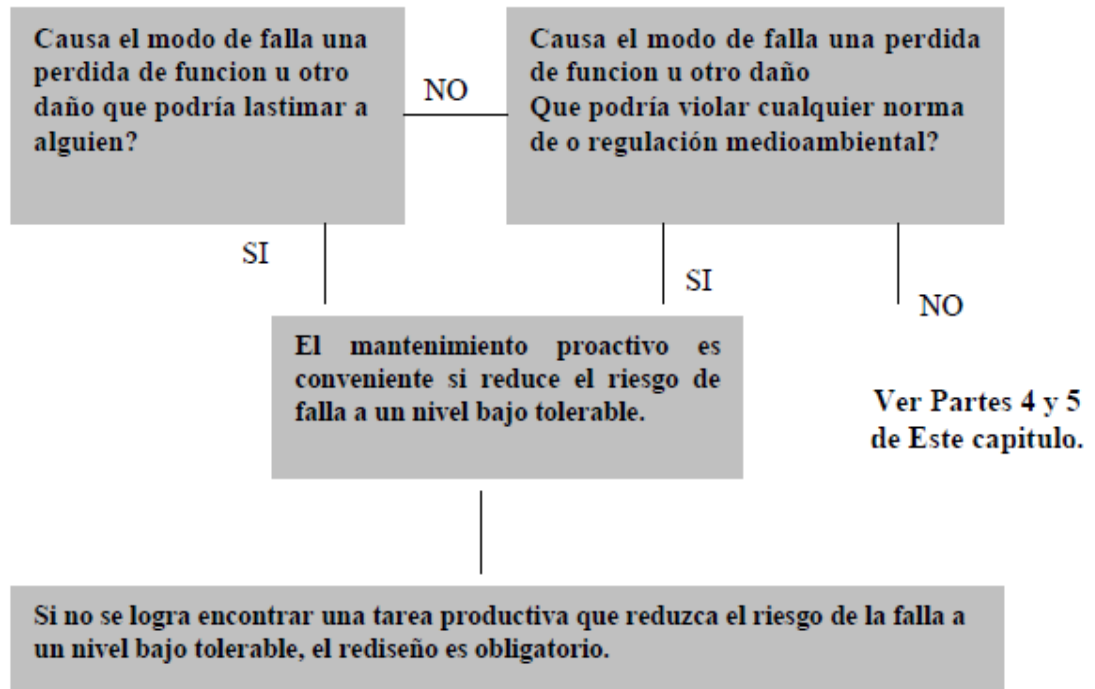
- **Consecuencias operativas:** Cuando afecta la producción (rendimiento, calidad del producto, servicio al cliente o costos operativos, además del costo directo de reparación.)
- **Consecuencias no operativas:** Solo implican el costo de reparación.

Los procesos de RCM usan estas categorías como la base de un marco estratégico para la toma de decisiones de mantenimiento.

La evaluación de riesgo consiste en tres elementos. El primero pregunta que podría suceder si se presenta el hecho bajo consideración. La segunda que tan probable es que esto hecho suceda. La combinación de estos dos elementos provee una medida del grado de riesgo. La tercera- y generalmente el elemento más disputable- pregunta si el riesgo es tolerable.

Si una falla pudiera afectar la seguridad del medioambiente, el proceso de RCM estipula que se debe tratar de prevenirla. Esta discusión sugiere que: Para modos de falla que tienen consecuencias de seguridad o medioambientales, solo es válido llevar a cabo una tarea proactiva si reduce la tolerabilidad de la falla a un nivel tolerable.

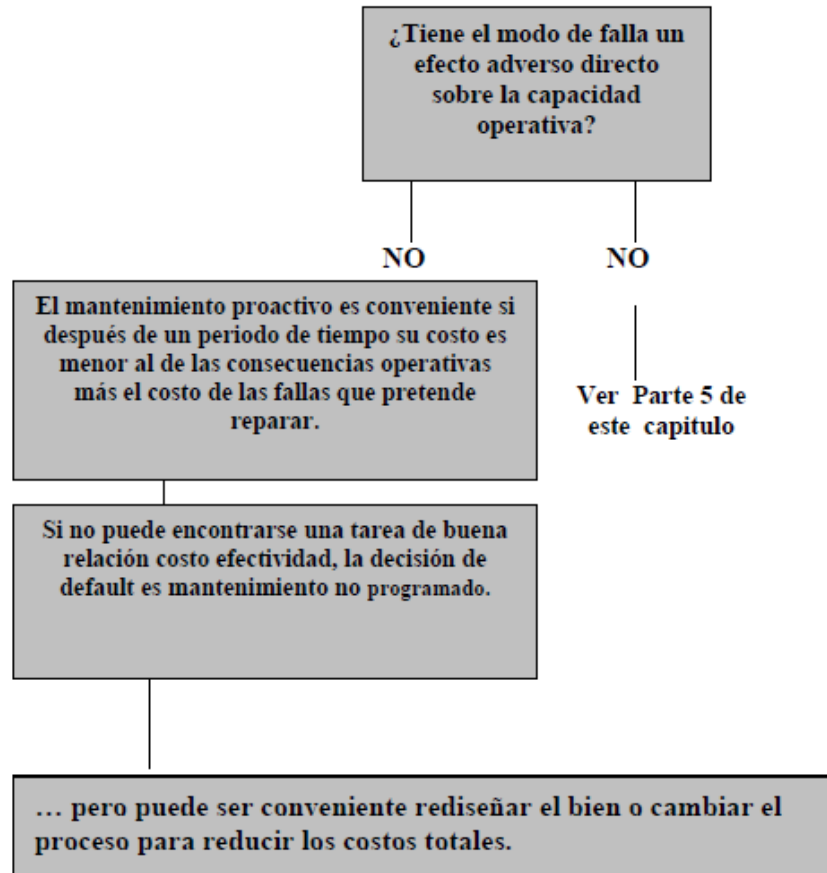
Figura 22. Identificación y desarrollo de una estrategia de mantenimiento para una falla que afecta la seguridad o el medioambiente.



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 106.

El proceso de decisión para fallas con consecuencias operativas, se puede resumir como mostramos en la figura 23.

Figura 23. Identificación y desarrollo de una estrategia de mantenimiento para una falla que posee consecuencias operativas.



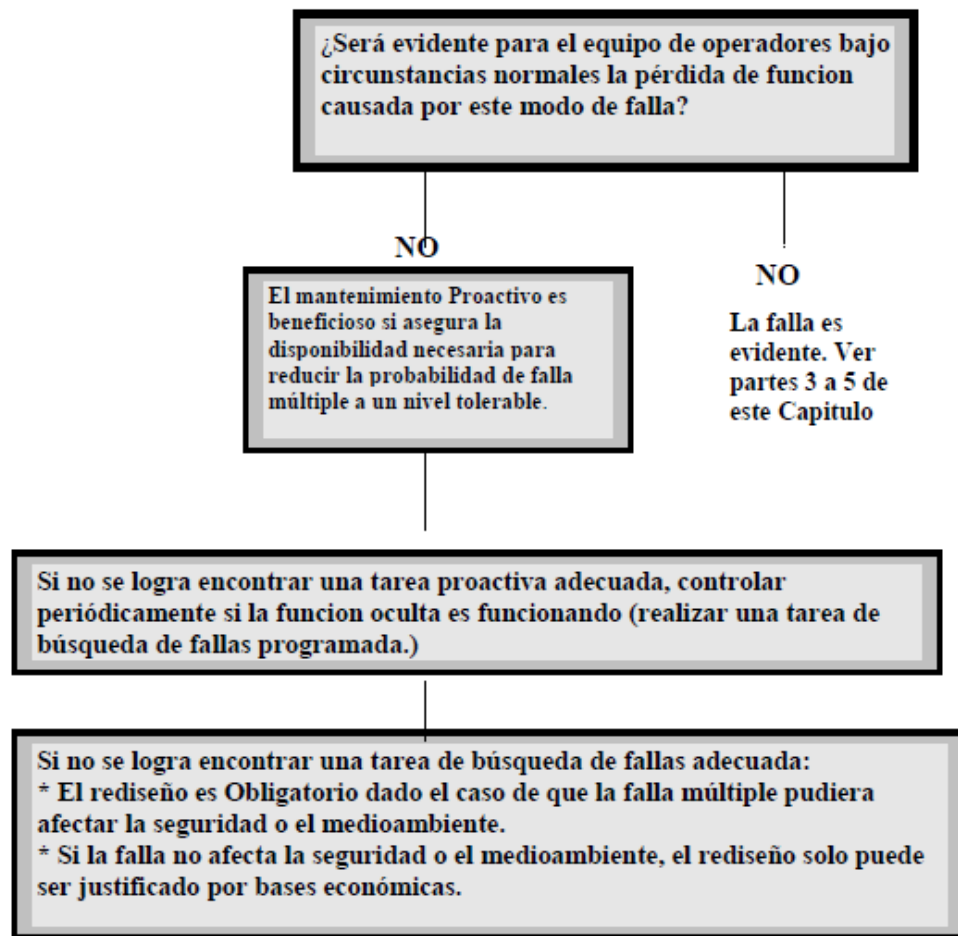
Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 111.

Este análisis se realiza a cada modo de falla individual, y no al equipo como un todo. Esto es porque cada tarea proactiva es diseñada para prevenir un modo de falla específico. De modo que la viabilidad económica de cada tarea solo puede ser comparada a los costos de los modos de falla que pretende prevenir. En cada caso es una simple decisión de hacerlo o no.

Para los modos de falla con consecuencias no operativas, es conveniente realizar una tarea proactiva si, en un periodo de tiempo el costo de esta es menor, que el

de reparar las alas que pretende prevenir. Si una tarea proactiva no es conveniente, entonces las modificaciones serán raramente justificadas, por las mismas razones que las relacionadas a fallas con consecuencias operativas.

Figura 24. Identificar y desarrollar estrategias de mantenimiento para fallas ocultas.

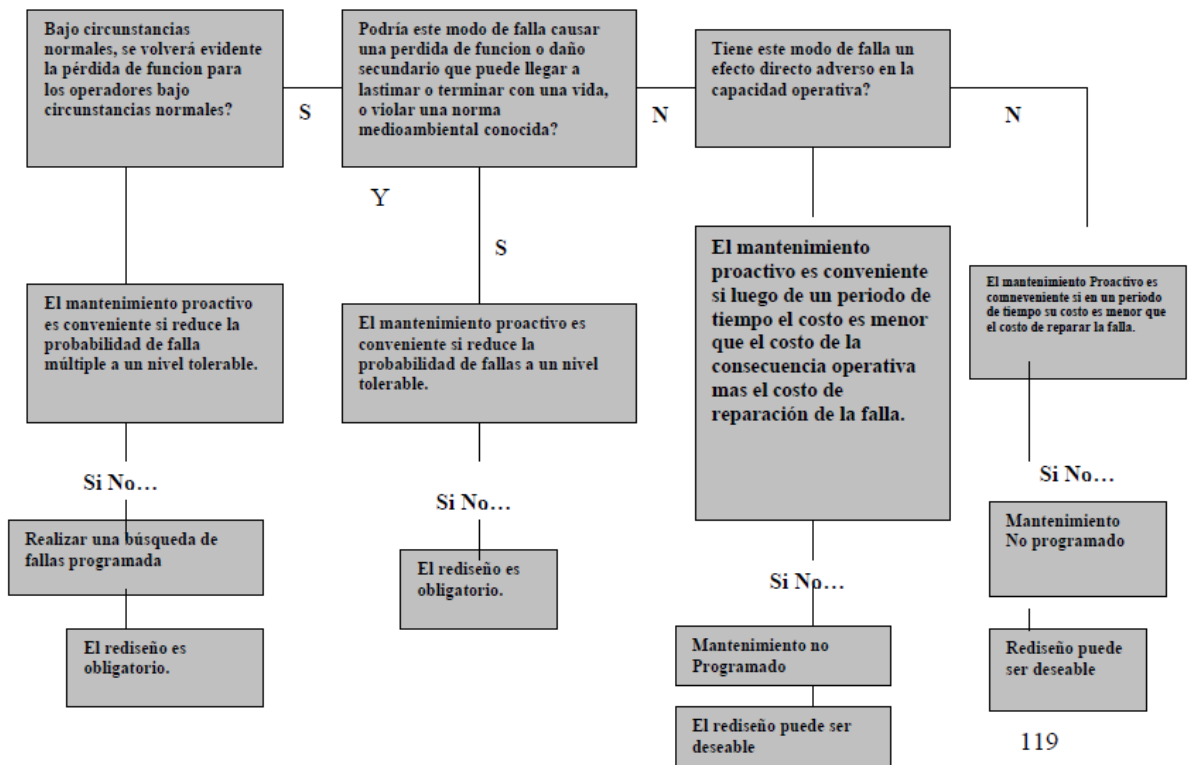


Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 127.

El proceso de RCM provee un marco estratégico comprensivo para el manejo de fallas, como se resume en la figura 24, este marco:

- Clasifica todas las fallas en base a sus consecuencias. Separa fallas ocultas de fallas evidentes, y luego ordena las consecuencias de las fallas evidentes en orden descendente de importancia.
- Provee la base para decidir si el mantenimiento proactivo es conveniente en cada caso.
- Sugiere que debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva apropiada.

Figura 25. Evaluación de las consecuencias de la falla.



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 131.

3.2.3.4 Técnicas de manejo de fallas. Las técnicas del manejo de fallas se dividen en dos categorías:

- **Tareas Proactivas:** son los trabajos realizados antes de que la falla ocurra, para prevenir que el equipo llegue a un estado de falla. Esto abarca lo que se conoce tradicionalmente como mantenimiento “predictivo” o “preventivo”. El RCM utiliza los términos restauración programada, descarte programado o mantenimiento en condición.
- **Acciones de omisión:** estas se encargan del estado de falla, y son utilizadas cuando no es posible identificar una consigna proactiva efectiva. Las acciones de omisión incluyen búsqueda de la falla, rediseño, y acudir a la falla.

3.2.3.5 Proceso de selección de tareas de RCM. Una de las grandes fortalezas de RCM es el modo en que ofrece un criterio simple, preciso y fácilmente entendible, para decidir cuál de las tareas proactivas (si las hubiere) es la realizable en cualquier contexto, y de ser así para decidir qué tan seguido deben realizarse y quien debe hacerlas.

- Para fallas ocultas, vale la pena realizar una tarea proactiva si esta va a reducir el riesgo de fallas múltiples asociadas con esa función, a un nivel tolerablemente bajo. Si hay seguridad en elegir la tarea adecuada, entonces se debe llevar un proceso de detección de fallas. Si el proceso adecuado para esto no se puede determinar, la decisión secundaria de omisión es que el ítem, deba ser rediseñado (dependiendo de las consecuencias de fallas múltiples).
- Para fallas con consecuencias medioambientales y de seguridad, solo es válido realizar una tarea proactiva, si esta reduce el riesgo de ese

problema en sí mismo, a un nivel muy bajo, de no eliminarlo directamente. Si no se encuentra una solución que disminuya el riesgo a un nivel tolerablemente bajo, el ítem debe ser rediseñado, o se debe cambiar de proceso.

- Si la falla trae consecuencias operativas, solo vale la pena realizar una tarea proactiva si el costo total de realizarla durante un periodo de tiempo determinado, es menor que los costos de las consecuencias operativas y de reparación durante el mismo periodo. En otras palabras, la tarea debe tener un justificativo económico. Si no tiene esta justificación, la decisión de default inicial es mantenimiento no programado (Si esto ocurre, y las consecuencias operativas son aun inaceptables, entonces la segunda decisión de default es nuevamente el rediseño.)

Las tareas en condición se consideran primeras en el proceso de selección de tareas por las siguientes razones:

- Pueden casi siempre ser llevadas a cabo sin mover el bien de la posición en que está instalado y generalmente mientras este opera, de modo que rara vez interfieren con el proceso de producción. Además son fáciles de organizar.
- Ellas identifican condiciones específicas de fallas potenciales, de modo que las acciones correctivas se pueden definir claramente antes de que comience el trabajo. Esto reduce la cantidad de trabajo de reparación, y permite realizarlo más rápidamente.
- Al identificar el equipo en el punto de falla potencial, permiten determinar su vida útil (como se ilustraba en el ejemplo de la rueda).

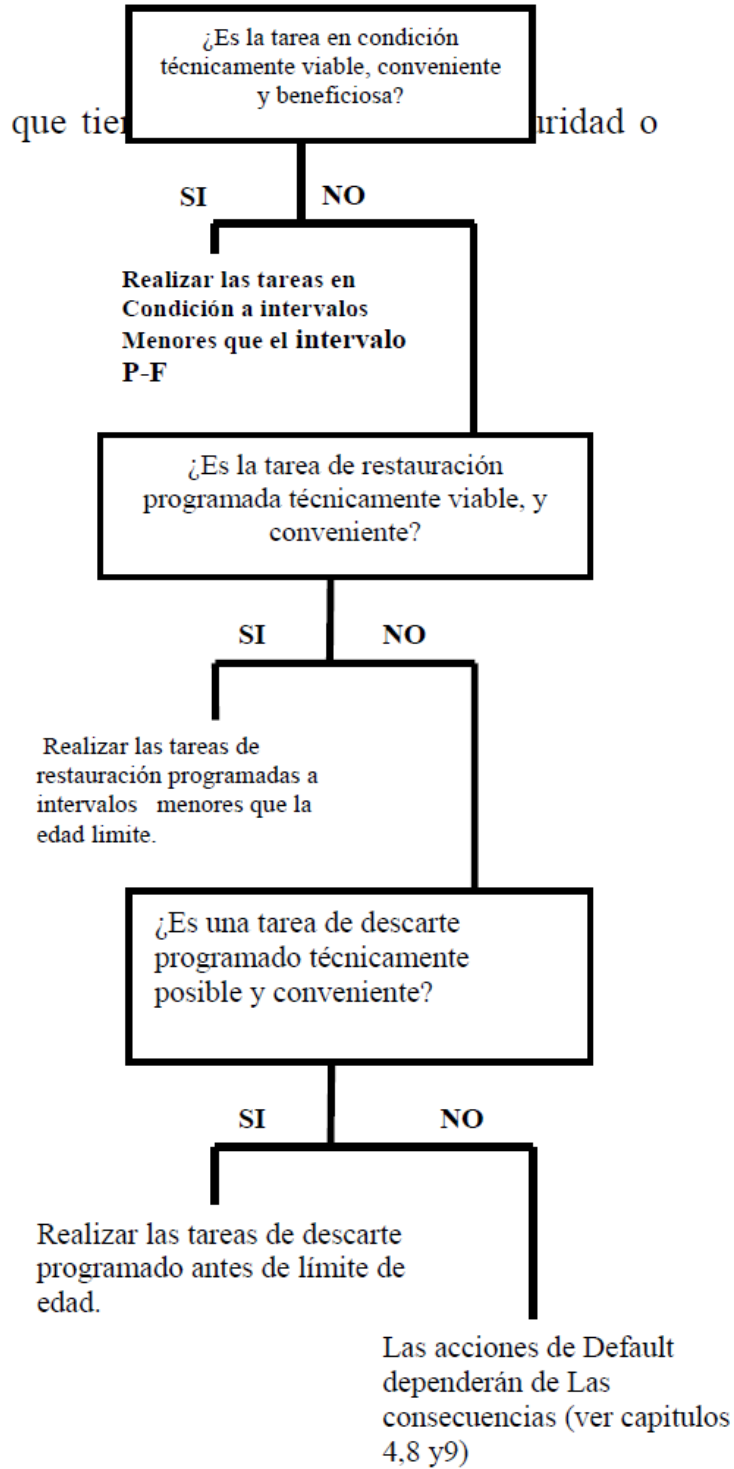
Las Tareas de restauración programada y descarte programado. Si no se logra encontrar una tarea en condición apropiada para un modo de falla particular, la siguiente opción es la restauración programada o el descarte programado. Si satisfacen la viabilidad técnica y el criterio de costo –efectividad pueden reducir significativamente las consecuencias de las fallas a las que va dirigida.

La Combinación de tareas. Para un número muy pequeño de modos de falla, que tienen consecuencias de seguridad o medioambientales, no se puede encontrar una tarea que en sí misma, reduzca el modo de falla a un nivel bajo aceptable, y una modificación apropiada que se auto sugiera.

En estos casos, es a veces posible encontrar una combinación de tareas, (generalmente de dos categorías de tareas diferentes, tales como una tarea en condición, y una tarea de descarte programado), que reduzca el riesgo de una falla a un nivel aceptable.

El proceso de selección de tareas se resume en la figura 26.

Figura 26. Proceso de selección de tareas



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 173.

3.2.4 El diagrama de decisión de RCM. La planilla de decisión de RCM es ilustrada en la figura 27. En dicha planilla se registra: Que rutina de mantenimiento se va a realizar, con qué frecuencia y quien la va a llevar a cabo.

- Que fallas son lo suficientemente serias como para garantizar el rediseño.
- Casos donde se llevó a cabo una decisión deliberada para permitir que ocurran las fallas.

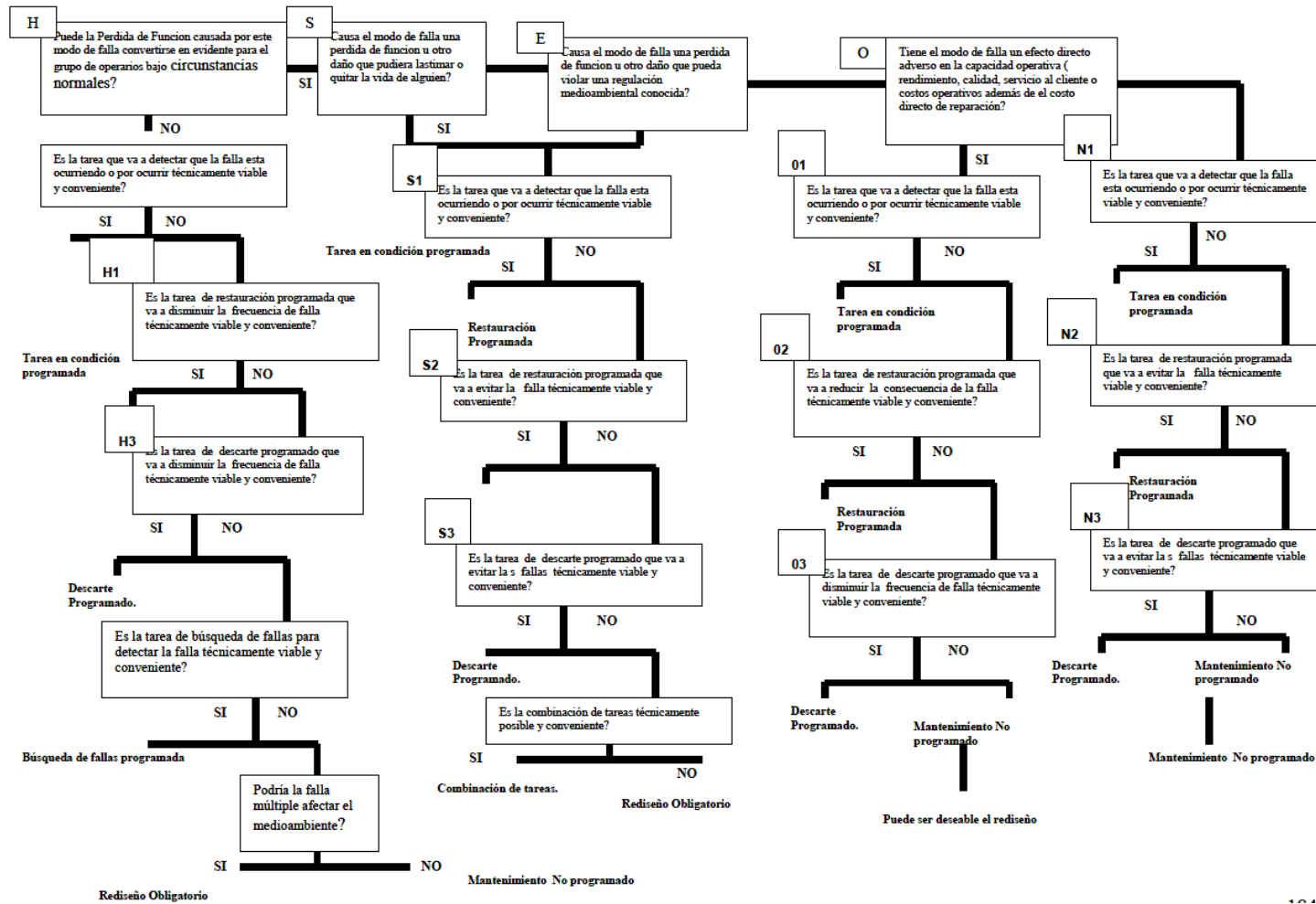
Figura 27. Planilla de Decisión RCM

<i>Planilla de decisión RCM II</i>	Sistema							Nº de sist.			Facilitador:		Fecha		Nº de hoja	
	Sub- Sistema							Nº de sub. sist.			Auditor:		Fecha		De	
Referencia De informacion			Consecuencia de la evaluacion				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Accion de Default			TAREA PROPUESTA	Intervalo Inicial	Puede ser realizado por	
F	FF	FM	H	S	E	O			H4	H5	S4					

Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 203.

El diagrama de decisión de RCM, que integra todos los procesos de decisión en un marco estratégico simple. Este marco se muestra en la figura 28, y se aplicada a cada uno de los modos de falla enumerados en la planilla informativa de RCM.

Figura 28. Diagrama de decisión de RCM.



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 204.

3.2.5 Aplicación del proceso de RCM. Antes de establecer y analizar los requisitos de mantenimiento de cualquier organización, se necesita conocer sus bienes, y decidir cuáles de ellos serán los sometidos al proceso de revisión de RCM. Esto significa que se debe preparar un registro de la planta si es que no hubiere uno.

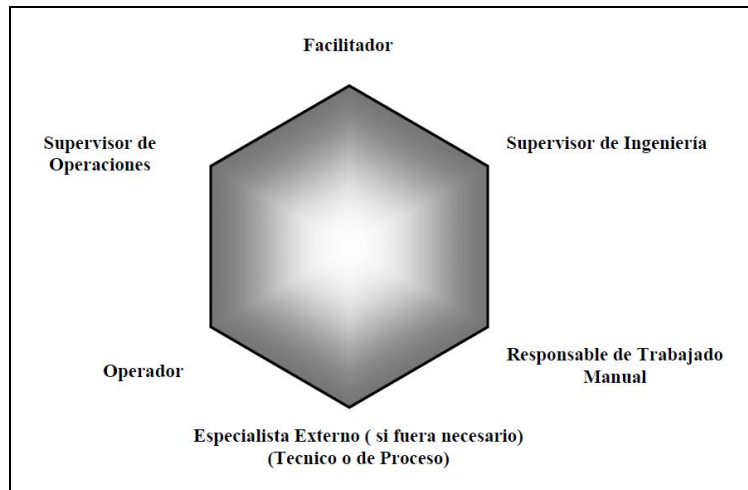
La aplicación formal del proceso de RCM finaliza con planillas de decisión completas. Esto especifica un número de *tareas de rutina* que necesitan ser realizadas a intervalos regulares para asegurar que el bien continúa cumpliendo con las funciones que los usuarios esperan, conjuntamente con las acciones default que deben llevarse a cabo si no se pudiera encontrar una tarea de rutina apropiada.

3.2.5.1 Planificación. Los elementos claves para este proceso de planificación son:

- Decidir qué bienes son los que obtendrán un mayor beneficio del proceso de RCM, y como exactamente se verán beneficiados.
- Evaluar los recursos necesarios para aplicar el proceso a los bienes seleccionados.
- En los casos donde los posibles beneficios justifican la inversión, decidir detalladamente quién llevará a cabo el proceso y quién auditara cada análisis, dónde y cómo, y hacer todos los arreglos para que reciban el entrenamiento necesario.
- Asegurar que el contexto operativo del bien, se entiende con claridad.

Se debe realizar una revisión de los requisitos de mantenimiento, esto debe ser realizado por grupos pequeños, que incluyan al menos una persona responsable de mantenimiento y una persona de la función operativa.

Figura 29. Organización de un grupo típico de revisión



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 270.

3.2.5.2 Facilitadores. Su rol es garantizar que:

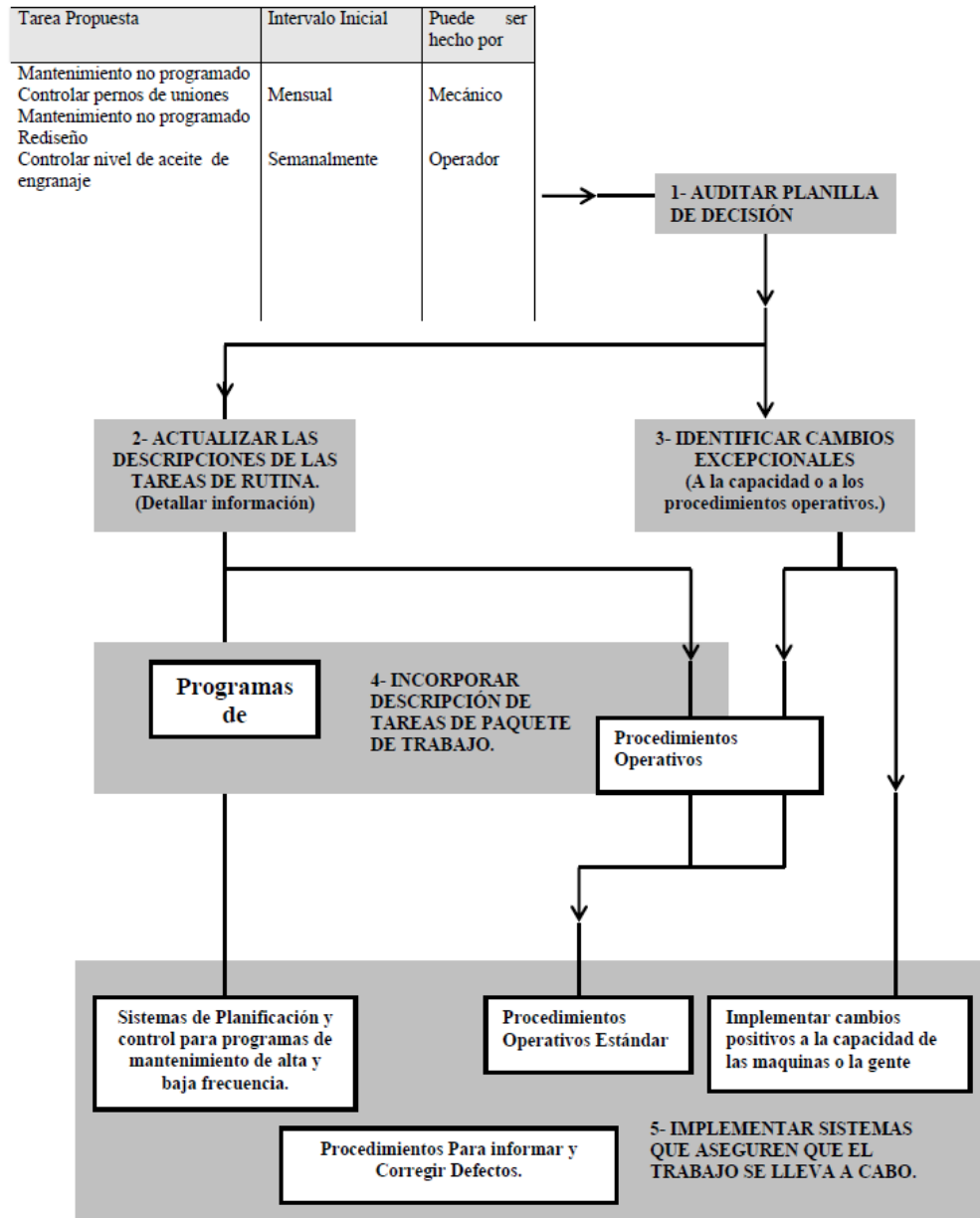
- El análisis de RCM se lleva a cabo al nivel correcto, que los límites del sistema están claramente definidos, que los ítems de importancia no son pasados por alto, y que los resultados del análisis son registrados apropiadamente.
- Que todos los miembros del grupo comprenden y aplican correctamente el proceso de RCM.
- El grupo concuerda en general de un modo convincente, mientras se retiene el entusiasmo y compromiso individual de los miembros.
- El análisis progresa con una rapidez razonable, y termina a tiempo.

3.2.5.3 Resultados del análisis de RCM. El análisis de RCM aporta tres resultados tangibles:

- Rutinas de mantenimiento a seguir por el sector competente.
- Procedimientos operativos seguros para los operadores del bien.

- Una lista de áreas donde deban realizarse cambios, ya sean de diseño o del modo operativo, para revertir las situaciones en las que no se están logrando los niveles productivos deseados con la configuración actual.

Figura 30. Implementación de las recomendaciones del RCM



Fuente: MOUBRAY, John. RCM II Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. P. 217.

3.2.5.4 Auditorías e implementación. Inmediatamente después de haber concluido la revisión de cada bien, los managers senior, con responsabilidad superior en el área deben estar satisfechos de que las decisiones tomadas por el grupo son sensibles y defendibles.

Después de que se aprueba cada revisión, las recomendaciones se implementan incorporando rutinas de mantenimiento en las planificaciones y sistemas de control, cambios en los procedimientos operativos del bien, y proveyendo recomendaciones de modificaciones de diseño a las autoridades del sector correspondiente. La auditoría de RCM implica una revisión formal de los contenidos de las Planillas Informativas y de Decisión de RCM.

3.2.6 Que logra el RCM.

3.2.6.1 Mayor seguridad e integridad medioambiental. El RCM considera las implicaciones medioambientales y de seguridad de cada falla, antes de considerar sus efectos en las operaciones. Esto significa que se siguen determinados pasos para minimizar los riesgos ambientales, y la seguridad relativa a los equipos, de no lograrse eliminarlos por completo.

3.2.6.2 Desempeño operativo optimizado. (Rendimientos, calidad y servicio al cliente): RCM reconoce que todo tipo de mantenimiento es valedero, y proporciona reglas para decidir cuál es el más aplicable en cada situación. De este modo, asegura que se escogen los métodos más apropiados de mantenimiento para cada bien en particular, y que se llevan a cabo las acciones necesarias en los casos en los que el mantenimiento no pueda ser de ayuda. Este esfuerzo de mantenimiento que presenta un enfoque más centrado conduce a una mejora productiva de los bienes existentes donde se la requiere.

3.2.6.3 Mejor relación costo-efectividad. RCM enfoca la atención continuamente en las actividades de mantenimiento que producen en mayor efecto en el desempeño de la planta. De este modo se asegura que lo invertido en mantenimiento, se utilizó de la manera prioritaria.

Lo que es más, si RCM se aplica correctamente a los sistemas de mantenimiento existentes, disminuye la cantidad de trabajo de rutina (en otras palabras, las tareas de mantenimiento se llevaran a cabo en una base cíclica) destinando en cada periodo, generalmente entre el 40% y el 70%. Si RCM es utilizado para desarrollar un nuevo programa de mantenimiento, la carga de trabajo es sumamente menor que si dicho programa se basa en cualquier otro método.

3.2.6.4 Mayor vida útil en equipos de costos elevados. Debido al énfasis centrado el uso de técnicas de manutención en condición.

3.2.6.5 Un banco de datos comprensible. Todo reporte de RCM termina con un registro completo y totalmente documentado de los requisitos de mantenimiento de todos los bienes significativos utilizados por la organización.

Esto hace posible adaptarse a circunstancias cambiantes (como ser rotaciones o nueva tecnología) sin tener que reconsiderar todas las políticas de mantenimiento desde la base. Esto también permite a los operadores, demostrar que sus programas de mantenimiento están basados en fundamentos racionales (las auditorias son requeridas por cada vez más entes reguladores). Finalmente la información almacenada en las planillas de RCM reducen los efectos de la rotación de personal, que trae aparejada una pérdida de experiencia. También provee una visión mucho más clara de las herramientas requeridas para el mantenimiento de cada bien, y para decidir sobre los repuestos que deben

conservarse en stock. Un producto derivado de gran valor son también los gráficos y manuales mejorados.

3.2.6.6 Mejoras en la motivación individual. Especialmente de las personas involucradas en las revisiones. Esto lleva un entendimiento mucho más claro del equipo en su contexto operativo, conjuntamente con una mayor propiedad de los problemas de mantenimiento y sus soluciones. También significa que estas soluciones tenderán a una mayor duración.

3.2.6.7 Mejora en el trabajo en equipo. RCM provee un lenguaje perfectamente entendible para toda persona involucrada con mantenimiento. Esto da a los operadores y personal de mantenimiento un claro entendimiento de que se puede o no realizar para mejorar el desempeño.

Todas estas características, forman parte de la corriente principal de la administración de mantenimiento, y muchas son actualmente el objetivo de programas mejorados. Una de las ventajas principales de RCM es que provee una estructura efectiva de seguimiento paso a paso, para abarcar a todas al mismo tiempo, y para hacer partícipes a toda aquella persona que tenga que ver con el equipo durante el proceso.

RCM otorga resultados inmediatamente. En realidad si son enfocados y aplicados correctamente, RCM cubre sus propios gastos en cuestión de unos meses o hasta de unas semanas. La revisión transforma tanto la percepción que la organización tiene de los requisitos de mantenimiento de un determinado equipo, como también la percepción general que se tiene de los programas de mantenimiento. Los resultados son una mejor relación costo- efectividad, mayor armonía, y un mantenimiento mucho más exitoso.

3.2.7 La Norma SAE y el RCM⁶. El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) fue documentado por primera vez en un reporte escrito por F.S. Nowlan y H.F. Heap y publicado por el Departamento de Defensa de U.S. en 1978. El mismo describió los procesos innovadores y actuales, para ese entonces, usados para desarrollar programas de mantenimiento para aviones comerciales. Desde entonces, el proceso MCC ha sido ampliamente utilizado por otras industrias, y desarrollado y mejorado ampliamente. Estas mejoras se han incorporado en numerosos documentos de aplicación, publicados por una variedad de organizaciones alrededor del mundo. Muchos de estos documentos permanecen fieles a los principios básicos del MCC expuestos por Nowlan y Heap.

Sin embargo, en el desarrollo de algunos de estos documentos, se han omitido o malinterpretado elementos claves del proceso MCC. Debido a la creciente popularidad de MCC, han surgido otros procesos a los cuales sus defensores les han dado el nombre de “MCC”, pero que no están basados en absoluto en Nowlan y Heap. Mientras que la mayoría de estos procesos pueden alcanzar algunas de las metas de MCC, otros pocos son activamente contraproducentes, y algunos son, incluso, dañinos.

Como resultado, ha habido un crecimiento de la demanda internacional por una norma que imponga los criterios que cualquier proceso deba cumplir para ser llamado “MCC”. SAE JA1011 contempla esa necesidad. Sin embargo, SAE JA1011 presupone un alto grado de familiaridad con los conceptos y la terminología de MCC. Esta guía amplifica, y donde es necesario clarifica, estos conceptos claves y términos, especialmente aquellos que son únicos para MCC. El proceso de RCM descrito cumple totalmente con las normas SAE.

⁶ SAE JA2012, Prácticas recomendadas para vehículos aeroespaciales y de superficie, Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes., 2002. PA 15096-0001

La norma aprobada por la SAE no presenta un programa Standard (RCM). Su título es “Criterio de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (SAEJA1011)”. Esta norma presenta un criterio contra el cual se puede comparar un proceso. Si el proceso cumple con ese criterio, puede ser considerado un “Proceso de RCM” con confianza. (Esto no significa necesariamente que los procesos que no cumplen con la norma SAE RCM no sean procesos válidos para la formulación de estrategias de mantenimiento. Simplemente significa que no se debería aplicar el término “RCM”)⁷.

La SAEJA 1012 describe la aplicación de la aproximación del diagrama de decisión hacia el MCC ya que al rededor del mundo se utilizan muchos diagramas de decisión diferentes. Algunos de estos diagramas están conformados muy cercanamente a los principios discutidos previamente, mientras que otros divergen sustancialmente (en algunos casos, a tal magnitud que no cumplen en absoluto con SAE JA011).

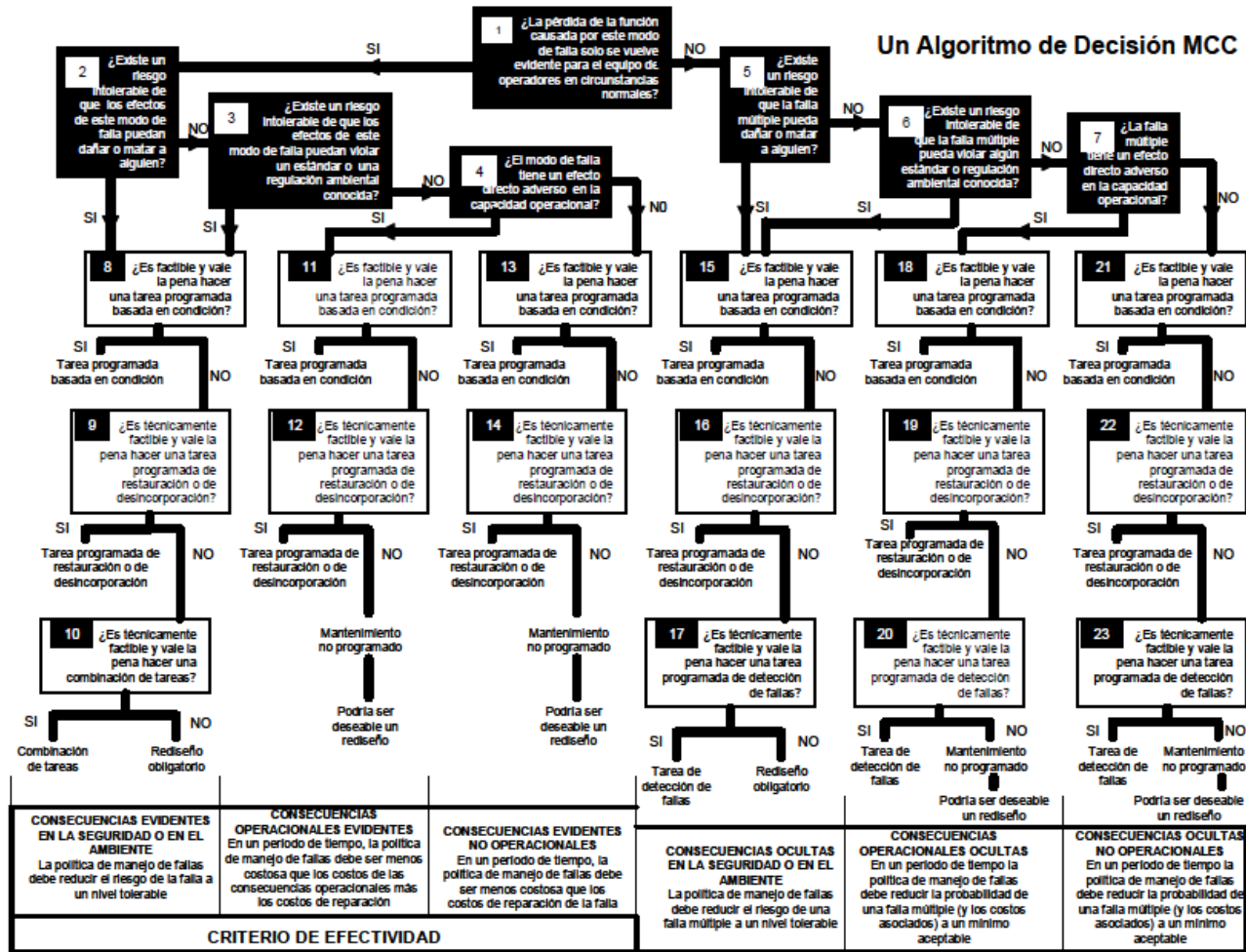
Algunos de estos diagramas son propios, mientras que otros son del dominio público. Por estas razones, esta Guía no transmite ningún diagrama de decisión específico. Sin embargo; sólo con propósitos ilustrativos, en las Figuras 31 se da un ejemplo del diagrama de decisión que cumple con los principios.

Estos diagramas de decisión se aplican típicamente en tres fases, como sigue:

- a. Trabajando desde el principio, utilice el diagrama de decisión para determinar las categorías de consecuencias que aplican al modo de falla en consideración.
- b. Luego trabajando la columna de consecuencias relevantes, utilice el criterio de factibilidad técnica para evaluar la factibilidad técnica de las posibles políticas de manejo de fallas en cada categoría.
- c. Seleccione una política de manejo de fallas desde la primera categoría que satisfaga el criterio de factibilidad técnica y que tratará efectivamente con las consecuencias del modo de falla en consideración.

⁷ MOUBRAY, John. Op. Cit. P. 330

Figura 31. Algoritmo de decisión MCC



Fuente: SAE JA2012, Prácticas recomendadas para vehículos aeroespaciales y de superficie, Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes,. 2002. PA 15096-0001. P. 53.

SAE JA1011 describe el criterio técnico mínimo que cualquier proceso debe cumplir para ser llamado “MCC”, cuando se aplica a un activo específico. Para que el MCC sea exitoso, es esencial direccionar los asuntos de gerencia y recursos bajo los siguientes títulos:

- a. Priorizar los activos y establecer objetivos.
- b. Planificación.
- c. Nivel de análisis y límites del activo.
- d. Documentación técnica.
- e. Organización.
- f. Entrenamiento.
- g. Rol del software computacional.
- h. Recolección de datos.
- i. Implementación.

Una vez que se ha completado un análisis MCC (y subsecuentes actualizaciones), se deben implementar los resultados. La implementación exitosa requiere la atención cuidadosa de cinco pasos claves:

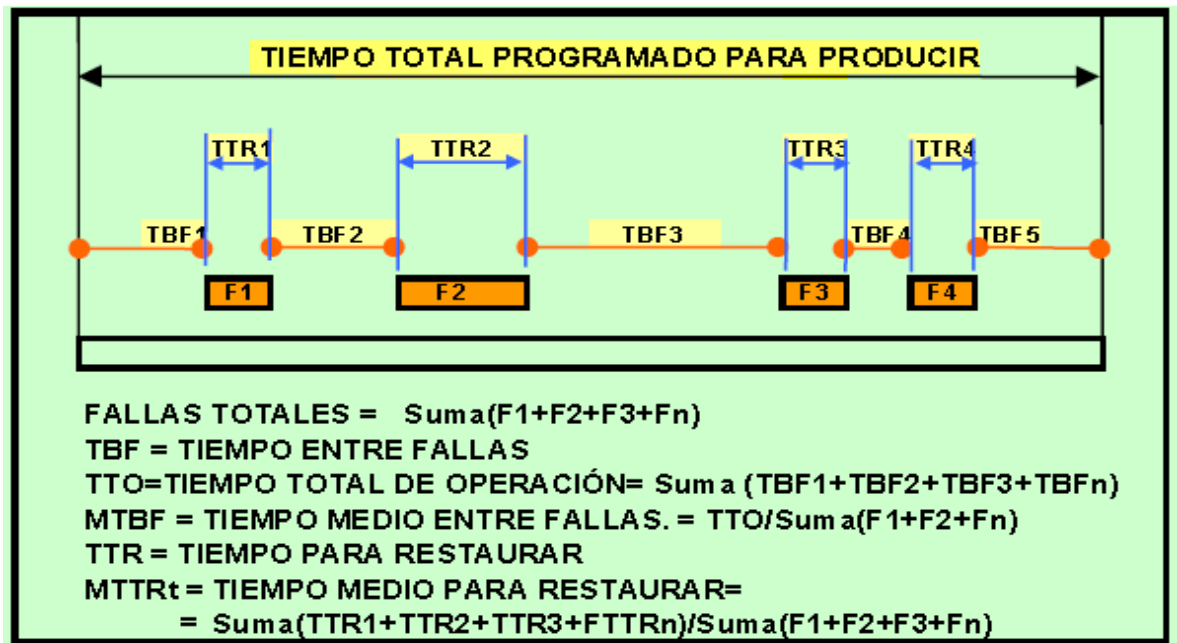
- a. Auditoría MCC: Toda recomendación debe ser aprobada formalmente (auditada) por los gerentes con responsabilidad sobre los activos.
- b. Descripciones de trabajos programados: las tareas derivadas del MCC finalmente se deben describir con suficiente detalle para asegurar que la tarea se hará correctamente por cualquier persona que la ejecute.
- c. Cambio de especificaciones: todos los cambios de especificaciones recomendados se deben describir con suficiente detalle para asegurar que serán implementados correctamente.

d. Planificación y ejecución de las tareas programadas: Las tareas deben ser acopladas en bloques de trabajo ejecutables. Entonces se deben tomar los pasos para asegurar que estos bloques de trabajo sean desarrollados por las personas correctas en el momento justo y de la manera adecuada, y para asegurar que cualquier trabajo levantado desde las tareas se trate apropiadamente. Esto requerirá un sistema de programación y de planificación apropiado.

4. INDICADORES CLAVES EN LA GESTION DEL MANTENIMIENTO⁸

Para la filosofía del RCM, el control de la gestión del mantenimiento está relacionada con tres indicadores básicos: disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad. A continuación se presentan los parámetros a ser utilizados en el cálculo de estos indicadores.

Figura 31. Indicadores claves de mantenimiento.



Fuente. GONZALEZ FERNANDEZ, Francisco Javier. Auditoria del Mantenimiento e Indicadores de Gestión.

⁸ PARRA MARQUEZ, Carlos. Curso Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. 2008. INGEMAN.

4.1 DISPONIBILIDAD⁹

La disponibilidad es el porcentaje de tiempo que un sistema o equipo esta útil (disponible) para producción. El tiempo que esta fuera de servicio (indisponible) debe contemplar toda paralización por mantenimiento correctivo o preventivo, desde el momento en que queda fuera de servicio hasta que se devuelve a entregar operativo a Producción o Explotación.

$$DISPONIBILIDAD = \frac{\textit{Tiempo Total} - \textit{Tiempo fuera de servicio}}{\textit{Tiempo Total}}$$

La disponibilidad relaciona básicamente los tiempos de reparación de las fallas (MTTR- mantenibilidad) y los tiempo operativos entre fallas (MTBF, depende de la tasa de fallas- confiabilidad).

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

4.2 CONFIABILIDAD¹⁰

La confiabilidad es definida generalmente como la probabilidad de que un sistema llevará a cabo su función de manera satisfactoria durante un período de tiempo especificado en condiciones establecidas. Por lo general, se expresa como un porcentaje y se mide por el tiempo medio entre fallos (MTBF).

⁹ GONZALEZ FERNANDEZ, Francisco Javier. Auditoria del Mantenimiento e Indicadores de Gestión. Fundación Confemetal Editorial. p. 51.

¹⁰ GULATI, Ramesh. Maintenance and Reliability Best Practices. p. 129.

La confiabilidad se relaciona básicamente con la tasa de fallas (cantidad de fallas) y con el tiempo medio entre fallas (MTBF-tiempo medio entre fallas). Mientras el número de fallas de un determinado equipo vaya en aumento o mientras el MTBF de un equipo disminuya, la confiabilidad del mismo será menor.

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)¹¹

Esta es una medida básica de la confiabilidad de los activos. Se calcula dividiendo el tiempo total de funcionamiento del equipo por el número de fallos sobre un cierto período de tiempo. MTBF es la inversa de la tasa de falla.

Mide el tiempo promedio que es capaz de operar el equipo a capacidad, sin interrupciones dentro de un periodo considerado de estudio.

$$MTBF = \frac{\textit{Horas de Operación}}{\textit{Numero Total de Fallas}}$$

4.3 MANTENIBILIDAD¹²

Mantenibilidad es una característica inherente de sistema o diseño de producto que se refiere a la facilidad, precisión, seguridad y economía en el desempeño de las tareas de mantenimiento. Un sistema (o producto) debe ser diseñado de manera que pueda mantenerse sin grandes inversiones de tiempo, con el mínimo coste, con un impacto mínimo sobre el medio ambiente, y con unos recursos

¹¹ Ibid. p. 128.

¹² **Blanchard. Benjamin S. y Verma, Dinesh C.** Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management. **p. 1.**

mínimos de gasto (personal por ejemplo, materiales, instalaciones y equipos de prueba). Uno de los objetivos es el de mantener un sistema eficaz y eficiente en su entorno previsto, sin afectar negativamente a la misión de ese sistema. Mantenibilidad es la "Habilidad" de un elemento que se mantenga, mientras que el mantenimiento constituye una serie de acciones necesarias para restaurar o conservar un elemento en un estado de funcionamiento efectivo. La mantenibilidad es un parámetro de diseño. El mantenimiento se requiere como consecuencia de diseño.

Mantenibilidad, como una característica de diseño, puede ser expresado en términos de factores de frecuencia de mantenimiento, tiempos de mantenimiento y factores de horas hombre de labores, y costos de mantenimiento. Más específicamente, mantenibilidad puede ser definida como:

“Una característica de diseño e instalación el cual es expresado como la probabilidad de que un equipo sea retenido o restaurado a una condición específica dentro de un periodo de tiempo dado, cuando el mantenimiento es desempeñado en conformidad con procedimientos y recursos prescritos”.

El parámetro fundamental para calcular la mantenibilidad lo constituye el tiempo medio de reparación de las fallas (MTTR). Cuando el MTTR de un determinado equipo es alto, se dice que el equipo tiene una baja mantenibilidad (mientras más tiempo duren las reparaciones de las fallas asociadas a un equipo, su mantenibilidad ira disminuyendo). En el caso contrario, de que el tiempo medio de reparación de las fallas de un determinado equipo sea bajo, se dice que el equipo tiene una alta mantenibilidad.

Tiempo medio para reparar (MTTR)¹³

Este es el tiempo medio necesario para restaurar un activo en condiciones de plena operatividad en un fracaso. MTTR es el tiempo para reparar el activo y es una medida importante de la mantenibilidad.

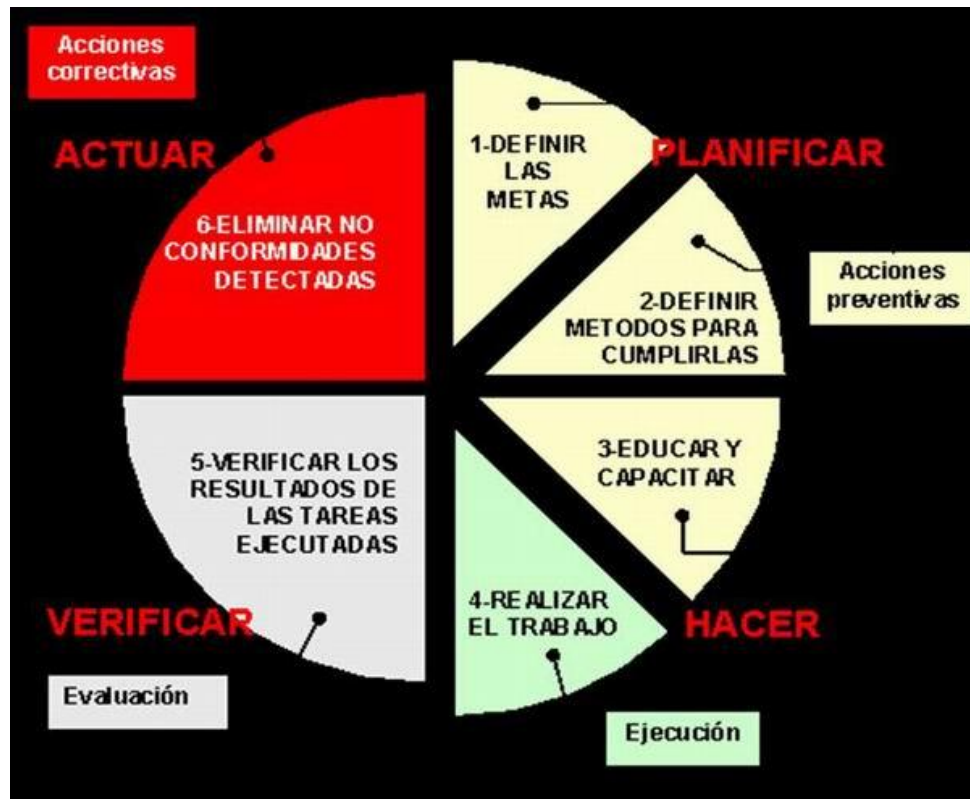
$$MTTR = \frac{\textit{Tiempo Total de Reparación}}{\textit{Numero total de reparaciones}}$$

¹³GULATI, Ramesh. Maintenance and Reliability Best Practices. p. 128.

5. MODELO DE IMPLEMENTACION PROPUESTO

Para la implementación del modelo RCM se propone realizar el proyecto en 4 fases, basados en el ciclo PHVA de Deming (Planear, Hacer, Verificar y ajustar).

Figura 32. Fases de Implementación del RCM.



Fuente. Smith, Anthony M. y Hinchcliffe. Glenn R. RCM - GATEWAY TO WORLD CLASS MAINTENANCE. p. 213.

5.1 PLANEAR

El primer paso, el cual consiste en planear, se desarrolló dando respuesta a las siguientes cuatro preguntas:

- 1.Cuál es la meta final?
2. Que recursos se requerirán (recursos humanos, materiales, herramientas, compromisos, recursos económicos, reuniones y computadores)
3. ¿Cómo se va a asegurar y mantener estos recursos?
4. Prever, lo mejor que se pueda, que peligros y obstáculos se pueden presentar a lo largo del camino (por ejemplo: disponibilidad de recursos, competencias, cambio de compromisos, falta de pertenencia y participación)

En esta etapa, se trata de planificar todo el proyecto de implementación de RCM, lo mejor que se pueda, se deben definir las metas de disponibilidad y confiabilidad que se requieren con la aplicación del RCM, se deben tener en cuenta todos los aspectos del proyecto desde su inicio hasta su final.

5.1.1 Planeación. ¿De quién y en qué nivel de gestión se requiere para obtener aprobaciones? Recordemos que RCM debe ser apoyada desde la parte superior de cualquier organización si se quiere tener éxito y tener una larga y productiva esperanza de vida.

- ¿De dónde se provendrá el financiamiento? Es necesario planificar para:
 - Computación e informática.
 - Consultores.
 - Los sueldos de las personas de la empresa implicadas en el proyecto

(supervisores, facilitador, instrucción / procedimiento de documentadores, planeadores, etc.).

-La compra de un nuevo equipo para apoyar los métodos recomendados por el análisis RCM, por ejemplo, vibración o equipos de termografía

-Carpetas, suministros y productos varios.

- ¿Quién es el patrocinador de RCM? Esta pregunta suele estar relacionado con obtención de apoyo a la gestión. Un patrocinador es reconocible por su fin y relación positiva con las personas, debe surgir durante la fase piloto del proceso de planificación.

- ¿Necesita la aprobación y el apoyo de otros grupos, organizaciones o personas fuera de su control directo? Esto es fundamental, sobre todo si requieren el uso de los recursos que controlan.

-Operaciones

-Otros grupos de apoyo, tales como grupos de Mantenimiento predictivo.

-Planificación y control de trabajo-CMMS¹⁴.

-Administrativos tipos, por ejemplo, presupuesto, agentes de compra

-Personal de oficina.

- ¿Cómo se implementarán las recomendaciones? Este ha sido tradicionalmente el obstáculo, la diferencia entre un programa de RCM exitoso y uno que no lo es.

-¿Tiene un plan de implementación?

-Puede su equipo ejecutar directamente todas las recomendaciones?.

-Quién más tiene un papel en la implementación de las recomendaciones, y cómo se va a obtener y mantener su apoyo?

¹⁴ CMMS. Computerized Maintenance Management System. Sistema de Administración de la Gestión del Mantenimiento, para el caso de ECOPETROL S.A. es la herramienta Ellipse de MINCOM.

-Cuál es el impacto en el CMMS?

-Cómo se asignarán puntos de interés, el progreso y seguimiento registrado, y el ROI (Retorno de la Inversión), se calculará?.

-Cuál es el impacto en otros sistemas de la empresa, por ejemplo, almacenes, contabilidad?

• ¿Cuáles son los posibles efectos organizativos cuando este programa sea implementado? ¿Quién hará qué tareas por ejemplo: será operaciones el que se espera que haga el mantenimiento y van a hacerlo? ¿Existen temores de reducciones de personal?

-Planta niveles de dotación de personal?

-Cómo está organizada la planta?

-Cómo se le asignará el trabajo?.

¿Cómo se medirá el éxito, y, muy importante, ¿cuáles son los indicadores para ser empleado?.

• **A corto plazo**

-Los cambios en el programa de mantenimiento preventivo implementado, Retorno de la Inversión preliminar de los puntos Interés, especialmente en cualquiera de alto impacto.

• **A largo plazo**

-Cambio en el coste total del mantenimiento.

-Cambio en la tasa de paro forzado en los sistemas con RCM versus aquellos que no tienen RCM e incluso los componentes.

-Cualquier evento de mantenimiento correctivo eliminado con RCM, y lo que se está haciendo para asegurarse de que no vuelva a suceder.

-Retorno de la inversión a largo plazo, ambos medidos y previstos de la aplicación en los puntos de interés.

- ¿Cómo se mantendrá la gestión informada sobre los progresos que están siendo hechos, y cómo se puede lograr? Entre más visible sea el programa, más alta la probabilidad de que continúe siendo soportado. Además, no se debe tener miedo de reportar oportunidades de mejora (por ejemplo, problemas).

Los dos últimos elementos, son los indicadores y la información, son las claves principales para el éxito de cualquier programa. Hemos encontrado que una cierta forma de los informes de progreso generalmente es muy eficaz en el corto plazo. En esta primera etapa se definirá el alcance de la implementación del RCM, las metas en los indicadores de mantenimiento y confiabilidad, los recursos requeridos por la organización, como objetivos principales de esta fase se tienen¹⁵:

- Encontrar las frecuencias adecuadas para asegurar el buen funcionamiento de los equipos.
- Extender el tiempo entre paradas, aumentar el tiempo medio entre fallas, MTBF (por sus siglas en ingles).
- Disminuir el número de paradas.
- Identificar acciones que eviten el mantenimiento reactivo.
- Incrementar la motivación del personal, especialmente los que intervienen directamente en la implementación del RCM.

5.1.2 Alcance. Por los altos costos de mantenimiento e incremento del correctivo en los equipos de las otras tres plantas de inyección de agua existentes en La Cira Infantas, se aplicara la metodología RCM, basado en la norma SAE JA1012, a los

¹⁵ PEREZ CONTRERAS, Beatriz y PLATA TORRES, Fabio Andres. Modelo del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM II de los equipos de la división de hidrocarburos y exploración de minerales “H&EM” de la empresa Drummond Ltd. Colombia. UIS Trabajo de Grado 2010.

equipos críticos: bombas booster y bombas principales de inyección de agua, y todos sus subsistemas asociados.

5.1.3 Factores de éxito.

- Apoyo de la Vicepresidencia de Producción y en particular de la Gerencia Regional Magdalena Medio, en todas las fases del proyecto, que permitan garantizar la disponibilidad de los recursos humanos, económicos y tecnológicos requeridos para cada una de las fases a desarrollar.
- Alto grado de compromiso de los integrantes del grupo de trabajo RCM, el cual deber ser multidisciplinario.

Se tendrán en cuenta las siguientes premisas¹⁶ para el RCM, estas premisas son el punto de partida para el análisis RCM, por lo tanto, para este estudio se considera que la organización debe propiciar el cumplimiento de ellas antes de implementar esta metodología.

- Los equipos auxiliares o stand-by deben estar disponibles y probados.
- Los repuestos esenciales para el mantenimiento deben estar disponibles en bodega.
- Según la metodología RCM, durante el estudio de análisis, no se analizaran fallas múltiples.
- Las fallas en la ejecución de procedimientos de mantenimiento y montaje, inadecuada especificación o selección de equipos no son tenidas en cuenta en el análisis de RCM.
- Se planea y programa oportunamente; el cálculo económico de las pérdidas por falla de un equipo es estimado teniendo en cuenta solo el tiempo empleado para su reparación o cambio. Por lo tanto, las demoras en la

¹⁶ GUIA PARA LA REALIZACION DE TALLERES DE ANALISIS RCM EN ECOPETROL S.A. ECP-GCM-G-004. Grupo Central de Mantenimiento – GCM. Junio de 2010. ECOPETROL S.A.

planeación y programación de las tareas no están incluidas, pero si aumentarían al consecuencia económica de la falla.

- El escenario crítico para cada modo de falla es con base en “cero mantenimiento”.
- Se busca aumentar la confiabilidad, la optimización de costos de mantenimiento y optimización de activos.

5.1.4 Conformación del equipo de trabajo. La conformación de un buen equipo de trabajo es el éxito para el desarrollo de un estudio RCM. El nombramiento de los integrantes del equipo de trabajo deberá ser realizado por la Superintendencia, mediante memorando oficial.

Los integrantes básicos para el desarrollo del estudio son:

- Facilitador
- Supervisor de operaciones o Producción
- Especialistas de planeación de cada disciplina.
- Especialistas de mantenimiento de cada disciplina.
- Especialistas de confiabilidad de cada disciplina.
- Otros especialistas (HSE, Administrador de inventarios, Proceso, Ingeniería), a demanda.

5.1.4.1 Hacer. Esta parte consiste básicamente en realizar y continuar realizando durante todas las fases del proyecto, todo lo que se planeó en la primera etapa.

Aquí es conveniente mencionar la información que se recolectara:

- Inventario de equipos.

- Costos de mantenimiento.
- Clasificación de equipos.
- Manuales, planos y documentos relacionados con los equipos.
- Experiencia de los fabricantes o proveedores técnicos especializados de fallas comunes en los equipos que suministran, teniendo en cuenta el contexto operacional.
- Información operacional, instrucciones de operación y mantenimiento.
- Bitácoras de reporte de los operadores.
- Historia del mantenimiento, registros de fallas anteriores.
- Listado de componentes de los sistemas.
- Procedimientos e instructivos de operaciones.
- Información de la industria.
- Listado de malos actores en equipos existentes en las otras plantas.
- Repuestos.

En las reuniones diarias se completara la hoja de información u hoja de funciones, la hoja de modos y efectos de falla y posteriormente la hoja de toma de decisiones.

5.1.4.2 Verificar. Después de la planeación, el segundo factor más importante en la orientación del éxito es el chequeo. El chequeo toma lugar constantemente y a lo largo de todo el proceso de RCM.

Es importante definir si los indicadores que se plantearon en la etapa de planeación, fueron efectivamente comunicados y divulgados a todos los integrantes del equipo de trabajo RCM, si éstos se están cumpliendo a cabalidad, o si existe alguna desviación, es importante que la alta dirección, la cual fue la patrocinadora de la implementación del RCM, está verificando los indicadores y los resultados y que se haga el seguimiento periódico del avance.

5.1.4.3 Ajustar. Ahora que la organización ha medido donde se encuentra, y si los resultados han sido o no satisfactorios, el cuarto cuadrante de la rueda PHVA, es actuar, si será fácil o se presentaran algunas oportunidades de mejora. Aquí, es conveniente, responder esta serie de preguntas:

- ¿Cuáles han sido los obstáculos que han impedido el éxito en el corto y largo plazo?.
- ¿Qué acciones futuras de éxito deben tener lugar y cuándo?

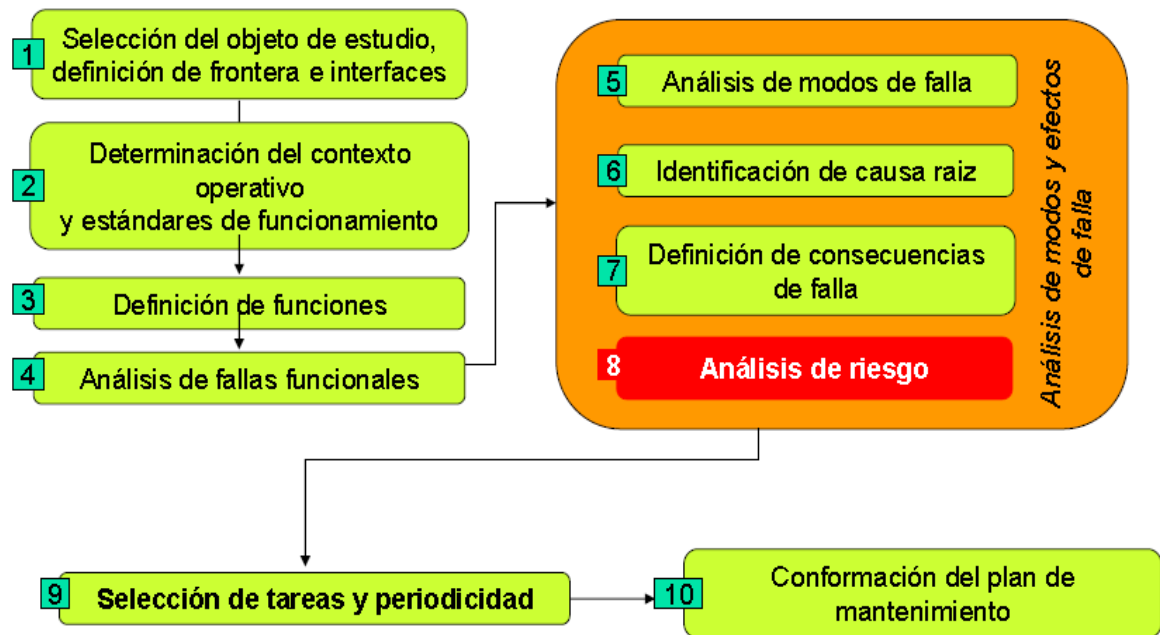
En otras palabras, si las respuestas a estas preguntas de chequeo han sido positivas, que necesita ser hecho para mantener el éxito continuo del programa? Y si son negativas, ¿Qué se requiere hacer para retomar y tener éxito?

Se debe continuar realizando el ciclo de mejoramiento continuo y estar retroalimentado constantemente.

5.2 DESARROLLO DE LA ESTRATEGIA METODOLOGICA DE RCM PARA LOS EQUIPOS DE PIA 3

Para el desarrollo de la metodología RCM a aplicar en la planta de inyección de agua PIA 3, se propone el siguiente modelo para el desarrollo de la misma, ver figura 33.

Figura 33. Diagrama de Flujo del proceso RCM.



Fuente. Curso Mantenimiento Centrado en Confiabilidad- Daniel Ortiz Plata. Bucaramanga. UIS 2013.

5.2.1 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DONDE SE PROPONE APLICAR LA METODOLOGÍA RCM

5.2.1.2 Modelo para la evaluación de criticidad basado en el concepto del riesgo¹⁷. Para la selección del objeto de estudio, se realizó un Análisis de Criticidad.

El análisis de criticidad es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de optimizar el proceso de asignación de recursos (económicos, humanos y técnicos).

El análisis de criticidad, se realiza en base a:

¹⁷ Parra Marquez, Carlos. Curso Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Ingeman.

- Se define el alcance y propósito para el análisis.
- Se establecen criterios de importancia.
- Se selecciona un método de evaluación para jerarquizar los sistemas seleccionados.

El objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta o instalación industrial, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. La información recolectada en el estudio podrá ser utilizada para:¹⁸

- Priorizar ordenes de trabajo de operaciones y mantenimiento.
- Priorizar proyectos de inversión.
- Diseñar políticas de mantenimiento.
- Seleccionar una política de manejo de repuestos y materiales.
- Dirigir las políticas de mantenimiento hacia las áreas o sistemas más críticos.

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

Criterios utilizados para la evaluación de la criticidad:

- Seguridad.
- Ambiente.

¹⁸ Huerta Mendoza, Rosendo. El Análisis de Criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. 2001, p.12.

- Producción.
- Costos (Operaciones y Mantenimiento).
- Frecuencia de Fallos.
- Tiempo promedio para reparar.

La siguiente figura muestra el modelo básico de criticidad

Figura 34. Modelo básico de criticidad



Fuente. Los Autores.

Modelo de factores ponderados basado en la teoría del Riesgo

El modelo propuesto está basado en la estimación del factor riesgo a través de la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Donde,

Frecuencia = # de fallos en un tiempo determinado

Consecuencia = ((Impacto Operacional x Flexibilidad) + Costos de Mantenimiento + Impacto SAH).

SAH: Salud, Medio Ambiente e Higiene y Seguridad industrial.

Tabla 3. Criterios de Valoración para la evaluación de la criticidad de los equipos de PIA 3.

<u>Frecuencia de Fallas:</u>		<u>Costo de Mantenimiento:</u>	
Pobre, Mayor a 4 fallas/año	4	Mayor o igual a US\$ 20.000	2
Promedio, 2-4 fallas/año	3	Inferior a US\$ 20.000	1
Buena, 1-2 fallos/año	2		
Excelente, Menos de 0.5 falla/año	1		
<u>Impacto Operacional:</u>		<u>Impacto en seguridad, ambiente e higiene:</u>	
Parada Inmediata de toda la producción	10	Afecta la seguridad humana/ambiente - alto impacto	8
Parada de la planta y tiene repercusión en otros sistemas	8	Afecta las instalaciones causando daños severos	6
Impacta en niveles de producción o calidad	6	Provoca daños menores (Accidentes e incidentes)	4
Repercute en costos operacionales adicionales asociados a disponibilidad	4	Provoca molestias mínimas instalaciones o al ambiente – limpieza	2
No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción	1	No provoca afectación ambiental sin violación a leyes	1
<u>Flexibilidad Operacional:</u>			
No existe opción de producción y no existe función de repuesto	4		
Hay opción de repuesto compartido	2		
Función de repuesto disponible	1		

Fuente. Los Autores.

Después de asignar valores a cada uno los factores evaluados se utiliza la siguiente matriz, donde se definen si son: críticos, media criticidad o No Críticos.

Consideraciones tenidas en cuenta: La asignación de pesos de importancia de cada uno de los factores seleccionados para evaluar el factor de consecuencias, dentro del proceso de análisis de criticidad, se tomó, teniendo en cuenta, la misión y los objetivos del negocio, y bajo el consenso del grupo de trabajo de RCM y de los Jefes de Departamento de Mantenimiento y Producción.

Figura 35. Matriz de Clasificación de criticidad para los equipos de PIA 3.

Frecuencia	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		Consecuencias				

Fuente. Los Autores.

Una vez se ha realizado la evaluación de criticidad para los equipos de PIA 3, se definen y establecen los equipos a analizar bajo la táctica RCM, partiendo por aquellos equipos que hayan sido establecidos como CRITICOS, seguido de los de MEDIA CRITICIDAD y por último, los NO CRITICOS, en ese mismo orden se deberían asignar los recursos de mantenimiento, como son repuestos, personal calificado, técnicas predictivas de mantenimiento, y se prioriza su atención ante eventos de mantenimiento correctivo, etc.

5.2.2 Conformación del equipo de trabajo RCM. Una vez se ha realizado el análisis de criticidad y se han definido los equipos a ser objeto de la metodología RCM, el paso a seguir, consiste en la formación del equipo natural de trabajo del RCM, para esto, es necesario, crear un equipo de trabajo multidisciplinario, constituido por personas con distintas funciones dentro de la organización que serán las responsables de dar respuesta a las siete preguntas básicas del RCM. Las personas que se consideraron idóneas para pertenecer al equipo natural de trabajo, fueron:

- **Un representante de Operaciones y/o Producción.** Esta persona debe ser experta o tener amplio conocimiento en el manejo/operación de sistemas y equipos.
- **Un representante de mantenimiento:** Experto en reparación y mantenimiento, para este rol, se escogieron, representantes de mantenimiento de cada una de las principales áreas, a saber, uno de mecánica, uno eléctrico y uno de instrumentación y control.
- **El programador de mantenimiento:** quien tiene la visión sistémica de la actividad.
- **Especialistas:** Expertos en cada una de las áreas de mecánica, instrumentación y control, y equipo eléctrico.
- **Un Facilitador:** quien será el encargado de guiar al equipo de trabajo en la realización del análisis de los modos y efectos de fallos (FMEA), y en la selección de las actividades de mantenimiento, ayudara a decidir a qué nivel de detalle deberá ser realizado el FMEA.
- **Un representante de Ingeniería de proceso:** quien aporta con su visión global de los procesos.
- **Un representante de HSE, Higiene y Seguridad Industrial,** quien tiene la visión de los riesgos físicos, Mecánicos, químicos, biológicos, etc.

5.3 DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL

El siguiente paso, en el proceso de metodología propuesta, es definir el contexto operacional para el proceso funcional de la planta y los estándares de funcionamiento.

En este paso, es muy importante conocer con exactitud cuáles son las fronteras, interfaces, características, condiciones operativas, condiciones ambientales.

FRONTERAS: se deben definir las fronteras del equipo, pues estas no serán parte del estudio, sino son consideradas en el mismo, las fronteras son los límites del equipo.

INTERFACES: las interfaces son las uniones o los medios por donde el equipo que es objeto de estudio está unido a sus fronteras.

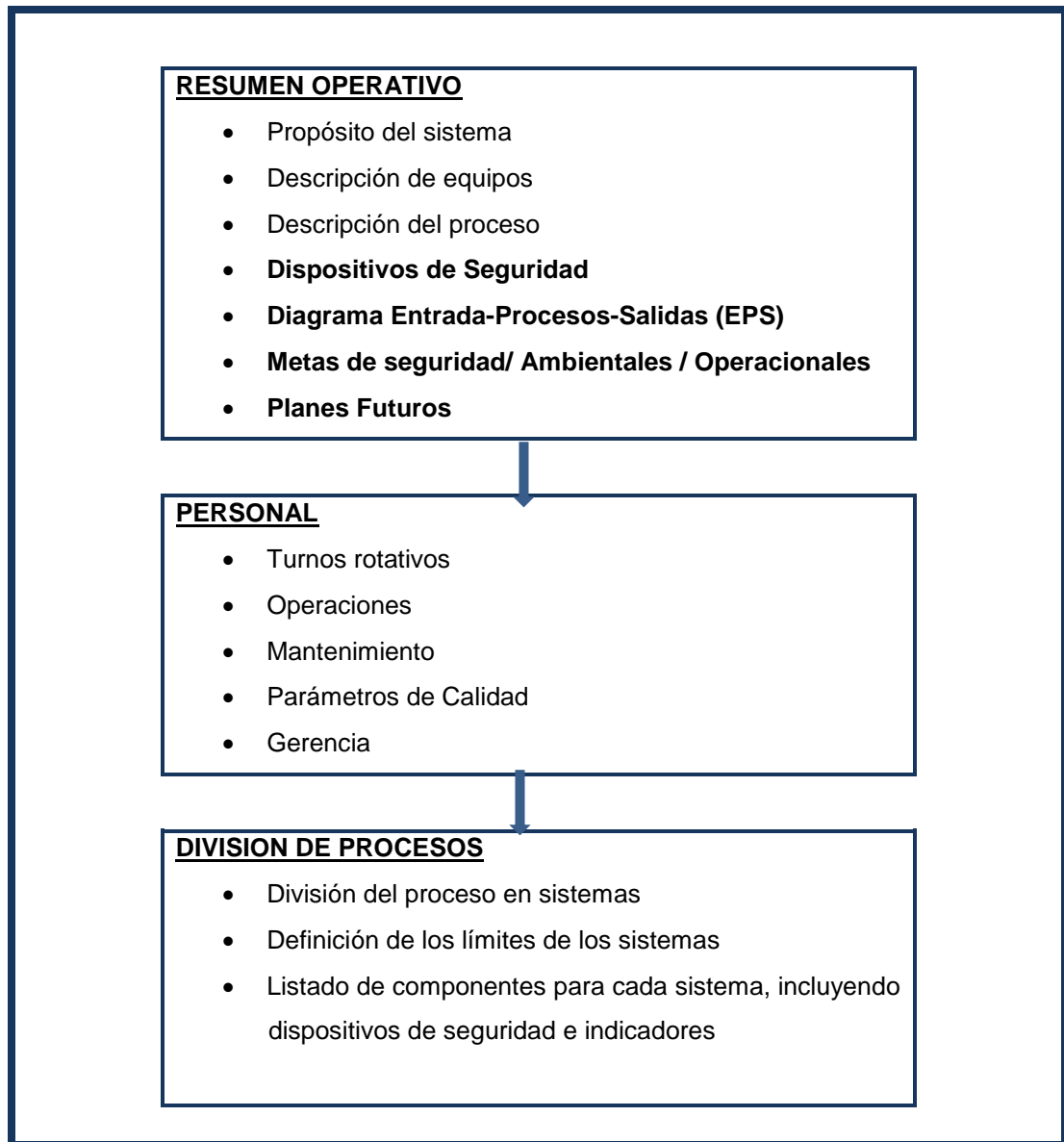
CARACTERÍSTICAS: son las características técnicas del equipo.

CONDICIONES OPERATIVAS: es la condición de operación del equipo, si es continuo, intermitente o debe trabajar en una frecuencia en particular, etc.

CONDICIONES AMBIENTALES: son las condiciones ambientales a las que está expuesto el equipo, polvo, ambientes corrosivos, etc.

La metodología propuesta para la definición del contexto operacional, es la siguiente:

Figura 36. Definición de Contexto Operacional



Fuente. Los Autores.

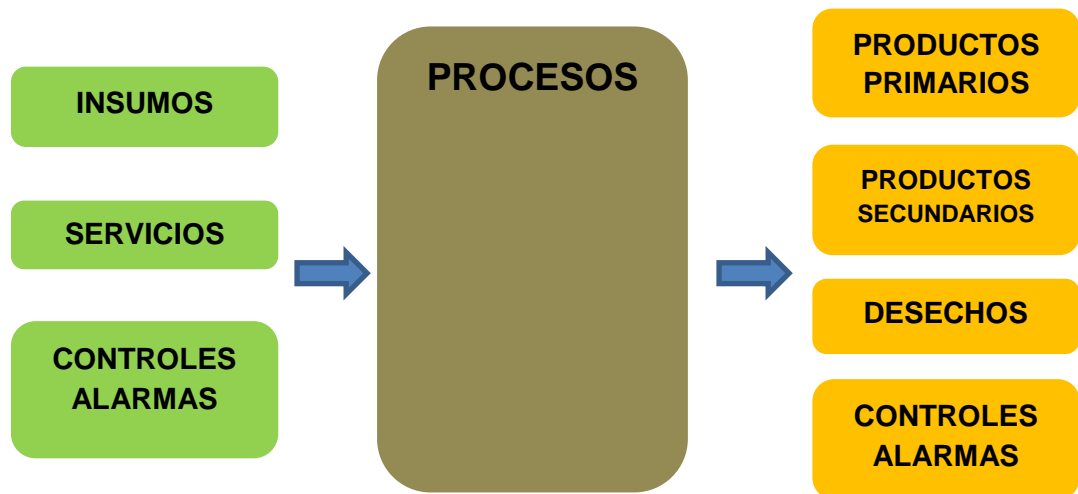
La Información a ser recopilada para el desarrollo del contexto operacional:

- Perfil de operación
- Ambiente de operación
- Calidad/disponibilidad de los insumos requeridos (combustible, aire, etc.)

- Alarmas, monitoreo de primera línea.
- Políticas de repuestos, recursos y logística.
- P&ID's del sistema.
- Esquemáticos del sistema y/o diagramas de bloque. Normalmente están desarrollados a partir de los P&ID's.
- Manuales de diseño y operación de los sistemas. Estos proveerán información de la función esperada de los sistemas, como se relacionan con otros sistemas y que límites operacionales y reglas básicas son utilizadas.

5.3.1 Diagrama Entrada-Procesos-Salidas. Es una herramienta grafica que facilita la visualización del contexto operacional global es el diagrama Entrada-Proceso-Salida, el cual puede ser sintetizado y representado como la figura 37.

Figura 37. Diagrama Entrada-Procesos-Salidas



Fuente. Los Autores

A continuación se detallan los factores más importantes del diagrama EPS:

- Inputs (entradas): están divididos en tres clases:
 - Materia Prima: recursos tomados directamente por el proceso (sistema/equipo) para transformarlos o convertirlos (gas, crudo, madera).
 - Servicios: recursos utilizados por el proceso (sistema/equipo), necesarios para la transformación de la materia prima (electricidad, agua, vapor).
 - Controles: estos constituyen un tipo especial de inputs, referidos a los sistemas de control y sus efectos sobre los equipos o procesos pertenecientes al área en cuestión. Este tipo de inputs, generalmente no necesitan ser registrados como una función separada ya que su falla siempre está asociada a una pérdida de output en alguna parte del proceso.
- Outputs (salidas): los outputs de un área van a estar asociadas a las funciones inherentes a cada sistema, equipo o parte (dependiendo del nivel de detalle seleccionado en el paso anterior).

Los outputs pueden ser clasificados en cinco tipos de funciones:

- Productos primarios: estos constituyen los principales propósitos del sistema/equipo/parte (dependiendo del nivel de detalle), es decir su razón de existencia. Los productos primarios son generalmente especificados por la tasa de producción y los estándares de calidad aplicados a los outputs.
- Productos secundarios: estos productos se derivan de funciones principales que cumple el sistema/equipo/parte dentro del proceso, la pérdida de los productos secundarios puede causar, en la mayoría de los casos la pérdida de las funciones primarias y sus consecuencias pueden ser catastróficas.

- Funciones de protección: son un especial grupo de funciones las cuales protegen tanto al personal como a los procesos.
- Funciones de control: es realizada por equipos de control especial y su objetivo básico es prevenir las posibles fallas que puedan ocurrir en el proceso a partir del control de variables específicas.
- Los procesos: estos deben ser registrados como una descripción de una función a ejecutar por el sistema/equipo (dependiendo del nivel de detalle seleccionado) en un lugar específico, con el fin de concentrar los esfuerzos de mantenimiento sobre la función que este siendo analizada (que actividades de mantenimiento deben ejecutarse para que el activo cumpla la función dentro del contexto operacional).

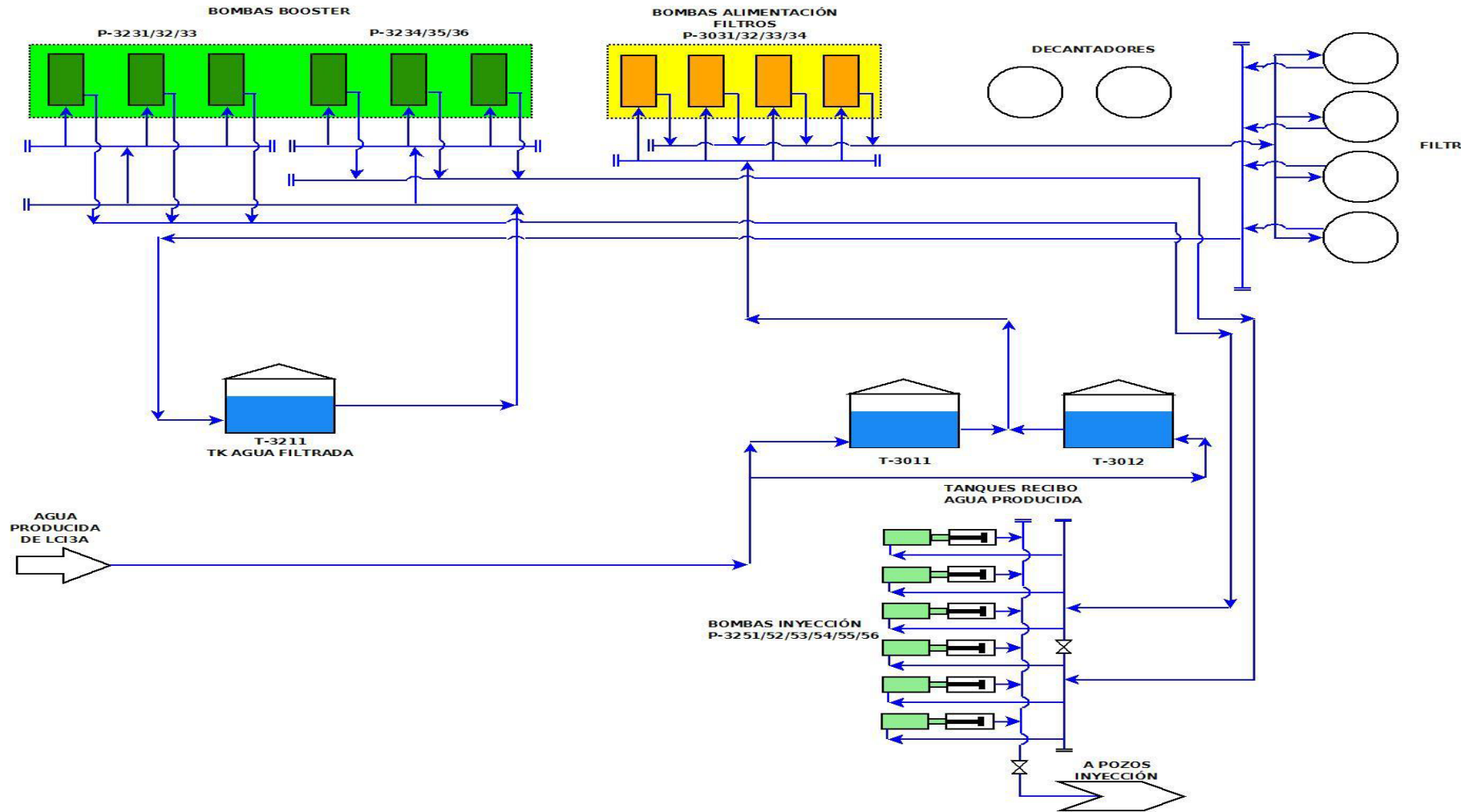
5.4 CONTEXTO OPERACIONAL DETALLADO DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE AGUA EN LA PIA 3

5.4.1. Propósito. El propósito general de la planta de inyección de agua 3 (PIA 3) es filtrar el agua recibida de la estación de recolección LCI¹⁹ 3A (Agua de producción, proveniente de la separación del crudo extraído de pozos), a unas condiciones tal que posteriormente pueda ser inyectada a la formación del campo (pozos inyectores), de tal manera que no se afecte la misma por corrosión de la tubería, o medios que propicien el cultivo de bacterias por presencia de oxígeno.

5.4.2 Descripción general del sistema. La siguiente figura muestra el esquema general del proceso en la PIA 3.

¹⁹ LCI: Se refiere a La Cira Infantas, por sus iniciales.

Figura 38. Esquema general proceso Planta de inyección PIA 3



Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3. ECOPETROL.

5.4.2.1 Tanques de recibo de agua de producción K-3011/3012. El proceso inicia con el recibo del agua de producción en los tanques K-3011/K-3012 con una capacidad de 8.550 Barriles cada uno.

Figura 39. Tanques K-3011 y K-3012, recibo de agua de producción.



Fuente. Los Autores

El agua producida que se envía a la planta de inyección PIA-3 ha sido previamente tratada en la estación LCI-3ª en las unidades de flotación S-3621/ 22/ 23. Esta agua sale de dichas unidades con un contenido de grasas y aceites del orden de los 10-40 ppm y 15-50 ppm de sólidos.

Desde la estación LCI-3ª, se transfiere, mediante las bombas P-3631/32/33/34 y/o las P-3650/51/52, un total de 120.000 Barriles de agua por día hacia la PIA-3 por medio de una línea de 16”.

La troncal de 16”-PW-3623-01-A1 proveniente de la estación LCI-3ª, una vez entra a la facilidad de PIA-3, se ramifica en dos líneas de 16” (16”-PW-3623-02-A1 y la 16”-PW-3011-01-A1) para alimentar a cada uno de los tanques de recibo de agua de producción. Esta línea cuenta con un sistema de medición (FIT-30111) un

transmisor de presión (PIT-30111) y facilidades para inyección de química y monitoreo de corrosión mediante cupones.

Los tanques de recibo de agua producida, son tanques de techo fijo (cónico) con un diámetro de 44' y una altura total de 30'; cada tanque posee una capacidad nominal de 8500 BBL y se encuentran diseñados para operar a presión atmosférica fabricados bajo norma API 650. Allí se almacena y permite dar cabeza de succión a las bombas P-3031/32/33/34 (centrifugas) que alimentan los filtros.

Los tanques están protegidos por muy alto nivel mediante la válvula SDV-30111 la que al cerrar para la entrada de fluido a los mismos.

Figura 40. Válvula SDV-3011 PIA-3.



Fuente. Los Autores.

- Los tanques de recibo de agua producida operan normalmente con un nivel de 18-17 pies. Entre el nivel normal y el alto-alto hay unos 11-12 pies. Para ratas de flujo entre 100.000 y 120.000 BPD se tiene entre 45 minutos y 37 minutos respectivamente para llegar al nivel alto-alto por cada tanque. Como operan gravitados, se tendría entre 1,5 y 1,25 horas.

- En caso de muy alto nivel en el tanque, LIT-30111/121 y los switches de alto nivel LSHH-3011/121 cierran la SDV-30111 y se apagan las bombas de transferencia en LCI-3-A por acción de los switches de alta presión en la descarga de las mismas, interrumpiendo el paso de líquido hacia los tanques.

Las causas de un alto nivel pueden ser ocasionadas por:

- Falla eléctrica en la planta que genere una parada de las bombas P-3031/32/33/34 sin que en la estación LCI-3-A se hayan apagado las bombas de transferencia de agua. Por lo que le continúa entrando fluido a la misma rata al tanque, sin tener salida hacia filtros. El monitoreo continuo del nivel de los tanques le permitiría al operador, con los dos tanques en operación, seguir llenando tanques en forma controlada hasta antes de alcanzar el nivel alto-alto.
- Problemas en los filtros que requieran la parada de bombas de alimentación de filtros P-3031/32/33/34. Esto ocasiona que los tanques tengan que acumular líquido mientras se resuelve el problema de los filtros.
- Daño de bombas de alimentación a filtros.
- En caso de problemas de nivel en tanques ya sea por problemas de filtros o de bombas, se debe coordinar con la estación LCI-3-A para que disminuyan la transferencia hacia la PIA mientras se resuelven los problemas o dejar que el nivel llegue hasta lo máximo y la SDV cierre. De todas formas el operador debe estar monitoreando que si se alcanza el nivel alto- alto la SDV si cierre.

5.4.2.2 Bombas de alimentación a filtros P-3031/32/33/34. Seguidamente, a través de 4 bombas centrifugas, P-3031/32/33/34 las cuales bombean el agua a los filtros (una bomba para cada filtro).

Para el sistema de bombeo de agua a filtros se usan cuatro bombas centrifugas en paralelo. Las bombas de alimentación a filtros, P-3031/32/33/34, de la planta PIA-3 son bombas Goulds modelo 3196 Mti 4 x 6-13 con una capacidad de 40000 BPD (1167 GPM) a una presión de 53,8 psi. El impulsor utilizado es abierto de 12.375". Están acopladas aun motor de 60 HP a 1780 RPM operado con arrancador suave. El arranque de las bombas en condición normal es manual. Succionan de los tanques K-3011/12 mediante el cabezal 18"–PW-3011-05-A1.

Estas bombas mantienen un flujo de agua uniforme a través de la línea de descarga. En caso de bajo nivel de agua en cualquiera de los tanques T-3011/3012 estas bombas se apaguen automáticamente

Las bombas están conectadas en paralelo al cabezal general de succión lo que le permite al sistema utilizar las bombas en forma alternada para mantener y satisfacer siempre las necesidades de bombeo. Cada bomba succiona el agua, del cabezal de 18" proveniente de los tanques de almacenamiento, a través de una línea de 12".

En la succión de las bombas se tiene un filtro tipo Y, el cual limpia el agua de posibles partículas abrasivas que pueden ocasionar deterioros en la bomba. El correcto funcionamiento del filtro se analiza mediante un indicador de presión diferencial (PDIT). Posteriormente se tiene un switch de bajo flujo (FSL), que envía una señal para activar la alarma y apagar automáticamente la bomba, ante bajo flujo en la succión de la misma.

Las bombas se apagan por muy bajo nivel de los tanques K-3011/12, por muy bajo flujo, por muy alta presión diferencial en la bomba o por muy alto nivel en el tanque K-3211.

En la succión de cada bomba hay un filtro tipo (PDIT-30312/30322/30332/30342) para retener partículas sólidas y un interruptor de flujo mínimo que apaga la bomba si el caudal hacia ella es muy bajo.

Figura 41. Bombas P-3031/32/33/34 carga a filtros cascara de nuez.



Fuente. Los Autores.

La instrumentación asociada al sistema de bombeo se menciona en la siguiente tabla.

Tabla 4. Instrumentación asociada a las bombas P-3031/32/33/34.

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
FSL-30311/321/331/341	Switche de bajo flujo	0 GPM	Alarma de bajo flujo, para bombas por bajo flujo.
PDIT-30312/322/332/342	Indicador de presión diferencial	H: 2.5 psi HH: 3 psi	Indica el diferencial de presión en el filtro "Y" de succión de las bombas. Da alarma de alta y alta-alta
PI-30311/321/331/341 PI-30313/322/332/342	Indicador local de presión	N/A	Indica la presión en las líneas de succión y descarga de la bomba
PDIT-30311/321/331/341	Alta presión diferencial en bombas	75 psig	Protegen las bombas de alta diferencial de presión. Paron bombas en caso alta diferencial
PIT-30311	Alta presión cabezal descarga en bombas	HH: 80 psi H: 75 psi L: 40 psi LL: 35 psi	Da alarma de alta y baja presión en cabezal descarga bombas.

Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3

De las bombas de carga P-3031/32/33/34, se envía el agua almacenada los tanques K-3011/3012, a los filtros de cascara de nuez (4 filtros de 40.000 Barriles de capacidad cada uno), F-3071/72/73/74.

5.4.2.3 Filtros de cascara de nuez F-3071/72/73/74. El sistema de filtración está conformado por 4 filtros de cáscara de nuez de alta eficiencia, cuyo objetivo es retirar mediante filtración las partículas de aceite y sólidos suspendidos en el agua. Son equipos de flujo hacia abajo diseñados para la filtración de agua de producción.

Figura 42. Filtros cascara de nuez F-3071/72/73/74.

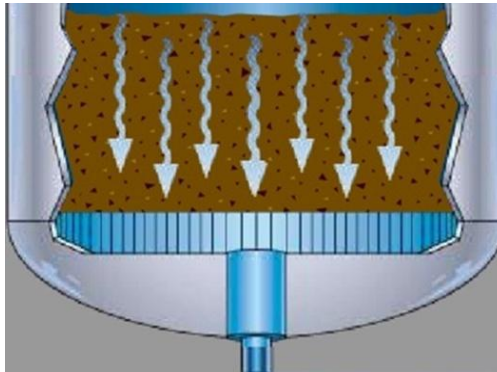


Fuente. Los Autores.

La capacidad de cada filtro es de 40.000 BWPD. El criterio de diseño de los mismos es la remoción de partículas de diámetros iguales o superiores a 5 micrones que se encuentren en el agua producida a temperaturas de entre 70 y 150 F, con presiones de operación de entre 35 y 60 psig, con un contenido máximo de crudo de 30 ppm y de sólidos de máximo 90 ppm. Para las condiciones anteriores, se espera reducir el contenido de crudo y de sólidos suspendidos a 2 ppm. La presión máxima de operación es de 60psig. La caída de presión del paquete es de entre 20 y 25 psi de los cuales 15 a 20 psi corresponden a la caída de presión en el filtro.

El medio filtrante es cáscara de nuez 12 x 20, pretratada de acuerdo a la especificación de Hidromation, dispersa en el lecho de filtración de profundidad 46 pulgadas. Cada unidad tiene un área de filtración de 78.54 ft² y un volumen de media filtrante de 301 ft³.

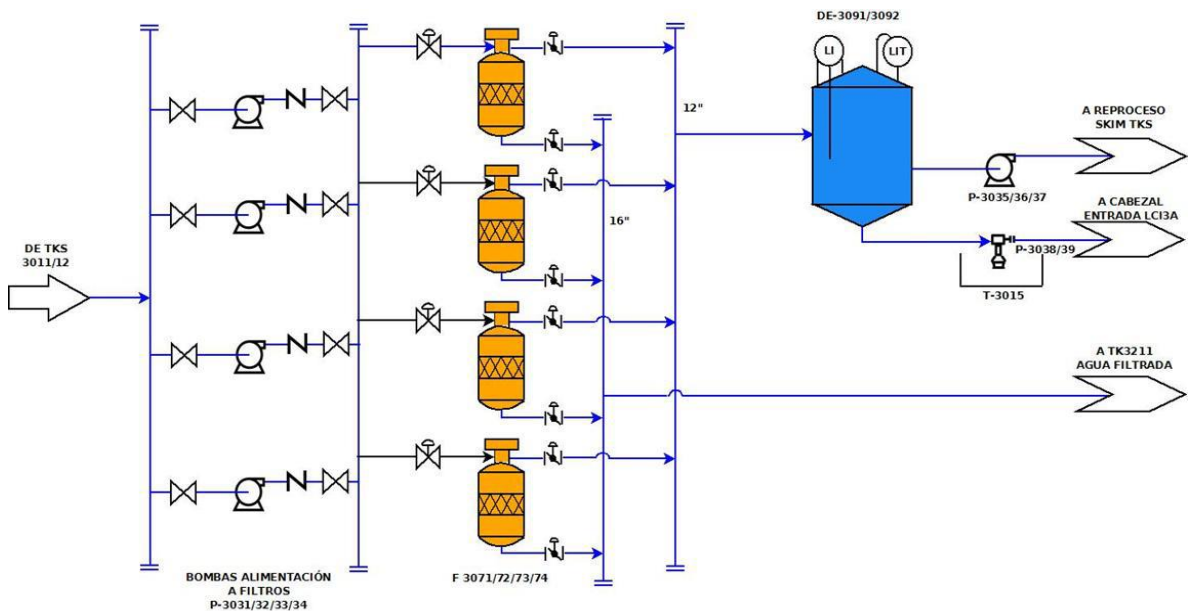
Figura 43. Filtro interno cascara de nuez.



Fuente. Manual de Operación Planta de Inyección de Agua. PIA 3. La Cira Infantas. ECOPETROL S.A

En la siguiente figura (figura 44) se puede ver el esquema del sistema funcional en PIA 3.

Figura 44. Esquema del sistema de filtración PIA 3.



Fuente. Manual de Operación Planta de Inyección de Agua. PIA 3. La Cira Infantas. ECOPETROL S.A.

La instrumentación asociada a los filtros es la que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5. Instrumentación asociada al sistema de filtración.

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
FCV-30716/26/36/46	Válvula control flujo entrada a filtros	40.000 BPD	Controla flujo basado en señal del medidor FT30716
FT-30716	Medidor flujo entrada a filtros	40.000 BPD	Indica el flujo de entrada a cada filtro
PI-30713/23/33/43 PI-30714/24/34/44	Indicador local de presión	N/A	Indica la presión en las líneas de entrada de aire y entrada a filtros
PSV-30711/21/31/41	Válvula de alivio de presión 4P6	90 psig	Protege el vessel del filtro por exceso de presión
PDIT-30711/21/31/41	Indicador de presión diferencial en filtro	HH: 20 psi H: 17 psi	Indica la presión diferencial en el filtro y da alarma
SDV-30712/22/32/42	Válvula on-off para enviar agua retrolavado a decantadores	N/A	Abre para enviar agua decantadores durante ciclo retrolavado
SDV-30711/21/31/41	Válvula on-off despresurización	N/A	Se abre para despresurizar sistema
SDV-30715/25/35/45	Válvula on-off descarga filtros agua recirculación a tanques	N/A	Se abra para permitir recircular de filtros a tanques K-3011/12.
SDV-30714/24/34/44	Válvula on-off salida agua filtrada hacia tanque agua filtrada	N/A	Permite paso de agua filtrada a tanque K-3211 desde filtros
SDV-30713/23/33/43	Válvula on-off by-pass agua producida hacia tanques K-3011/3012.	N/A	Permite recirculación de filtros a tanques de agua producida.

Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3.

Posteriormente, de los filtros, el agua filtrada pasa al tanque K-3211 (tanque de agua filtrada) de 16.500 Barriles de capacidad.

5.4.2.4 Tanque de Agua Filtrada K-3211. El tanque de almacenamiento de agua filtrada, es un tanque de techo fijo (cónico) con un diámetro de 70' y una altura total de 24'. El tanque posee una capacidad nominal de 16500 BBL y se encuentra diseñado para operar a presión atmosférica fabricados bajo norma API 650. Allí se almacena y permite dar cabeza de succión a las bombas P-3231/32/33/34/35/36 (centrifugas) boosters que alimentan las bombas de inyección

El tanque de agua filtrada K-3211 sirve de amortiguador o acumulador (capacitancia) y por lo tanto permite la operación continua del sistema de inyección aun cuando haya algunas pequeñas variaciones en el suministro desde los filtros.

Figura 45. Tanque K-3211 de Agua Filtrada.



Fuente. Los Autores.

- Este tanque proveen de cabeza a las bombas de refuerzo o boosters P-3231/32/33 y P-3234/35/36.
- El agua filtrada almacenada en el tanque K-3211 es transportada a la succión de las bombas de refuerzo P-3234 a P-3236 por medio del cabezal 16"-PW-3211-03 A1.

En el cuerpo del tanque existe:

- Un indicador visual de nivel tipo regleta, LI-32111, se cuenta además con un transmisor e indicador de nivel tipo MTS, LIT-32111. Este transmisor da alarmas de alto y alto-alto.
- Switch de alto-alto LSHH 32111 y bajo-bajo LSSL-32111. La parada de las bombas de alimentación de agua a filtros así está programada con el LSHH. La parada de las bombas boosters y de inyección por medio del switch de baja presión LSSL-32111.
- Una (1) escotilla de inspección de 8"
- Un venteo de emergencia de 20" (PSE-32111) que está calibrado a 2.7" H₂O y a -1" H₂O en condiciones de vacío.
- Dos cuello de ganso de 10" para el alivio de presión/ vacío.

El tanque de almacenamiento posee las siguientes entradas y salidas:

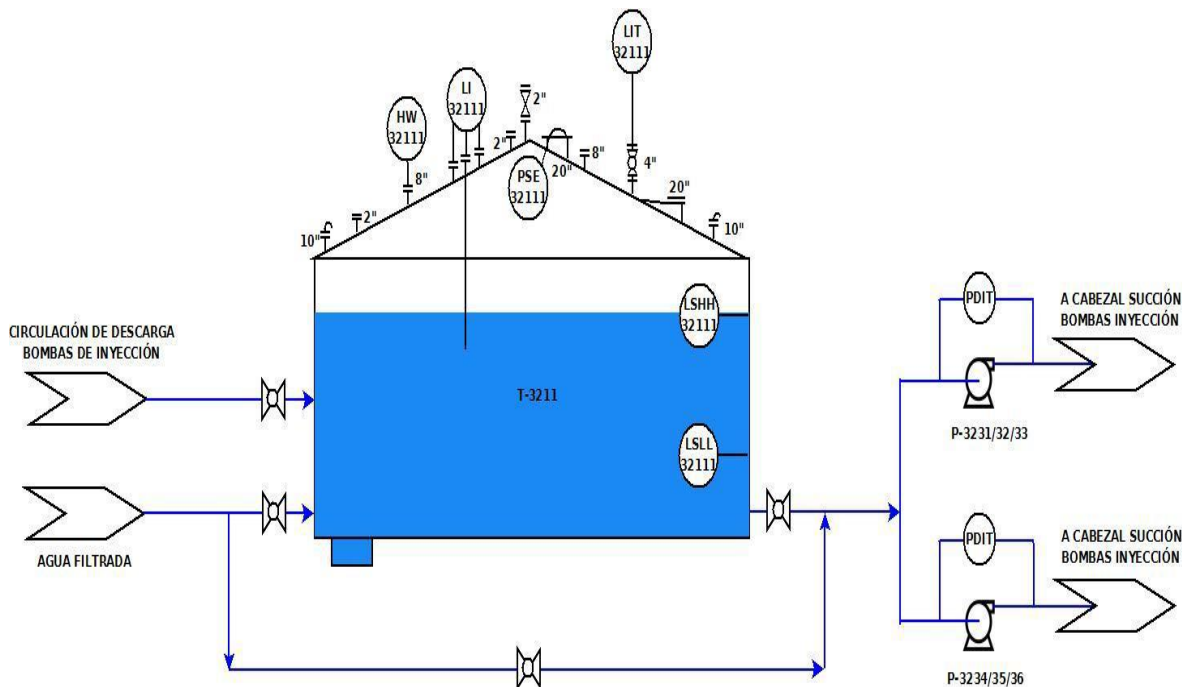
- Una línea de 16" proveniente de descarga de filtros.
- Una línea de 10" proveniente de agua de recirculación de bombas de inyección y boosters.
- Una línea de drenaje de 4", la cual descarga al sistema de drenajes cerrados de la planta.
- Una línea de 18" que va a los cabezales de succión de las bombas P-3231/32/33 y P-3234/35/36
- Manhole de 24" en cuerpo y 20" en techo
- Tres Conexiones de 2" y una de 8" spare en techo y una de 2" y otra de 6" en el cuerpo.

El tanque de recibo de agua filtrada cuenta con dos sistemas de protección de sobre nivel. El primero, se configura a través de los transmisores de nivel de tipo

MTS, LIT-32111, localizado en el techo del tanque, que registra el nivel continuamente y en el que se configuran alarmas de supervisión. El segundo nivel de protección, se asocia a la acción de interruptores externos de nivel que se activan en caso de muy alto o muy bajo nivel LSHH-32111 y LSL-32111.

- El aislamiento del tanque se efectúa el LIT para que en caso de muy alto nivel en el tanque (23') se paren las bombas de alimentación a filtros. Esta acción es respaldada por el interruptor de muy alto nivel, LSHH-32111. Los LIT, LSHH y LSL reportan al PLC de ESD (a través de la RTU2) el cual envía la información al HMI del Cuarto de control y Scada Iconics.

Figura 46. Tanque Almacenamiento Agua Filtrada Y Bombas Booster



Fuente. Instructivo Operacional Tanques K-3011/3012 y K-3211.

En el caso de que el agua en los tanques baje a niveles del orden de 6´, se realiza la parada de las bombas que se encuentren en operación a través del transmisor de nivel (LIT-32111) con apoyo del interruptor de muy bajo nivel LSSL-32-111 (en caso de falla del transmisor).

La instrumentación asociada al tanque de almacenamiento de agua filtrada K-3211 es la mencionada en la Tabla.

Tabla 6. Instrumentación asociada al tanque K-3211

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
LI-32111	Indicador local de nivel de tipo regleta	N/A	Indicador local de nivel de agua en el tanque
LIT-32111	Transmisor /indicador de nivel total	HH: 23´ H: 22´ L: 9´ LL: 6´	Alarma general por muy alto nivel total, o bajo nivel. Parada bombas alimentación a filtros por alto-alto nivel. Parada bombas booster por bajo-bajo nivel
LSHH-32111	Interruptor de muy alto nivel	23´	Alarma por muy alto nivel de agua producida. Parada de bombas de alimentación a filtros.
LSSL-32111	Interruptor de muy bajo nivel	6´	La señal simultanea de todos los tanques apaga las bombas de agua booster.
PSE-32111	Tapa emergencia	+2,7 WC -1 WC	Abre en caso de alta presión o vacío en tanque.

Fuente. Instructivo de Operación tanques K-3011/3012 y K-3211.

5.4.2.5 Bombas reforzadoras P-3231/32/33/34/35/36 sistema de agua de inyección. Del tanque de agua filtrada, K-3211, se bombea el agua filtrada a través de las bombas boosters P-3231/32/33 y P3234/35/36, estas bombas son

las reforzadoras que envíen el flujo a las bombas principales de inyección de agua.

El sistema de bombas de refuerzo está compuesto por 6 bombas centrífugas las cuales toman succión del tanques K-3211. La figura 7 muestra los cabezales existentes para la alimentación de las bombas P-3231/32/33 y las P-3234/35/36.

El sistema está diseñado para que operen dos unidades P-3231/32 y dos unidades P-3234/35, manteniendo en cada cabezal una bomba de stand by. Con las 4 bombas operativas se debe suministrar un total de 100.000 BWPD.

Figura 47. Bombas reforzadoras (booster) P-3231/32/33/34/35/36.



Fuente. Los Autores.

5.4.2.6 Bombas de refuerzo P-3231 a P-3233. Son Bombas Centrifugas marca Goulds modelo 3196 4 x 6 x 13 con un impulsor abierto de 10.375". Su capacidad es de 20.000 BPD (583 GPM). A 108' de cabeza, acopladas a motor eléctrico de 40HP x 1780.

El agua filtrada almacenada en el tanque K-3211 es transportada a la succión de las bombas de refuerzo P-3231 a P-3233 por medio del cabezal 16"-PW-3211-02 A1.

La descarga de las bombas P-3231 a P-3233 alimenta la succión de las bombas de inyección P-3251 a P-3253 mediante el cabezal de descarga 16"-PW-3231-03-A1 el cual se conecta al cabezal de succión de dichas bombas.

Las Bombas de refuerzo están diseñadas para que continuamente operen 2 y una bomba se mantenga como back up. El flujo total que puede ser transferido a las 2 bombas de inyección en operación es de 40.000 BWPD.

El arranque de las bombas es manual.

Se instala por bomba una línea de recirculación de 4" con una válvula globo de 3" con la cual se crea contrapresión mientras manualmente se recircula hacia tanques.

Las Bombas de refuerzo están diseñadas para que continuamente operen 2 y una bomba se mantenga como back up. El flujo total que puede ser transferido a las 2 bombas de inyección en operación es de 40.000 BWPD.

Las bombas de refuerzo P-3231 a P-3233 están protegidas mediante

- Los switches de bajo-bajo nivel del tanque K-3211.
- Los transmisores PDIT -32312/22/32 en el filtro de la succión de las bombas que las protegen del llegada de mugre a la succión de la bomba.
- Los PDIT-32311/21/31 entre succión y descarga de la bomba.
- Los FSL-32311/321/331 en la succión por no flujo

El arranque de la bomba de agua booster es manual (EL OPERADOR debe alinear el respectivo tren), ya que se debe verificar siempre la alineación de las válvulas en la succión y descarga de las bombas antes de dar arranque.

En el caso de que el agua en los tanques baje a niveles del orden de 6', se realiza la parada de las bombas que se encuentren en operación a través del transmisor de nivel (LIT-32111) con apoyo del interruptor de muy bajo nivel LSSL-32-111 (en caso de falla del transmisor).

La instrumentación asociada a estas bombas, es la que se muestra en la tabla

Tabla 7. Instrumentación asociada a bombas booster P-3231/32/33.

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
FSL-32311/21/31	Switche de bajo flujo	0 GPM	Alarma de bajo flujo. Para bombas por bajo flujo.
PDIT-32311/22/32	Indicador de presión diferencial	HH: 5 psi	Indica el diferencial de presión en el filtro "Y" de succión de las bombas. Da alarma de alta y alta-alta
PI-32311/21/31 PI-32312/22/32	Indicador local de presión	N/A	Indica la presión en las líneas de succión y descarga de las bombas.
PDIT-32311/21/31	Alta presión diferencial en bombas	50 psig	Protegen las bombas de alta diferencial de presión. Parar bombas en caso alta diferencial.

Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3.

5.4.2.7 Bombas de refuerzo P-3234 a P-3236. Son Bombas Centrifugas marca Goulds modelo 3196 4 x 6 x 13 con impulsor abierto de 10.875". Su capacidad es

de 30.000 BPD (875 GPM). A 108' de cabeza, acopladas a motor eléctrico de 40HP x 1780 RPM.

El agua filtrada almacenada en el tanque K-3211 es transportada a la succión de las bombas de refuerzo P-3234 a P-3236 por medio del cabezal 16"-PW-3211-03 A1.

La descarga de las bombas P-3234 a P-3236 alimenta la succión de las bombas de inyección P-3254 a P-3256 mediante el cabezal de descarga 16"-PW-3234-03-A1 el cual se conecta al cabezal de succión de dichas bombas.

El arranque de las bombas es manual. Se instala por bomba una línea de recirculación de 4" con una válvula globo de 3" con la cual se crea contrapresión mientras manualmente se recircula hacia tanques.

Las Bombas de refuerzo están diseñadas para que continuamente operen 2 y una bomba se mantenga como back up. El flujo total que puede ser transferido a las 2 bombas de inyección en operación es de 60.000 BWPD.

Las bombas de refuerzo P-3234 a P-3236 están protegidas mediante:

- Los switches de bajo-bajo nivel del tanque K-3211.
- Los transmisores PDIT -32342/52/62 en el filtro de la succión de las bombas que las protegen del llegado de mugre a la succión de la bomba.
- Los PDIT-32341/51/61 entre succión y descarga de la bomba.
- Los FSL-32341/351/361 en la succión por no flujo

La instrumentación asociada al sistema de bombeo de las P-3234/35/36, es la que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8. Instrumentación asociada a las bombas P-3234/35/36.

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
FSL-32341/51/61	Switche de bajo flujo	0 GPM	Alarma de bajo flujo. Para bombas por bajo flujo.
PDIT-32342/52/62	Indicador de presión diferencial	HH: 5 psi	Indica el diferencial de presión en el filtro "Y" de succión de las bombas. Da alarma de alta y alta-alta
PI-32341/51/61 PI-32342/52/62	Indicador local de presión	N/A	Indica la presión en las líneas de succión y descarga de las bombas.
PDIT-32341/51/61	Alta presión diferencial en bombas	56.5 psig	Protegen las bombas de alta diferencial de presión. Paron bombas en caso alta diferencial.

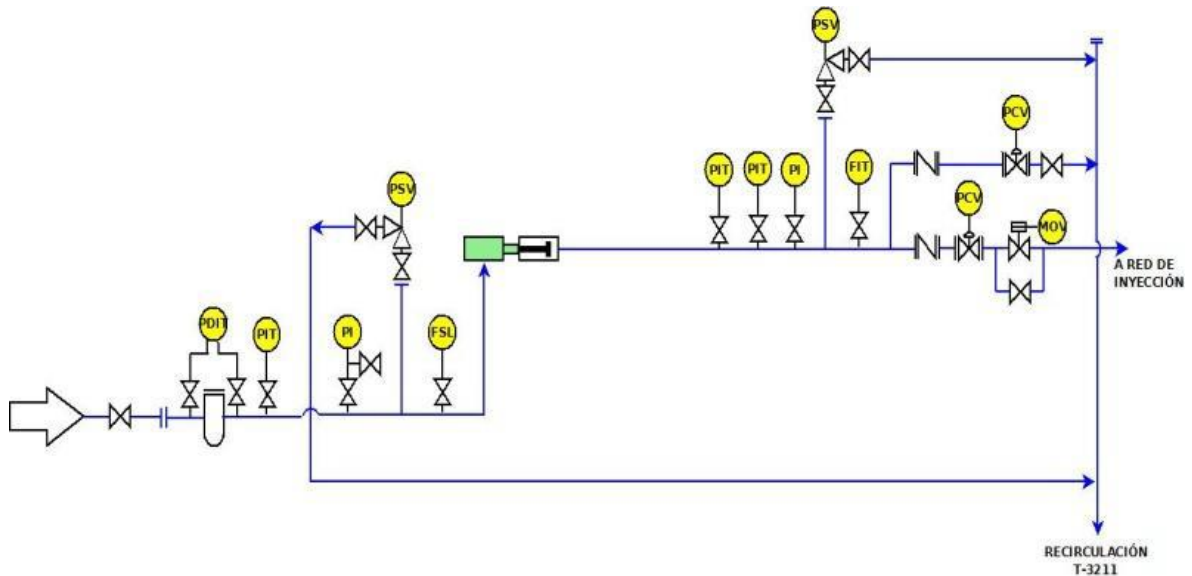
Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3.

5.4.3 Sistema de Inyección- Bombas principales de inyección de agua P-3251/52/53/54/55/56. El sistema de inyección de alta presión está compuesto por 6 bombas Centrifugas multietapas tipo BHT. Centrillift. Tres son de 20.000 BPD de capacidad y 3 de 30.000 BPD.

Los sistemas de protección utilizados para las bombas constan en principio de protecciones en succión (flujo y presión) y descarga (flujo, presión) para aumentos de presión u operación a flujos menores al mínimo recomendado. Igualmente por:

- Alta vibración en la bomba
- Alta temperatura de la bomba
- Bajos niveles de aceite en la cámara de empuje
- Alta presión de descarga de bomba lubricación.

Figura 48. Diagrama General Instrumentación Bombas Inyección PIA3.



Fuente. Procedimiento maestro para el arranque inicial de la planta de inyección PIA-3 operación y entrega del sistema del variador velocidad de la planta de inyección PIA-3

El sistema de control planteado está dado por:

- Una válvula de control de presión PCV ubicada en la descarga de las bombas.
- Una válvula de control de presión que determina el flujo mínimo en la curva de la bomba, la cual es utilizada para la recirculación del flujo o caudal tanto en el arranque como en la operación.

Las PCVs están controladas por el PLC (a través de la RTU-1) que a su vez recibe la señal de presión y flujo que son medidas y transmitidas en la descarga de las bombas por el PIT y FIT correspondientes.

El motor de las bombas de 20.000 BPD de capacidad está controlado por un VFD marca Rockwell y las bombas de 30.000 BPD por un arrancador suave tipo Benshaw.

Las bombas principales de inyección P-3251/52/53/54/55/56, reciben el flujo de las bombas reforzadoras (booster) P-3231/32/33/34/35/36.

El anillo de inyección requiere una presión entre 1920-1950 psig, para ser distribuido a los diferentes pozos inyectoros que se encuentran localizados en el campo Cira Este, este control de presión se logra a través de válvulas de control de flujo (FCV's) y de control de presión (PCV's), las cuales son accionadas neumáticamente y se encuentran ubicadas a la descarga de cada una de las bombas.

5.4.3.1 Bombas de Inyección Centrilift (P-3251/52/53). Son bombas Centrífugas multietapas Serie 862WIJ700A con un total de 34 etapas acopladas a un motor Siemens de 1.250 HP/3.600 RPM, 3 PH/60HZ/4.160 V. La capacidad de las bombas es de 25.000 BWPD con una cabeza de 2000 psi. La curva de operación de esta bomba se muestra en la Figura 20. De acuerdo a esta, su ventana de operación está entre 15 y 27.5 KBPD por bomba (presiones descarga entre 1800 Y 2000 psig). BEP alrededor de 22500 BPD y por lo tanto la ventana está entre el 67 y el 122% con relación al BEP con frecuencias hasta de 60 Hz. Alrededor de los 58 HZ puede operar en el rango de presión muy cerca al BEP.

Cada bomba cuenta con las siguientes protecciones:

Succión:

- Una PSV por cada bomba (PSV-32512/522/532) calibrada a 220 psi.
- PDIT-32511/21/31 para el strainer de succión
- Un Transmisor de presión PIT-32510/20/30.
- Un switch de bajo flujo por cada bomba seteado a 0 BPD (FSL-32511/21/31)
- Un indicador de presión local PI-32511/21/31.

Figura 49. Bomba Centrifuga Inyección de Agua – PIA3.



Fuente. Los Autores.

Adicionalmente el cabezal de succión común tiene un PIT-32502.

Asociado a la bomba/motor:

- LSLL32411/421/431 de bajo nivel de lubricación
- Un PIT-32411/421/431 de baja presión descarga bomba lubricación
- RTD 32510/20/30 de alta temperatura de aceite (en cámara de empuje)
- Un switch de vibración de cámara de empuje (ver plano de la bomba suministrada por Centrilift que indica que hay uno y no se ve en el P&ID)
- Un Transmisor de Vibración de la Cámara de empuje VT-32511/521/531
- Dos transmisores de vibración de la bomba (ver plano de bomba suministrado por Centrilift indica que hay dos y no se ven en el P&ID)
- 8 RTDs del motor RTD-351Y/52Y/53Y (Estas RTDs se encuentran conectadas y configuradas a los Variadores Allen-Bradley, y desde las señales entregadas por estas RTDs, se ejecuta la parada de la bomba en el caso de requerirse).

- Transmisor Temperatura rodamiento del motor (verificar plano del motor porque normalmente lo trae)

En la descarga están protegidas por:

- Dos PIT por cada bomba (PIT-32511/512, PIT- 32521/522, PIT-32531/532).
- Una válvula de alivio de alta presión (PSV-32511,/521/531) calibrada a 2270 psig,
- Un transmisor de flujo por bomba (FIT-32511/521/531).
- Válvulas de recirculación (PCV-32512/522/532) para aliviar presiones hacia el cabezal de 10" que va al tanque K-3211.
- Válvulas de control presión descarga (PCV-32511/521/531).
- y una válvula on –off motorizada MOV-32511/521/531 en la descarga por bomba.
- En el cabezal común de descarga de las 6 bombas hay un PIT- 32563 , un medidor de agua a recirculación FIT-32112 y un medidor de flujo hacia pozos FIT-32111

El cabezal común de recolección de disparo de válvulas de seguridad de succión, descarga y válvulas de recirculación es de 10" y este descarga al tanque K-3211. Toda la instrumentación asociada a las bombas se reporta al PLC de Proceso o al de ESD de la planta de acuerdo a su acción respectiva de control o protección y es monitoreada a través de la RTU1 desde el HMI del cuarto de control y Scada Iconics.

Los motores cuentan con ocho protecciones por alta temperatura en el devanado y en la jaula, que se disparan luego de que la señal se sostenga por 2 segundos:

- Para el devanado se cuenta con alarma cuando la temperatura llega a 155C y con señal de trip (shutdown) cuando la temperatura a 170C (para la serie de Clase F).
- Para la zona de los sleeve, se cuenta con alarma cuando la temperatura llega a 90 C y cuando alcanza 95C se envía señal para shutdown.
- Para el rodamiento antifricción se cuenta con alarma a 90C y con trip a 105C.

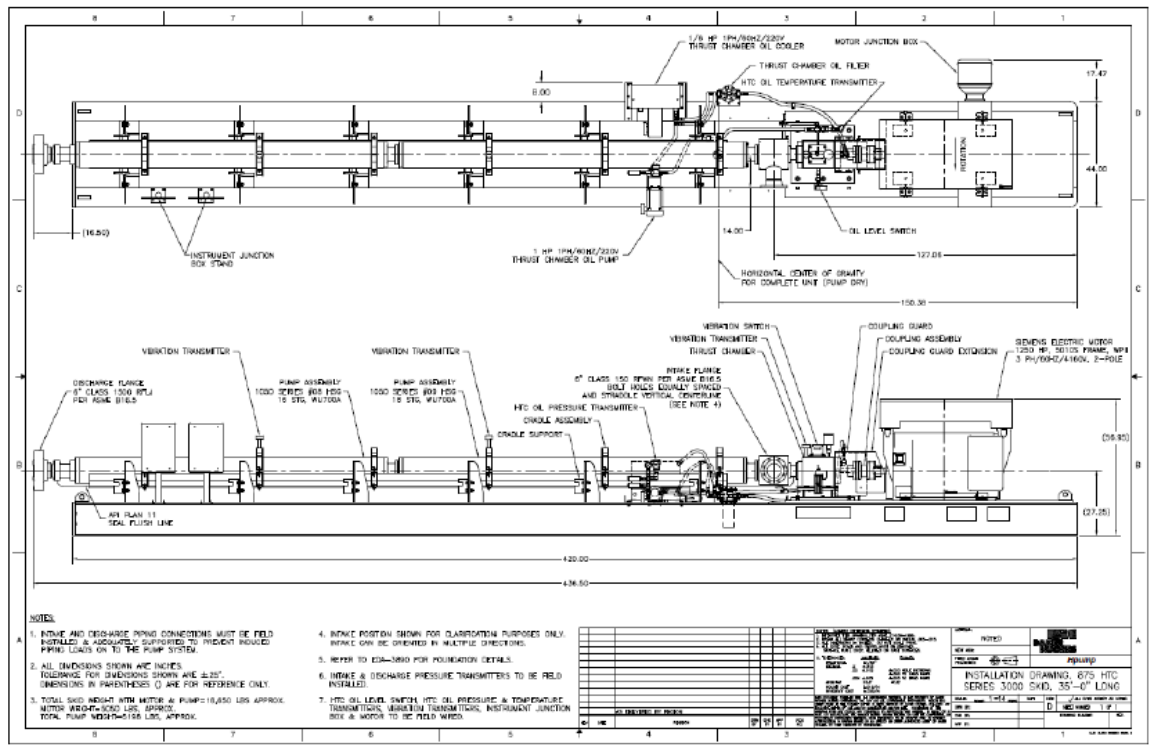
Se sugiere un límite para la vibración en la carcasa del motor de 0.25 in/sec y de 3.3 mils (entre picos) para el eje.

Succión/ Descarga: son ensambles soldados que van atornillados a la bomba y la HTC, el de succión, y a la cabeza de la bomba el de descarga. La dirección de la admisión puede ser cambiada en el campo de acuerdo al arreglo de las tuberías. La descarga posee una brida rotatoria que facilita los trabajos de conexión.

Los motores eléctricos son marca Siemens, soportados sobre un skid metálico que minimiza la desalineación de la bomba asociada a la operación, con las siguientes características:

1250/4160 frame 5010S con un factor de servicio de 1.15 velocidad nominal de 3600 RPM y aislamiento clase F para la bomba de 20.000 BPD de capacidad. Motor operado por un Variador de velocidad marca Rockwell.

Figura 50. Bomba inyección capacidad 25.000 bpd



Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3.

La instrumentación asociada a las bombas de Inyección Centriflitt P-3251/52/53, es la que se muestra en la tabla.

Tabla 9. Instrumentación asociada a las bombas principales de inyección P-3251/52/53.

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
PDIT-32511/21/31	Diferencial de presión filtro succión bombas	HH: 5 psig H: 2.5 psig	Da alarma de alta presión diferencial
PSV-32512/522/532	Válvula Alivio Presión	220 psig	Dispara y envía agua a cabezal de recirculación.
PIT-32510/20/30	Transmisor presión succión	HH: 100 psig LL: 30 psig	Alarma de alta/alta; baja/baja presión de succión. Apagado de bomba
FSL-32511/21/31	Switche de bajo flujo	0 GPM	Alarma de bajo flujo. Parada de bomba por bajo flujo.
FIT-32511/21/31	Transmisor de Flujo	HH: 27 KBPD H: 25 KBPD L: 17 KBPD LL: 16 KBPD	Alarma de alto, alto-alto, bajo y bajo-bajo flujo.
PIT-32511/512, PIT-32512/522, PIT-32531/532	Transmisores de presión descarga	HH: 2250 psig H: 2200 psig L: 1600 psig LL: 1500 psig	Monitorea presión descarga de cada bomba y controlan la presión de inyección y de recirculación. Apaga bomba cuando alcanza set point.
PSV-32511/521/531	Válvula Alivio Presión	2270 psig	Alivia presión tanque
PCV-32512/522/532	Válvulas control presión	H:2200 psig	Abre para recircular en mínimo flujo
MOV-32511/521/531	Válvula motorizada	N/A	Abre manualmente. Apaga bomba en caso no abierta.
LSLL-32411/421/431	Switche de bajo-bajo nivel	10% del nivel de la cámara	Para bomba por bajo nivel aceite lubricación.
PIT-32411/421/431	Transmisor de descarga bomba lubricación	HH: 60 psig H: 35 psig L: 15 psig LL: 10 psig	Alarma por alta presión. Parada de bomba por alta-alta.
RTD-32510/20/30	RTD temperatura aceite lubricación	H: 95 °C	Para bomba por alta temperatura aceite lubricación.
		HH: 105 °C H: 100 °C	Alarma en alta y parada bomba por alta temperatura del rodamiento del motor
RTD-351Y/52Y/53Y (Estas RTDs se encuentran conectadas y configuradas a los variadores Allen Bradley, y es desde allí, desde donde se ejecuta la parada de la bomba en el caso de requerirse)	RTDs devanados motor	H: 170 °C H: 155 °C	Alarma en alta y parada de motor en alta-alta.
VT-32511/521/531	Transmisor de vibración cámara de empuje	HH: 0.61 in/s H: 0.5 in/s	Alarma en alta y apagado de bomba en alta-alta vibración

Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3

5.4.3.2 Bombas de Inyección Centrilift (P-3254/55/56). Son bombas Centrifugas Serie 1200 #06 HSG WJJ1000A con un total de 25 etapas acopladas a un motor Siemens de 1.500 HP/3.600 RPM, 3 PH/60HZ/4.160 V. La capacidad de las bombas es de 30.000 BWPD con una cabeza de 2000 psi. La curva de operación de esta bomba se muestra en la figura 1. De acuerdo a esta, su ventana de operación está entre 22 y 38 KBPD por bomba (presiones descarga entre 1800 Y 2000 psig). BEP alrededor de 35000 BPD y por lo tanto la ventana está entre el 63 y el 108,6% con relación al BEP con frecuencias hasta de 60 Hz.

Figura 51. Bomba Centrifuga Inyección de Agua – PIA3.



Fuente. Los Autores.

Succión/ Descarga: son ensambles soldados que van atornillados a la bomba y la HTC, el de succión, y a la cabeza de la bomba el de descarga. La dirección de la

admisión puede ser cambiada en el campo de acuerdo al arreglo de las tuberías. La descarga posee una brida rotatoria que facilita los trabajos de conexión. Los motores eléctricos son marca Siemens, soportados sobre un skid metálico que minimiza la desalineación de la bomba asociada a la operación, con las siguientes características:

- 1500/4160 frame 5010S con un factor de servicio de 1.15 velocidad nominal de 3600 RPM y aislamiento clase F para la bomba de 30.000 BPD de capacidad. Motor operado con arrancador suave marca Benshaw.

5.4.3.3 Protección de las bombas. Cada bomba cuenta con las siguientes protecciones:

Succión:

- Una PSV por cada bomba (PSV-32542/552/562) calibrada a 220 psi.
- PDIT-32541/51/61 para el strainer de succión
- Un Transmisor de presión PIT-32540/50/60.
- Un switch de bajo flujo por cada bomba seteado a 0 BPD (FSL-32541/51/61)
- Un indicador de presión local PI-32541/51/61.

Adicionalmente el cabezal de succión común tiene un PIT-32502.

Asociado a la bomba/motor:

- LSLL32441/451/461 de bajo nivel de lubricación
- Un PIT-32441/451/461 de baja presión descarga bomba lubricación
- RTD 32540/50/60 de alta temperatura en cámara de empuje.
- Un switch de vibración de cámara de empuje igual Centrilift marca uno en el plano

- Un Transmisor de Vibración de la Cámara de empuje VT-32541/551/561
- Dos transmisores de vibración de la bomba igual Centrilift marca lo transmisores en el plano
- 8 RTDs del motor RTD-3254Y/55Y/56Y (Estas RTDs se encuentran conectadas y configuradas a los Variadores Allen-Bradley , y es desde allí, desde donde se ejecuta la parada de la bomba en el caso de requerirse)
- Transmisor Temperatura rodamiento del motor verificar con el plano del motor.

En la descarga están protegidas por:

- Dos PIT por cada bomba (PIT-32541/542, PIT-53551/552, PIT-53561/562), Una válvula de alivio de alta presión (32541/551/561) calibrada a 2270 psig,
- Un transmisor de flujo por bomba (FIT-32541/551/561)
- Válvulas de recirculación (PCV-32542/552/562) para aliviar presiones hacia el cabezal de 10” que va al tanque K-3211
- Válvulas de control presión descarga (PCV-32541/551/561) y una válvula on –off motorizada MOV-32541/551/561 en la descarga por bomba.
- En el cabezal común de descarga de las 6 bombas hay un PIT-32563, un medidor de flujo hacia la recirculación FIT-32112 y un medidor de flujo hacia pozos FIT-32111.

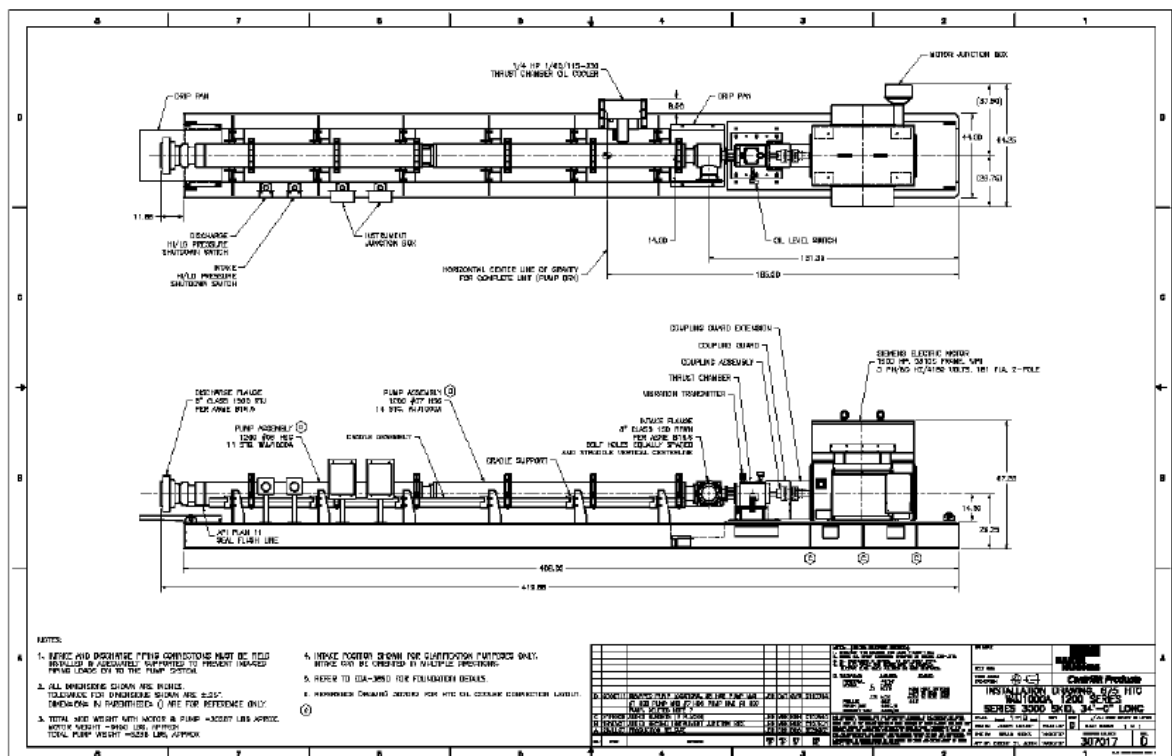
El cabezal común de recolección de disparo de válvulas de seguridad de succión, descarga y válvulas de recirculación es de 10” y este descarga al tanque K-3211. Toda la instrumentación asociada a las bombas se reporta al PLC de Proceso o al de ESD de la estación, de acuerdo a su acción respectiva de control o protección y es monitoreada a través de la RTU1 hacia el HMI del cuarto de control y Scada Iconics.

Los motores cuentan con ocho protecciones por alta temperatura en el devanado y en la jaula, que se disparan luego de que la señal se sostenga por 2 segundos:

- Para el devanado se cuenta con alarma cuando la temperatura llega a 155C y con señal de trip (shutdown) cuando la temperatura a 170C (para la serie de Clase F).
- Para la zona de los sleeve, se cuenta con alarma cuando la temperatura llega a 90 C y cuando alcanza 95C se envía señal para shutdown.
- Para el rodamiento antifricción se cuenta con alarma a 90C y con trip a 105C.

Se sugiere un límite para la vibración en la carcasa del motor de 0.25 in/sec y de 3.3 mils (entre picos) para el eje.

Figura 52. Bomba inyección capacidad 30.000 BWPD.



Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección pia-3

La instrumentación asociada a las bombas de inyección Centrilift P-3254/55/56, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10. Instrumentación asociada bombas Centrilift P-3251/52/53

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
PDIT-32541/51/61	Diferencial de presión filtro succión bombas	HH: 5 psig H: 2.5 psig	Da alarma de alta presión diferencial
PSV-32542/552/562	Válvula Alivio Presión	220 psig	Dispara y envía agua a cabezal de recirculación.
PIT-32540/50/60	Transmisor presión succión	HH: 100 psig LL: 30 psig	Alarma de alta/alta; baja/baja presión de succión. Apagado de bomba
FSL-32511/21/31	Switch de bajo flujo	0 GPM	Alarma de bajo flujo. Parada de bomba por bajo flujo.
FIT-32541/51/61	Transmisor de Flujo	HH: 47 KBPD H: 38 KBPD L: 23 KBPD LL: 22 KBPD	Alarma de alto, alto-alto, bajo y bajo-bajo flujo.
PIT-32541/542, PIT-32542/552, PIT-32531/532	Transmisores de presión descarga	HH: 2250 psig H: 2200 psig L: 1600 psig LL: 1500 psig	Monitorea presión descarga de cada bomba y controlan la presión de inyección y de recirculación. Apaga bomba cuando alcanza set point.
PSV-32541/551/561	Válvula Alivio Presión	2270 psig	Alivia presión tanque
PCV-32542/552/562	Válvulas control presión	H:2200 psig	Abre para recircular en mínimo flujo
MOV-32541/551/561	Válvula motorizada	N/A	Abre manualmente. Apaga bomba en caso no abierta.
LSLL-32441/451/461	Switch de bajo-bajo nivel	10% del nivel de la cámara	Para bomba por bajo nivel aceite lubricación.
PIT-32441/451/461	Transmisor de descarga bomba lubricación	HH: 60 psig H: 35 psig L: 15 psig LL: 10 psig	Alarma por alta presión. Parada de bomba por alta-alta.

Tabla 10. Instrumentación asociada bombas Centrilit P-3251/52/53 (continuación)

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
RTD-32540/50/60	RTD temperatura aceite lubricación	H: 95 °C	Para bomba por alta temperatura aceite lubricación.
		HH: 105 °C H: 100 °C	Alarma en alta y parada bomba por alta temperatura del rodamiento del motor
RTD-3254Y/55Y/56Y (Estas RTDs se encuentran conectadas y configuradas a los variadores Allen Bradley, y es desde allí, desde donde se ejecuta la parada de la bomba en el caso de requerirse)	RTDs devanados motor	H: 170 °C H: 155 °C	Alarma en alta y parada de motor en alta-alta.
VT-32541/551/561	Transmisor de vibración cámara de empuje	HH: 0.61 in/s H: 0.5 in/s	Alarma en alta y apagado de bomba en alta-alta vibración

Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3

Todas y cada una de las bombas esta provista de una cámara de empuje. La cámara de empuje modelo 875 está compuesta de una carcasa que contiene el eje que conecta la bomba con el motor a través de sus respectivos sellos y rodamientos (de marca John Crane tipo 2 de elastómero /345psi); esta cámara contiene además un fluido (CL-4-OIL CENTRILIFT C42288) que realiza simultáneamente sello hidráulico y lubricación de la misma. La función de la cámara de empuje es transmitir el torque del motor hacia la bomba, aislar el motor del empuje que general el cambio de movimiento del fluido en la bomba y

asimismo realizar el sello hidráulico entre el fluido y la bomba. Por las razones anteriores, en la cámara de empuje se monitorea la vibración, la temperatura del fluido que hace el sello (con dos RTD localizadas en el mismo modulo que las RTD del motor) y el nivel del aceite de lubricación.

5.4.3.4 Sistema de decantadores. De las bombas reforzadoras P-3231/32/33 se envía el agua de retrolavado con trazas de crudo y sólidos pasa a unos decantadores, DE-3091/3092 y de allí a la caja de drenajes para posteriormente ser bombeada nuevamente al inicio del proceso (cabezal de entrada estación LCI 3^a), a través de dos bombas centrifugas P-3038/3039.

Figura 53. Decantadores DE-3091/92 PIA-3.

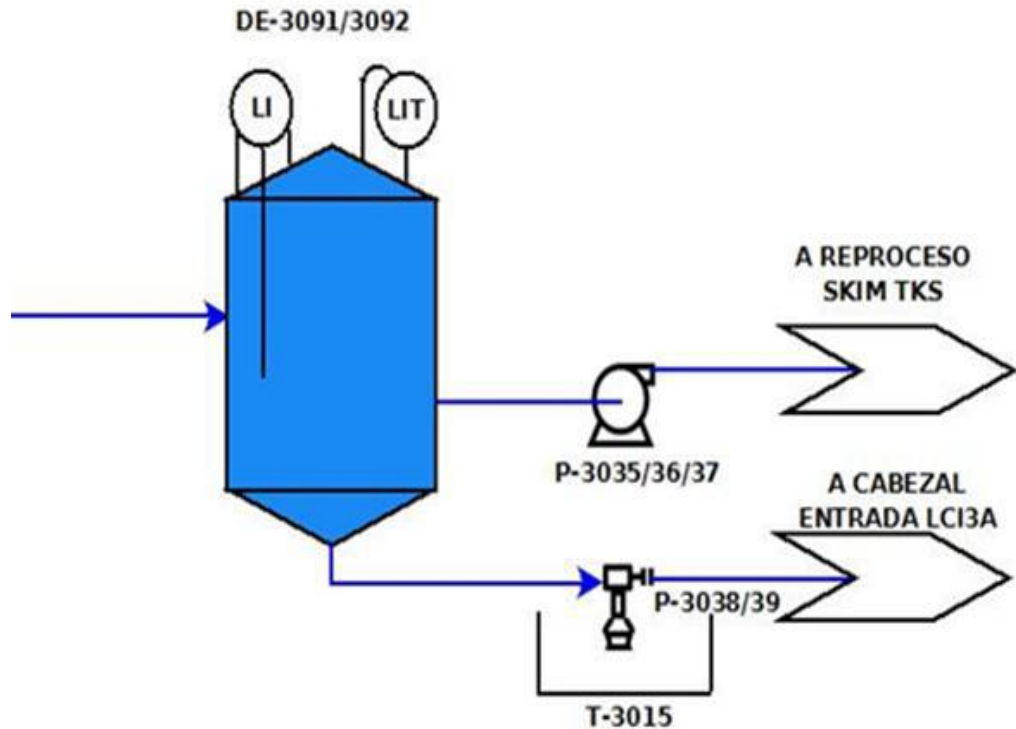


Fuente. Los Autores

Este sistema tiene el propósito de recibir el agua con alto contenido de aceite y sólidos proveniente del retrolavado de filtros.

- Un indicador visual de nivel tipo regleta, LI-30911/921, se cuenta además con un transmisor e indicador de nivel tipo radar de onda guiada, LIT-30911/921.

Figura 54. Esquema general del proceso de decantación en PIA-3.



Fuente. Instructivo de operación decantadores PIA-3. ECOPETROL S.A.

Este sistema tiene el propósito de recibir el agua con alto contenido de aceite y sólidos proveniente del retrolavado de filtros. Se cuenta con dos tanques decantadores de 650 barriles de capacidad los cuales permiten recibir el agua contaminada y dejarla en reposo (aproximadamente 5 a 8 horas) para facilitar la separación de sólidos hacia el fondo del tanque cónico y del aceite hacia la superficie superior del agua.

Cada tanque decantador posee las siguientes entradas y salidas:

- Una línea de 8" que deriva del cabezal de 12" proveniente de los filtros
- Una línea de 6" a nivel de 29'-3" de overflow hacia la caja de drenajes.
- Una línea de salida de 6" del fondo, la cual descarga a la caja de drenajes.

- 6 líneas de muestreo de 1" que descargan a una caja de muestreo
- Una línea de 6" de drenaje de agua hacia la succión de bombas de reproceso.
- Dos entradas de 3" para agua lavado del cono.

Los tanques decantadores de agua de retrolavado de filtros son tanques cilíndricos con un diámetro de 12' y una altura total de 30'; cada tanque posee una capacidad nominal de 650 BBL y se encuentran diseñados bajo código ASME Sección VIII Div 1 para una presión de diseño de 0,5 psi+CH. La presión de trabajo es la atmosférica. Allí se decanta el agua proveniente de retrolavado de filtros y permite dar cabeza de succión a las bombas P-3035/36/37 (centrifugas) que recirculan agua desde los decantadores a los tanques skimmer de la estación LCI-3-A.

Igualmente, desde estos tanques se drena el fluido con alto contenido de sólidos a una caja de drenajes de 230 barriles para que desde allí succionen las bombas P-3038/39 y envíen agua de recirculación hacia los tanques skimmer o el cabezal de entrada de la LCI-3-A.

Los decantadores cuentan con conexión para inyección de floculante y la línea de entrada a cada decantador con un mezclador estático para favorecer el mezclado de coagulante/floculantes.

Cada ciclo de retrolavado envía un volumen aproximado de 251 barriles hacia los decantadores. Ósea que un decantador tiene una capacidad de aproximadamente 2 retrolavados para alcanzar en un tanque el nivel alto.

Figura 55. Conexión Para Inyección De Floculante PIA-3



Fuente. Los Autores.

La instrumentación asociada a los decantadores se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 11. Instrumentación asociada a los decantadores en PIA-3.

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
LI-30911/921	Indicador de nivel regleta	N/A	Permite visualización de nivel en tanque
LIT-30911/921	Transmisor de nivel tipo radar	HH: 26´ H: 23´ L: 13´ LL: 18´	Monitorea el nivel y da alarmas. En HH, cierra UV de entrada de agua a decantador. Para bombas reproceso por bajo nivel en tanque.
LSHH-30911/921	Switches de nivel alto-alto	HH: 26´-3"	Alarma de nivel alto. Cierra UV de entrada de agua a decantador.

Tabla 11. Instrumentación asociada a los decantadores en PIA-3 (continuación)

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
LSSL-30911/921	Switches de nivel bajo-bajo	LL: 18'(1'-6")	Alarma de nivel bajo. Parada de bombas reproceso en bajo nivel
LG-30911/921	Sight glass parte baja del tanque	N/A	Permite visualizar el nivel en parte inferior del cilindro
UV-30911/921	Válvula on-off	N/A	Cierra para detener entrada de agua retrolavado a decantadores.
UV-30913/923	Válvula on-off	N/A	Se abre para alimentar agua de lavado fondo del cono del decantador.
UV-30912/922	Válvula on-off	N/A	Se abre para permitir salida de agua hacia succión de bombas de reproceso.
UV-30914/924	Válvula on-off	N/A	Permite paso de overflow del decantador a caja de drenajes.

Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección pia-3

5.4.3.5 Bombas de Reproceso P-3035/36/37 y P-3038/39. El sistema de bombas de reproceso está conformado por:

- Tres bombas horizontales marca Goulds modelo 3196 MTi de 345 GPM de capacidad cada una.
- Dos bombas verticales Goulds modelo API 3171M de 200 GPM de capacidad cada una.

Las bombas horizontales succionan agua contaminada directamente de un cabezal conectado a los decantadores. Sirven para drenar la mayoría de agua contaminada una vez se termina el ciclo de asentamiento y transferirla hacia los tanques de skimming de la planta LCI-03-A.

Para su protección se cuenta con indicadores de presión en línea de succión PI-30351/53/361/371, diferencial de presión PDIT-30351/361/371, Switch de bajo flujo FSL-30351/361/371, indicadores de presión PI-30352/362/372 en descarga. El arranque de estas bombas es manual.

Figura 56. Bombas de agua a reproceso P-3035/36/37.



Fuente. Los Autores.

La instrumentación asociada al sistema de bombeo de reproceso P-3035/36/37 es el que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 12. Instrumentación asociada a las bombas P-3035/36/37.

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
FSL-30351/361/371	Switche de bajo flujo descarga bombas	0 GPM	Alarma de bajo flujo. Para bombas por bajo flujo.
PDIT-30351/361/371	Indicador de presión diferencial	HH: 40 psi	Protegen las bombas de alta diferencial de presión. Parar bombas en caso de alto diferencial.
PI-30353/351/361/371 PI-30352/362/372	Indicador local de presión	N/A	Indica la presión en las líneas de succión y descarga de las bombas.
PIT-30351	Transmisor de presión diferencial en cabezal descarga bombas	HH: 50 psig LL: 15 psig	Monitorea presión en cabezal de descarga.

Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección pia-3

Las bombas verticales succionan agua contaminada directamente de la caja de drenajes. Sirven para drenar la mayoría de agua contaminada con crudo una vez se termina el ciclo de asentamiento y transferirla hacia los tanques de skimming o el cabezal de entrada de la planta LCI-03-A. Para su protección se cuenta con indicadores de presión en línea de succión PSH-30381/391, PI 30381/391, Switche de bajo flujo FSL-30381/391, monitoreo de nivel en caja de drenajes LIT-30151.

Figura 57. Bombas verticales agua a reproceso, P-3038/39



Fuente. Los Autores

La instrumentación asociada a las bombas de reproceso es la que se indica en la siguiente tabla:

Tabla 13. Instrumentación asociada al sistema de bombeo de reproceso P-3038/39.

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	SET	ACCION
FSL-30381/391	Switche de bajo flujo descarga bombas	0 GPM	Alarma de bajo flujo. Para bombas por bajo flujo.
LIT-30151	Transmisor de nivel	H: 2 m LL: 0.5 m	Monitorea el nivel en la caja de drenajes
PI-30381/391	Indicador local de presión	N/A	Indica la presión en las líneas de descarga de las bombas.
PIT-30351	Transmisor de presión diferencial en cabezal descarga bombas	HH: 50 psig LL: 15 psig	Monitorea presión en cabezal de descarga.
PSH-30381/391	Switche de alta presión descarga bombas	H: 58 psig	Para bomba por alta presión descarga

Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3

5.4.3.6 Caja de lodos. Una vez que finaliza este proceso, se abre la válvula de salida de agua hacia las bombas de reproceso, las cuales envían esta agua hacia la planta LCI-03-A. Las bombas se apagan una vez el nivel baje en el decantador hasta las 18". Una vez se alcance este nivel, se procede a abrir la válvula UV-30914/924 correspondiente de drenaje de fondo para drenar el contenido con alto nivel de sólidos hacia la caja de drenajes T-3015.

Figura 58. Caja de lodos y bombas de reproceso PIA3.



Fuente. Los Autores.

Durante la operación de vaciado es posible que se tapone la tubería de salida, razón por la cual se deja una conexión de agua limpia operada mediante la apertura de la UV-30913/923 para lavar el fondo del cono.

El nivel de la caja de lodos se controla con el LIT-30151, en el cuerpo del tanque decantador existe:

- Un indicador visual de nivel tipo regleta, LI-30911/921, se cuenta además con un transmisor e indicador de nivel tipo radar de onda guiada, LIT-30911/921.
- Conexiones de 1" para los switches de alto-alto (LSHH-30911/921) y bajo-bajo nivel (LSLL-30911/921)
- Un cuello de ganso de 8" en el techo
- Un manhole de 24" en el techo
- Conexiones de 2" para indicadores de nivel LG-30911/921 en la parte inferior del tanque.

5.4.4 Sistemas Auxiliares

5.4.4.1 Aire Instrumentos. La planta de inyección PIA-3 cuenta con dos compresores de aire modelo UP-6-30-150/ Marca Ingersoll Rand de tipo rotatorio con capacidad de 112 scfm @ 150 psig. Uno de ellos en operación y el otro en reserva.

Cada compresor es un compresor de tornillo de una etapa alimentado por un motor eléctrico. Es a través de la superposición de la rotación dos rotores helicoidales (macho y hembra) que el aire se comprime conforme atraviesa el compresor. El diámetro del rotor macho es de 4.21 pulgadas.

El motor eléctrico que provee la fuerza motriz opera a 460V, 60 Hz (4 polos), 40 amperios y potencia nominal de 30 hp (a la máxima presión). Esta es la potencia que puede generar hasta 158 psig de descarga máxima para la succión de aire a las condiciones encontradas en El Centro. El adecuado mantenimiento del rotor es vital para asegurar un suministro de aire confiable a los servicios y a la instrumentación.

El compresor puede operar a temperatura ambiente de hasta 40C desarrollando una presión máxima de operación de 158 psig. En todos los casos el nivel de ruido es inferior a 69 dB.

Cada compresor cuenta con un acoplamiento directo entre la unidad compresora y el tanque separador para evitar las posibles fugas en las conexiones y también con un manifold donde se integra el separador la válvula termostática y el filtro de lubricante Dos compresores de aire UP-6-30-150.

Figura 59. Sistema de compresión de aire para instrumentos.



Fuente. Los Autores.

Características técnicas

- Presión de descarga máxima: 158 psig.
- Presión de descarga mínima: 65 psig
- Potencia: 30 HP

- Tipo lubricación: Lubricado (Aceite sintético ULTRAPLUS para cambio cada 9000 horas)
- Transmisión: por correas

5.4.4.2 Sistema de control en la PIA-3. La planta de inyección PIA-3 es controlada por un sistema de control Allen Bradley y controladores ControlLogix localizados en el cuarto de control. El sistema de control se divide en control de Proceso PLC-PCS, PLC-Filtros y Sistema de Parada de Emergencia PLC-ESD. Se cuenta con un PLC de proceso y un PLC de ESD con sus RTU's distribuidas a lo largo de la planta, dos para el PLC-PCS y dos para el ESD.

Al PLC de proceso, localizado en el cuarto de control, le reportan la subestación de variadores Rockwell, arrancadores Benshaw y el centro de control de motores Schneider. A la RTU-01: la instrumentación de las bombas de inyección, el anillo de MOVs y PLC de filtros y su instrumentación. A la RTU-02 : la instrumentación de tanques de recibo, Bombas a filtros, Decantadores, bombas de reproceso, caja de drenajes, tanque de agua filtrada y bombas Booster, el sistema de aire comprimido y el de inyección de química. Las RTUs están localizadas en campo. Los PLC de proceso y ESD tienen controlador redundante.

Los PLCs y las RTU son categoría SIL2 es decir que tienen una confiabilidad muy alta.

El lazo de comunicaciones ControlNET está constituido por un anillo de fibra óptica que recoge las señales de las RTUs de campo y las lleva a los PLCs del cuarto de control. La configuración del anillo permite comunicaciones por dos rutas permanentes de envío de información hacia los PLC asegurando que si un tramo de la fibra se rompe la información llega por el lazo que permanece en servicio.

Los PLC y RTU están alimentados por una UPS Mitsubishi de 15 KVA y media hora de autonomía a plena carga para que mantengan el control de la operación

en caso de falla eléctrica. La UPS está soportada en bancos de baterías redundantes, tipo sellada, libre de mantenimiento. Adicionalmente la filosofía de la instrumentación del campo considera falla segura.

Los controladores tienen configurados los enclavamientos para protección propia del equipo al que están asociados. El Controlador de la estación controlará independientemente cada uno de los subprocessos que están involucrados en la operación de la planta y a su vez realizará los enclavamientos requeridos entre cada uno de los procesos.

Antes de que ocurra disparo de proceso o de emergencia por detección de una condición anormal, el operador recibirá la señal de alarma para que se entere de la anomalía y para que ejecute acciones correctivas. Si estas acciones correctivas no son suficientes se ejecutará el disparo del proceso.

A pesar que los equipos de control periféricos trabajan Stand Alone, es necesario comunicarse con ellos para monitorear las señales en el sistema de supervisión y en determinados casos tomar acciones. Estos equipos son:

- Centro de Control de Motores Schneider.
- Subestación de variadores Rockwell y arrancadores Benshaw
- Sistema de Tanques de recibo agua de producción
- Sistema de bombas agua a filtros.
- Sistema de filtros.
- Sistema de almacenamiento de agua Filtrada
- Sistema de bombas booster
- Sistema de bombas de inyección
- Estación Maestra de Válvulas Motorizadas.
- Sistema de aire comprimido.
- Sistema inyección de Químicos.

El sistema de ESD permite el apagado individual de equipos o unidades de la estación debido a condiciones críticas de la seguridad en el proceso y también realiza el shutdown general de la planta debido a condiciones extremas de inseguridad.

Se dispondrá de una serie de pulsadores ESD (1 en cada tablero, 3 en total) para el shutdown general de la planta, los cuales estarán localizados en sitios estratégicos de la Facilidad.

5.5 INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO

Los instrumentos miden las diferentes variables del proceso, variables de protección de equipos y variables de protección de la planta. Estas señales son llevadas cableadas en duro hasta los procesadores (PLCs) de Proceso y ESD para efectuar el Control Básico del Proceso.

La instrumentación análoga en su mayoría es alimentada en un loop de 24 VDC y la señal va por el mismo par de cables en 4-20mA. Toda la instrumentación adquirida para el proyecto es calibrable vía protocolo Hart.

La instrumentación digital, va cableada en un par y pasa por el contacto seco del instrumento 24 VDC o 120 VAC, dependiendo del caso.

Las válvulas motorizadas ubicadas en la descarga de las bombas de inyección son alimentadas en 3 fases de 480 VAC. La interfaz para comandos y estados de la válvula va en un anillo de comunicaciones RS485.

Para las válvulas de control se tiene una alimentación neumática a 20 psi. El actuador de las válvulas de control tiene un conversor IP, el cual recibe señal de 4-

20mA para controlar la posición de la válvula y devuelve una señal, también en corriente, para indicar la posición de la válvula.

Las válvulas de disparo de emergencia, tienen actuador de pistón, y su aire de alimentación será cortado por la válvula solenoide cuando una señal de emergencia desde el sistema de ESD ocurra.

5.5.1 Lazos de control On-Off. En este tipo de lazo de control están asociadas básicamente las válvulas de corte UV de filtros, drenajes y decantadores, válvula SDV de entrada de fluido hacia la planta y válvulas motorizadas en la descarga de la bomba de inyección.

Las válvulas UV son actuadas por el PLC de proceso y las Válvulas SDV son actuadas por el sistema de ESD. Las válvulas están especificadas para que en caso de falla eléctrica o falla de aire instrumentos actúen y fallen a un estado seguro, protegiendo la seguridad de la facilidad.

Las válvulas motorizadas están ubicadas en las líneas de descarga de las bombas de inyección. Las señales de comando y señales de estado de las válvulas se leen por comunicaciones en un anillo de fibra óptica.

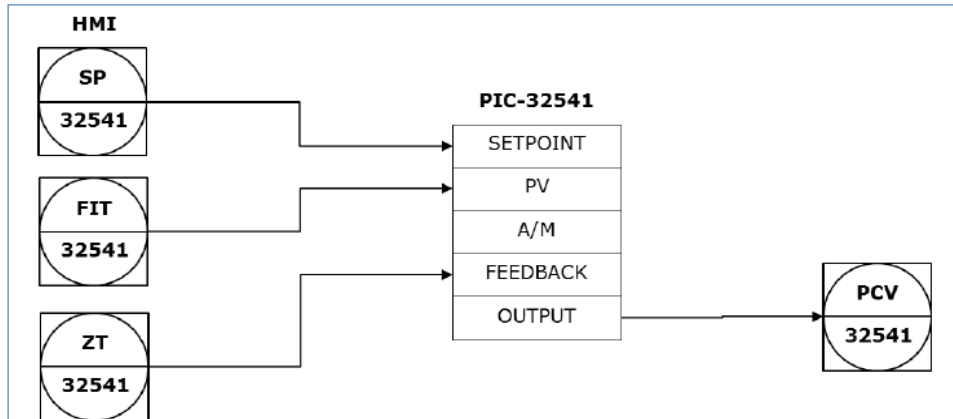
5.6 LAZOS DE CONTROL REGULATORIO

Son los equipos que son controlados con base a controladores PID (Proporcional, Integral, derivativo) y sirven para operar en forma óptima los diferentes procesos de la planta y que para el caso de la PIA3 son los siguientes:

5.6.1 Lazo de control de flujo hacia los filtros que mantiene el flujo en un valor de 40000 BPD máximo y regula los ciclos de limpieza de cada filtro. El flujo de diseño del equipo PETRECO limita el flujo de filtración por unidad de area al valor asociado al flujo mencionado, se cuenta con un sistema de restricción de flujo a la salida del filtro de tal manera que en caso de falla abierta de la válvula no pase más del flujo permitido por el lecho.

5.6.2 Lazo de Control de presión para controlar el Flujo mínimo en la línea de recirculación de las bombas de inyección para mantener la presión de descarga por debajo de 2100 psig. Para el lazo de control de presión de recirculación, la presión se controla en 2050 psig mediante los PIT-32511/521/531 y PIT-32512/522/532 para las bombas P-3251/52/53 y los PIT-32541/551/561 y PIT-32542/552/562 para las bombas P-3254/55/56; aún cuando lo que se requiere es controlar por mínimo flujo la bomba la señal proveniente de los transmisores de flujo varía instantáneamente de forma muy rápida, lo que dificulta su sintonización, por dicha razón este lazo se encuentra calibrado para que a una presión correspondiente con el flujo operen las respectivas válvulas de control de presión de reciclo PCV-325X2. El valor de éstos transmisores es la variable de proceso del PID que maneja las válvulas de control de presión, localizadas en la línea de descarga de cada bomba.

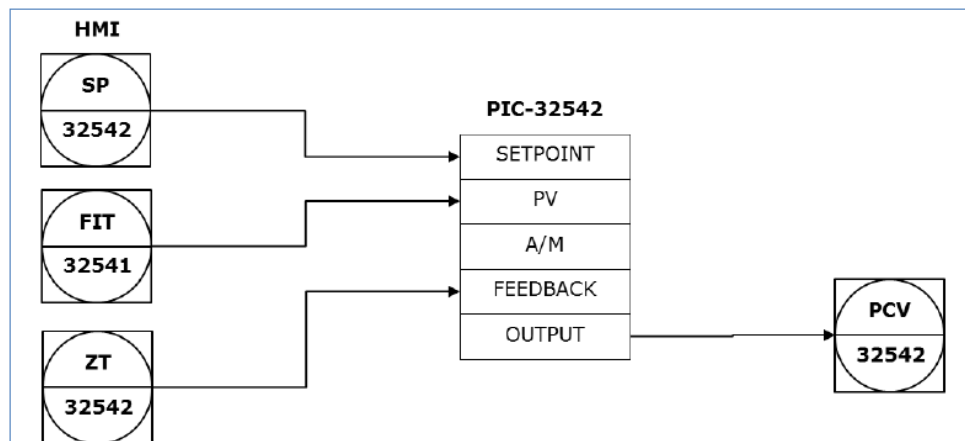
Figura 60. Lazo Control presión recirculación.



Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3.

5.6.3 Lazo de control de presión en la descarga de las bombas de inyección para mantener la presión de descarga en 2000 psig. cuyo objetivo es mantener la presión de descarga de las bombas en 2000 psig y el flujo correspondiente, esto por recomendación del fabricante. Dependiendo de la necesidad o requerimientos del operador el valor de SP de este lazo se puede modificar entre 1950 y 2050 psig.

Figura 61. Lazo control de presión de inyección.



Fuente. Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3.

5.6.4 Lazo control de velocidad de variadores para bombas de inyección de 20.000 BPD de capacidad. En caso de una reducción o aumento súbito generado por cierres o apertura en los pozos del sistema, se puede requerir de una variación en el flujo instantáneo para mantener el balance de materia en el sistema de inyección. El sistema de control tendrá una estrategia autoselector (override) que cambiará la velocidad de las bombas con el VFD (de manera independiente) para controlar la presión de salida de la planta en un valor mínimo de 1900 psig o de máximo 2050 psig acuerdo a lo fije el operador Ecopetrol. Sin embargo lo anterior y si alguna de las bombas resultare por fuera de su ventana de operación, cada lazo de variación de velocidad es independiente y por si cuenta con la protección de recirculación y de control de presión ya establecida.

5.7 FILOSOFÍA DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE PIA- 3.

El sistema eléctrico de la PIA-3 se alimenta de la nueva línea de distribución principal de 34,5 KV desde la subestación Campo-38. La línea llega a los transformadores de potencia de 15-18 MVA, donde se baja la tensión a 4,16 KV y se distribuye energía en 4.16 KV a todas las cargas de media tensión dentro de la planta. Igualmente hay transformador de 2 MVA para pasar de 4,16KV a 480 VAC.

5.7.1 Subestación eléctrica. El área eléctrica de la subestación desde donde se manejan las cargas de la estación de inyección está localizada en un edificio de dos pisos. En el patio de transformadores está localizada las unidades de 15-18 MVA que bajan la tensión de 34,5 KV a 4.16 kV para alimentar todas las cargas de media tensión de la planta.

En el primer piso se localiza la zona de llegada y salida de los conductores y en el segundo piso la zona de equipos switchgear de MV de 34.5 KV y de 4.16 KV. El sistema de celdas de 35 KV corresponde a la línea de llegada y protección del transformador. Las celdas del barraje de 4.16 KV alimentan:

5.7.1.1 Resumen variables más importantes del proceso de inyección en PIA-3.

- Caudal total de inyección: 120.000 Barriles de agua por día.
- Contenido de grasas y aceites a la entrada a tanques K-3011/3012: de 10 a 40 ppm.
- Contenido de grasas y aceites a la entrada de los filtros: de 5 a 25 ppm.
- Contenido de grasas y aceites a la entrada de las bombas: de 2 a 5 ppm.
- Contenido de solidos a la entrada tanques K-3011/3012: de 15 a 50 ppm.
- Contenido de solidos a la entrada de los filtros: de 2 a 30 ppm.
- Contenido de solidos a la salida de los filtros: de 1 a 10 ppm.
- Presión de succión de las bombas principales: 40-80 psig
- Presión de descarga bombas principales: 1850-2030 psig.
- Temperatura de operación: 80-100 °F.

5.7.1.2 Equipos Principales

- Tanques de recibo K-3011/3012
- Tanque de cabeza, K-3211
- Bombas de carga a filtros, P-3031/32/33/34
- Filtros de cascara de nuez, F-3071/72/73/74
- Decantadores de agua de retrolavado, DE-3091/92
- Bombas booster (reforzadoras), P-3231/32/33/34/35/36

- Bombas principales de inyección a alta presión, P-3251/52/53/54/55/56.
- Bombas de agua a reproceso, P-3035/36/37 y P-3038/39.

5.7.2 Diagrama Entrada-Procesos-Salida. Para el sistema de PIA 3, se definió el siguiente diagrama EPS.

Figura 62. Diagrama EPS para la PIA 3.

DIAGRAMA EPS DEL SISTEMA DE INYECCION DE AGUA EN PIA 3		
ENTRADA	PROCESO 1	SALIDA
	PROCESOS	
Agua proveniente de la estación LCI 3A, grasas y aceite: 10-40 ppm Contenido de solidos: 15-50 ppm, tamaño de partícula: 1-12 micrones Energía Eléctrica, 34.2 KV Señales de control. Aire de instrumentos	Filtración del agua. Comprimir aire para instrumentos Convertir energía eléctrica en energía mecánica Transformar energía mecánica en energía hidráulica Transformar la tensión de la energía de 34.2 KV a 4160V y 480V Transformar señales de control Bombear agua de los tanques a los filtros Bombear agua de los filtros al tanque de cabeza Bombear el agua de inyección a alta presión	Agua filtrada, grasas y aceite: 2-5 ppm Contenido de solidos: 1-10 ppm tamaño de partícula 1-2.5 micrones Agua a alta presión, 120 Bls/día @ 2000 psig Agua a reproceso grasas y aceite: 50-200 ppm Contenido de solidos: 5-100 ppm Señales de control lodos de decantación, contenido de grasas y aceites: 5% - 150% peso en crudo tamaño de solidos: 1%

Fuente. Los Autores.

5.8 DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DEL SISTEMA DE BOMBAS DE INYECCIÓN DE AGUA

El sistema de bombas principales de inyección de agua, consiste de 6 bombas centrifugas horizontales multietapas, marca Centrilift, accionadas por motores eléctricos marca Siemens, las bombas son alimentadas en la succión por igual número de bombas booster (reforzadoras), las cuales le suministran el caudal y presión requeridos para que estas no caviten y cumpla con el NPSH²⁰ requerido. Tres de estas bombas (P-3251, P-3252 y P-3253), tienen una capacidad de 25.000 Barriles por día @ 3600 rpm, accionadas por motor eléctrico de 1250 HP, y están provistas de variador de velocidad por frecuencia, lo que le permite tener un rango de operación, de acuerdo a las necesidades que demande el campo en determinado momento, las restantes tres bombas (P-3254, P-3255 y P3256) tienen una capacidad de 30.000 Barriles por día de inyección de agua @ 3600 rpm, accionadas cada una de ellas por un motor eléctrico de 1500 HP y son de una sola velocidad, mediante arrancador suave tipo Benshaw.

Cada sistema consiste de las siguientes subunidades:

- Motor eléctrico
- Bomba Booster
- Bomba de inyección de agua (Incluye cámara de empuje).
- Sistema de lubricación
- Instrumentación y protecciones asociadas (vibración, temperatura, presión, flujo, etc.).

El funcionamiento es el siguiente: el motor eléctrico transmite el movimiento a la cámara de empuje, y de esta se transmite la potencia y el movimiento a la bomba, a través de acoples directos. La bomba está compuesta de varias etapas (34

²⁰ NPSH: Se refiere a Net Positive Suction Head, la cual es la energía mínima requerida por una bomba en la succión, para que no se generen procesos de cavitación.

etapas para las bombas de 25.000 BPD y 25 etapas para las bombas de 30.000 BPD).

En la siguiente figura se puede apreciar cómo está conformado cada sistema de inyección de agua:

Figura 63. Componentes del sistema horizontal de inyección de agua.



Fuente. Capacitación sistemas horizontales inyección de agua La Cira Infantas. ECOPETROL S.A.

5.8.1 Motor Eléctrico. El motor eléctrico es el encargado de transmitir la potencia y el movimiento a la bomba. Es un motor eléctrico, asíncrono, jaula de ardilla.

Características del motor:

- Potencia: 1250 y 1500 HP
- Corriente alterna: AC
- Fabricante: Siemens

- Velocidad Variable (1250 HP)
- Velocidad Fija (1500 HP)
- 3600 RPM, 4160 V, 120 A
- Unidad accionada: Bomba centrífuga multietapas
- Motor de inducción:
- Cojinetes
- Enclosure
- Ventilador rejilla para ingreso de aire
- Filtros de aire
- Tiene graseras de desfogue

El motor consiste, a su vez de;

Motor eléctrico: Estator/rotor, cojinetes radiales de bolas, ventilador, circuito de potencia contactor.

Control y monitoreo: Controlador, secuenciador de arranque (PLC Allen Bradley) / Relé de control y protección.

Sistema de lubricación: Grasa (Polyrex en Mobil)

5.8.1.1 ¿Cómo funciona? Energizando el bobinado del estator desde el circuito de potencia (Contactor, Fusible) se genera un campo magnético que se invierte a la frecuencia de línea. Esto producirá una fuerza electromotriz inducida en el rotor. La oposición entre estos campos producirá el giro del motor y la consiguiente generación de movimiento.

El motor cuenta con protecciones, como son: RTD's en cada uno de los cojinetes y temperatura en el devanado y en el estator.

- Sensores/Switches instalados en motor y bomba

Arranque automático de la bomba

Parada de emergencia

Switch de presión succión

Switch de presión en la descarga

Switch de vibración en la cámara de empuje.

Switch de presión de lubricación a la cámara de empuje

Indicador de nivel de aceite en la cámara de empuje

Transmisor de temperatura en la cámara de empuje

Transmisor de flujo en la descarga de la bomba

Transmisor de vibración en el motor eléctrico

El PLC recibe señales de Switches instalados en el equipo.

5.8.1.2 ¿Cómo Trabaja? El Relé de Protección MP 3000 Cuttler Hammer recibe señales de 2 vías:

- RTD'S instalados en bobinados y rodamientos del Motor Eléctrico (Siemens 1500 HP)

- Señales del PLC– Controlador/Secuenciador de Arranque Allen Bradley.

A partir de la información (señales analógicas) recibida el Relé puede efectuar un “disparo” al Circuito de Potencia del Motor (4160V) abriendo, separando los contactores de Cámara de Extinción, interrumpiendo el paso de la corriente de Alta Tensión. La energía del Circuito de Potencia puede ser establecida por Reset de acuerdo al estado del Valor Sensado (Temporal o permanente), condicionando un nuevo arranque.

5.8.2 Bomba Booster (reforzadoras). Es una bomba centrífuga de una sola etapa, marca Goulds modelo 3700, que gira a 1800 rpm y una potencia de 50 HP, accionada por motor eléctrico, succiona de los tanques de cabeza a una presión de 5-10 psig y descarga a una presión de 50-80 psig, la cual es la presión requerida en la succión la bomba principal Centrilift de inyección de agua, cuenta con transmisor de flujo y transmisores de presión en la succión y en la descarga.

5.8.2.1 Bomba Centrífuga multietapas de Inyección de agua. Luego de recibir el movimiento y la potencia del motor, recibe el agua de la bomba booster, y hace pasar el flujo, a través de las 25 o 34 etapas, según sea la capacidad de la bomba, esta provista de una cámara de empuje, la cual está conformada internamente por rodamientos cónicos, y un cojinete principal de empuje axial, la función principal de la cámara de empuje, es soportar el empuje axial que se genera como consecuencia de las altas presiones de descarga que sufre este equipo (2000 psig), esta provista además, de protecciones, tanto de vibración, como de temperatura y presión de aceite, el cual es el medio de lubricación de sus componentes internos, la bomba tiene impulsores de flujo mixto y cada impulsor lleva un difusor, el flujo pasa a través de cada etapa, generando incremento de presión entre la etapa anterior y la posterior, lo cual genera la presión de descarga requerida (2000 psig), todos los impulsores están solidarios al eje a través de cuñas y esta soportado por unos bujes de metalurgia especial, lo que hacen que la bomba se estabiliza. Las bombas por lo general están compuestas de dos cuerpos, generalmente uno es el de baja presión (el más cercano al motor) y el que se encuentra más próximo a la descarga, corresponde al cuerpo de alta presión, los dos cuerpos, el de alta y el de baja presión se acoplan a través de un elemento mecánico tipo estriado (Coupling) que permite que se transmita la potencia y el movimiento de un cuerpo al otro. La bomba es lubricada con el

mismo fluido de trabajo y del cuerpo de la bomba se toma una línea que alimenta al sello mecánico para el enfriamiento de este.

- **Características principales del equipo:**

Accionado por motor eléctrico

Tipo bomba: Centrifuga multietapas horizontal

Fluido: Agua de reinyección

Presión de succión: 40-80 psig

Presión de descarga: 1900-2000 psig

No etapas: 25 (flujo de 30 KBPD) y 34 (Flujo de 20 KBPD)

Refrigeración: Fluido de trabajo

Flujo: 20.000 y 30.000 Barriles por día

- **Sistema de lubricación de la cámara de empuje**

La cámara de empuje por la velocidad de giro y por la carga axial generada por la bomba, requiere de un sistema de lubricación robusto y confiable, está compuesto básicamente de un reservorio, un filtro de aceite, una bomba de desplazamiento positivo tipo Gear pump, mangueras y enfriador de aceite, cuenta con switch de presión y de temperatura, esta provista de switch de vibración, lo cual la protege si el equipo percibe una vibración superior a 0.5 in/s, enviando la orden de apagado.

5.9 DEFINICION DE FUNCIONES

El siguiente paso consiste en la definición de las funciones, clasificándolas en funciones principales y funciones secundarias.

Las funciones definidas para la planta de inyección de agua.

5.9.1 Funciones principales PIA 3

1. Recibo de 120.000 BAPD, agua de producción proveniente de la estación LCI 3ª en los tanques K-3011/3012 de 8.550 Bls cada uno.
2. Filtración de 120.000 BAPD en 4 filtros Petreco de 40.000 BAPD cada uno a través de un lecho filtrante de cascara de nuez.
3. Bombeo de 120.000 BAPD de reinyección al anillo principal del campo específicamente al área Cira Este.

5.9.1.1 Definición de funciones del sistema de inyección de agua. Las funciones definidas por el equipo natural de trabajo, fueron:

- Bombear el agua de inyección de alta presión: bombas horizontales centrífugas y multietapas (25 y 34 etapas), dentro de los límites funcionales de presión y caudal.
- Motor eléctrico para Suministrar movimiento para impulsar las bombas y generar potencias de 1500 Hp, @ 3600 rpm y 4160 Voltios a la bomba (dentro de unas condiciones de operación) Sistema de Control, vigilancia y protección del conjunto de bomba de alta presión (variador, motor, flujo de descarga (válvulas de descarga), sistema de lubricación (bomba de aceite)
- Proveer el acople efectivo entre el motor y la cámara de empuje y entre bomba de baja presión y alta presión.
- Lazo de control de flujo mínimo de la bomba: ser capaz de parar la bomba, cuando se tenga baja presión de succión, alta presión de descarga, alta vibración cámara de empuje o alta temperatura en la cámara de empuje.
- Sistema Variador (regular la velocidad de la bomba para el caudal en condiciones de operación).

- Sistema de Lubricación: Suministrar el aceite a la presión requerida (26-28 psig) a la cámara de empuje y realizar un enfriamiento adecuado del aceite de lubricación.

5.10 ANALISIS DE MODOS DE FALLA Y EFECTOS –FMEA

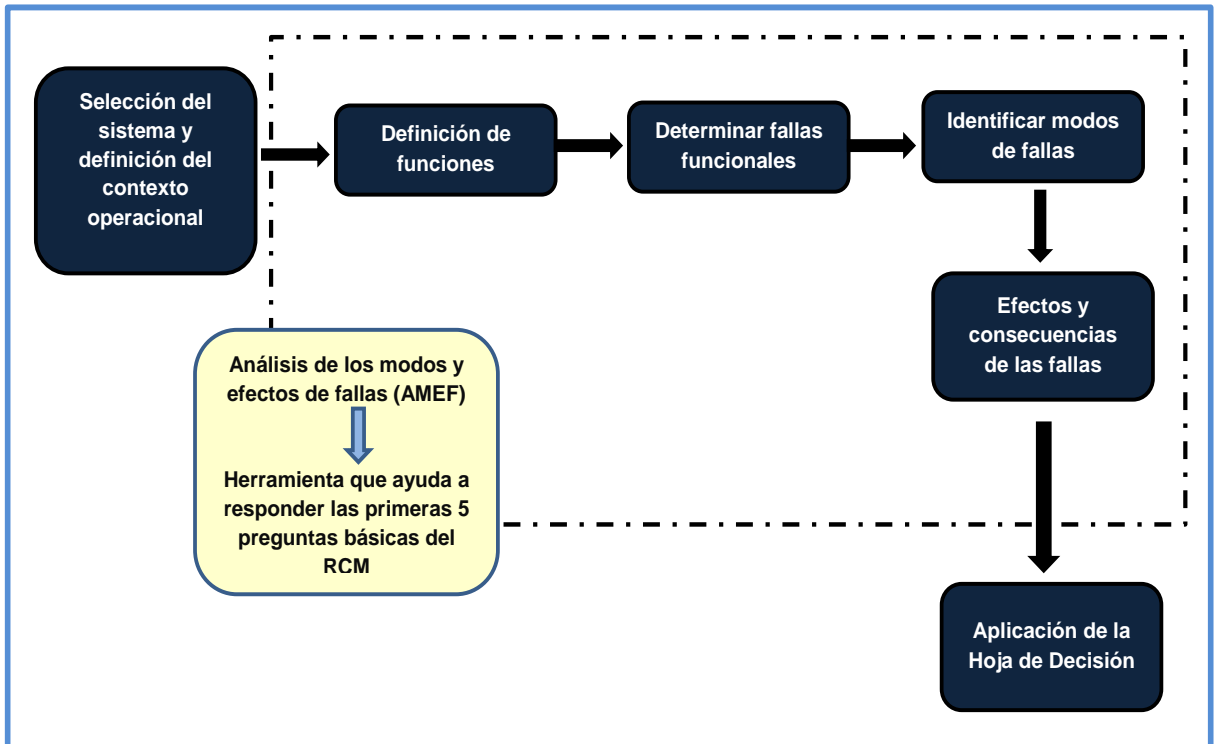
El análisis de los Modos y Efectos de Fallas (AMEF), constituye la herramienta principal del RCM, para la optimización de la gestión de mantenimiento en una organización determinada. El AMEF es un método sistemático que permite identificar los problemas antes que estos ocurran y puedan afectar o impactar a los procesos y productos en un área determinada, bajo un contexto operacional dado. Hay que tener presente que la realización del AMEF, constituye la parte más importante del proceso de implantación del RCM, a los distintos activos/equipos en su contexto operacional, se obtendrá la información necesaria para poder prevenir las consecuencias o efectos de las posibles fallas, a partir de la selección adecuada de actividades de mantenimiento, las cuales actuarán sobre cada modo de falla y sus posibles consecuencias.

El objetivo del AMEF, es encontrar todas las formas o modos en los cuales puede fallar un activo dentro de un proceso, e identificar las posibles consecuencias o efectos de las fallas en función de tres criterios básicos para el RCM: seguridad humana, ambiente y operaciones (producción). Para poder cumplir con este objetivo, los grupos de trabajo de RCM, deben analizar el AMEF siguiendo la siguiente secuencia:

- Explicar las funciones de los activos del área seleccionada y sus respectivos estándares de ejecución.
- Definir las fallas funcionales asociadas a cada función del activo.
- Definir los modos de fallas asociados a cada falla funcional.

- Establecer los efectos o las consecuencias asociadas a cada modo de falla.

Figura 64. Flujoograma para el desarrollo del AMEF.



Fuente. Curso Básico de RCM. Carlos Parra Marquez. INGEMAN.

5.10.1 FMEA. Definición de Fallos funcionales. Una vez han sido definidas las funciones que cada activo debe cumplir en un contexto operacional definido, el siguiente paso es definir cómo ese activo deja de cumplir sus funciones. La pérdida de la función es lo que en RCM se denomina *fallo funcional*.

Un *fallo funcional* se define como una ocurrencia no previsible, que no permite que el activo alcance el funcionamiento esperado en el contexto operacional en el cual se desempeña. El nivel de insatisfacción producido por causa del fallo funcional dependerá de las consecuencias que pueda generar la aparición de dicho fallo

dentro del contexto operacional. Los diferentes fallos funcionales pueden incidir sobre una función de forma parcial o total. La pérdida total de la función ocurre cuando un activo se detiene por completo de forma inesperada. La pérdida parcial ocurre cuando el activo no puede alcanzar el estándar de ejecución esperado, es decir, cuando opera de forma ineficiente o fuera de los límites tolerados.

La definición precisa de un fallo funcional para un activo depende en gran parte del contexto operacional del mismo, por lo que activos idénticos pueden sufrir diferentes fallos funcionales si el contexto operacional es diferente.

5.10.2 FMEA. Definición de modos de falla. Las funciones de los activos en el contexto operacional y los fallos funcionales dictaran el nivel al cual es requerido el mantenimiento o en otras palabras la definición clara de estos conceptos permitirá establecer los objetivos del mantenimiento con respecto a los activos en su actual contexto operacional.

Los fallos funcionales tiene causas físicas que originan la aparición de las mismas, estas causas son lo que la metodología RCM define como *modos de falla* (causas físicas que provocan las fallas funcionales totales o parciales). Las actividades de prevención, anticipación o corrección según el RCM, deben estar orientadas a atacar modos de falla específicos. Esta afirmación, constituye una de las mayores diferencias entre el RCM y forma tradicional de gestionar el mantenimiento, es decir, que para el RCM, las actividades de mantenimiento generadas a partir del análisis realizado por el grupo de trabajo RCM, atacaran específicamente a cada uno de los modos de falla asociados a cada falla funcional (*cada falla funcional puede tener más de un modo de falla*).

El nivel al cual se gestiona el mantenimiento de un activo, se relaciona con el nivel al cual se identifica el modo de falla. Muchas veces el nivel al cual se identifica el modo de falla no corresponderá al nivel de detalle seleccionado para analizar el

activo y sus funciones, por lo cual, para poder desarrollar un sistema de gestión de mantenimiento de un determinado grupo de activos en un contexto operacional, es necesario identificar el nivel al cual se producirán los distintos modos de falla asociados a las funciones de un activo en su actual contexto operacional.

En el proceso de análisis de modo de falla, el grupo de trabajo que se estableció, definió los modos de falla, basados en:

- Listas genéricas de modos de falla.
- Personal de operación y/o mantenimiento que haya tenido una larga asociación con el activo.
- Registros e historiales técnicos existentes en el activo.
- Fabricantes y vendedores de los equipos.
- Otros usuarios del mismo activo.

El equipo que se tomó para el análisis FMEA, y para la selección de las tareas fue la bomba P-3251, por ser una de las bombas que cuenta con variador de frecuencia por velocidad.

Para los demás equipos, como por ejemplo, las bombas P-3254/55/56, se tomara el mismo análisis, y se harán variaciones en los costos de mantenimiento, por ser bombas de 34 etapas, y los costos pueden ser un poco mas altos.

5.10.3 FMEA. Definición de los efectos y consecuencias de los modos de falla. En esta parte del proceso, el objetivo principal del grupo de trabajo consistió en identificar lo que sucederá en el contexto operacional cuando ocurre el modo de falla previamente identificado. La identificación de los efectos del modo de falla se incluyó toda la información necesaria que ayude a soportar la evaluación de las *consecuencias de las fallas*. Para identificar y describir de forma precisa los

efectos producidos por cada modo de falla, el grupo de trabajo definió y respondió las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo se evidencia (si puede ser evidente) que un modo de falla ha ocurrido?

La descripción del efecto del fallo deberá especificar si la ocurrencia del modo de falla se evidencia a partir de algún tipo de señal o de manifestación física (síntomas: como ruido, humo, señales de variables operacionales, alarmas, etc.).

2. ¿Cómo podría afectar la ocurrencia de cada modo de falla a la seguridad humana o al ambiente?

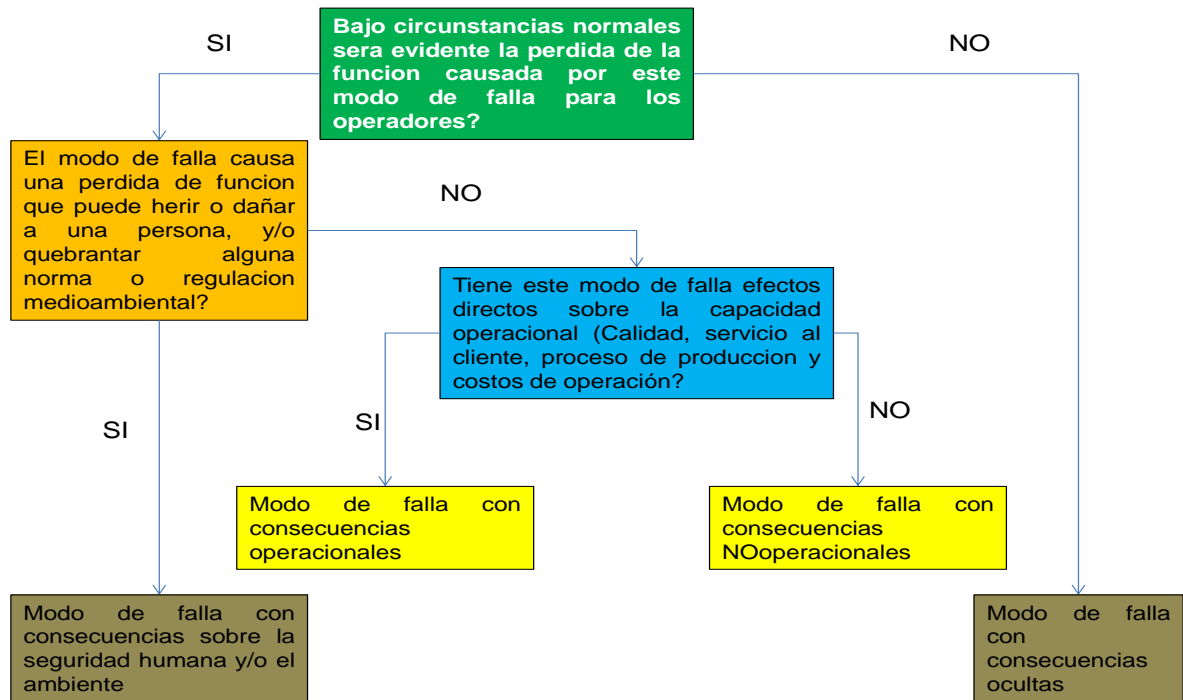
Se debe detallar si existe la posibilidad de que alguna persona puede resultar herida o pueda incumplirse alguna norma ambiental. Normalmente, estos modos de falla aparecen por la mala operación de los equipos, caídas de objetos, presiones excesivas de trabajo, derrames de sustancias químicas, etc., y suelen ser inusuales gracias al avance en el diseño moderno de las instalaciones y sus equipos.

3. ¿Cómo afectaría la ocurrencia de cada modo de falla a la producción y las operaciones?

Para decidir cuál es la mejor actividad de mantenimiento a ejecutar sobre los activos, es necesario que el grupo de trabajo tenga claramente definido la naturaleza y severidad de las consecuencias de los modos de falla dentro del proceso de producción (se recomendó cuantificar el impacto económico de cada modo de falla). Se describió de forma clara si el modo de falla conllevaba el impacto en la producción.

Las consecuencias de los modos de falla se determinaron, apoyándose en el siguiente diagrama, ver figura.

Figura 65. Diagrama de flujo para determinar consecuencias de modos de falla.



Fuente. PARRA MARQUEZ, Carlos y CRESPO MARQUEZ, Adolfo. Ingeniería de Mantenimiento y Confiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos.

Para la descripción de los efectos se diseñó una guía de preguntas que permiten clasificar la evaluación de las consecuencias de los modos de falla:

1. ¿Qué evidencias hay de que ocurrió la falla?
2. ¿De qué manera afecta la seguridad y al ambiente?
3. ¿De qué manera afecta la producción?
 - 3.1 ¿Cuáles son los efectos operacionales?
 - 3.2 ¿Es necesario parar el proceso?
 - 3.3 ¿Hay impacto en la calidad? ¿Cuánto?
 - 3.4 ¿Hay impacto en el servicio al cliente?
 - 3.5 ¿Se producen daños a otros sistemas?

3.6 ¿Qué tiempo se requiere para reparar la falla (acciones correctivas)?

3.7 ¿Cuánto es la pérdida económica por la falla (costos directos, impacto en producción, costos en seguridad y ambiente, etc.?)

5.11 SELECCIÓN DE LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO (ARBOL LOGICO DE DECISION)

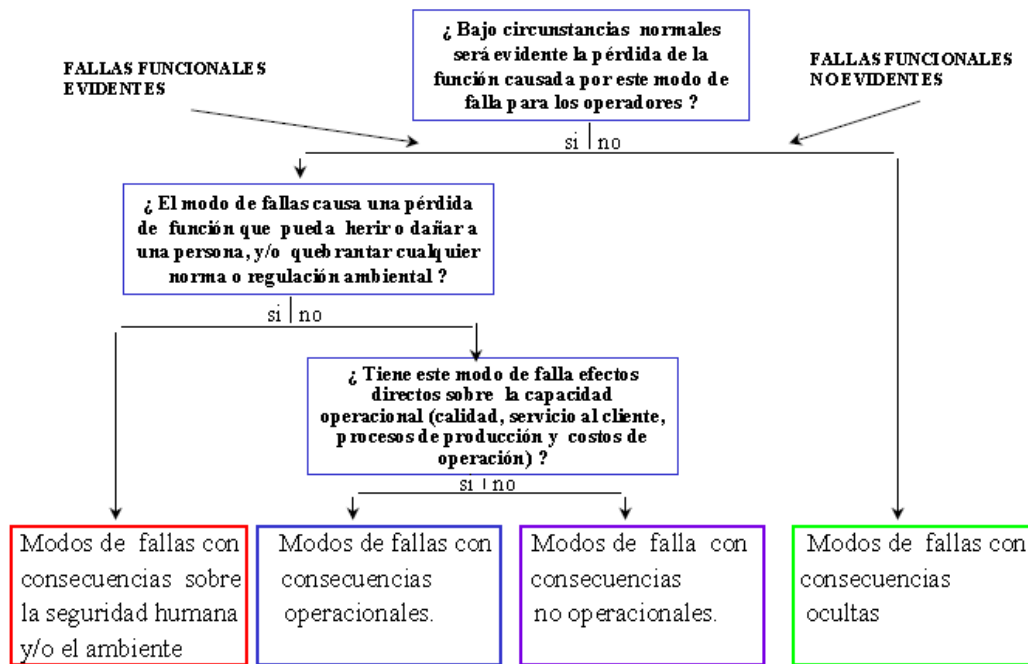
Una vez realizado el FMEA, el equipo natural de trabajo, deberá seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento que ayude a prevenir la aparición de cada modo de falla previamente identificado, a partir del árbol lógico de decisión del RCM, para esto se empleó el árbol de decisión establecido en la norma SAE JA1012, esta herramienta permite seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento más adecuada para evitar los posible efectos de cada modo de falla. Luego de seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento seleccionada a partir del árbol lógico de decisión, se tiene que especificar la acción de mantenimiento seleccionada, con su respectiva frecuencia de ejecución, teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales del RCM, es evitar o al menos reducir las posibles consecuencias a la seguridad humana, al ambiente y a las operaciones, que traerán consigo la aparición de los distintos modos de falla.

El equipo de trabajo debe identificar el tipo de actividad de mantenimiento, apoyándose en el árbol lógico de decisión del RCM (Ver figura 68). Una vez se ha seleccionado el tipo de actividad adecuada, se procede a especificar la acción de mantenimiento concreta a ejecutar y la frecuencia de ejecución de la misma.

El diagrama de decisión, basado en la norma SAE JA1012, está dividido en dos partes, la parte de la izquierda, se refiere a modos de falla, que en condiciones normales para operaciones, resultan evidentes, y la parte derecha, se refiere a aquellos modos de falla, que en condiciones normales, no son evidentes para operaciones (modos de falla ocultos).

El primer paso para seleccionar las actividades de mantenimiento, consiste en identificar las consecuencias que generan los modos de fallas:

Figura 66. Identificación de las consecuencias de los modos de fallas.



Fuente. Norma SAE JA1012.

El RCM clasifica las actividades de mantenimiento a ejecutar en dos grandes grupos, las actividades preventivas y las actividades correctivas, estas últimas, se ejecutarán solo en el caso de no encontrar una actividad efectiva de mantenimiento preventivo. Cada grupo de actividades de mantenimiento, tiene sus respectivos tipos de tareas de mantenimiento, los cuales se mencionan a continuación:

5.11.1 Actividades Preventivas

5.11.1.1 Tareas programadas en base a condición. Las actividades programadas en base a condición (predictivas), se basan en el hecho de que la

mayoría de los modos de fallas no ocurren instantáneamente, sino que se desarrollan progresivamente en un periodo de tiempo. Si la evidencia de este tipo de modos de fallas puede ser detectada bajo condiciones normales de operación, es posible que se puedan tomar acciones programadas en base a la condición del equipo, que ayuden a prevenir estos modos de falla y/o eliminar sus consecuencias.

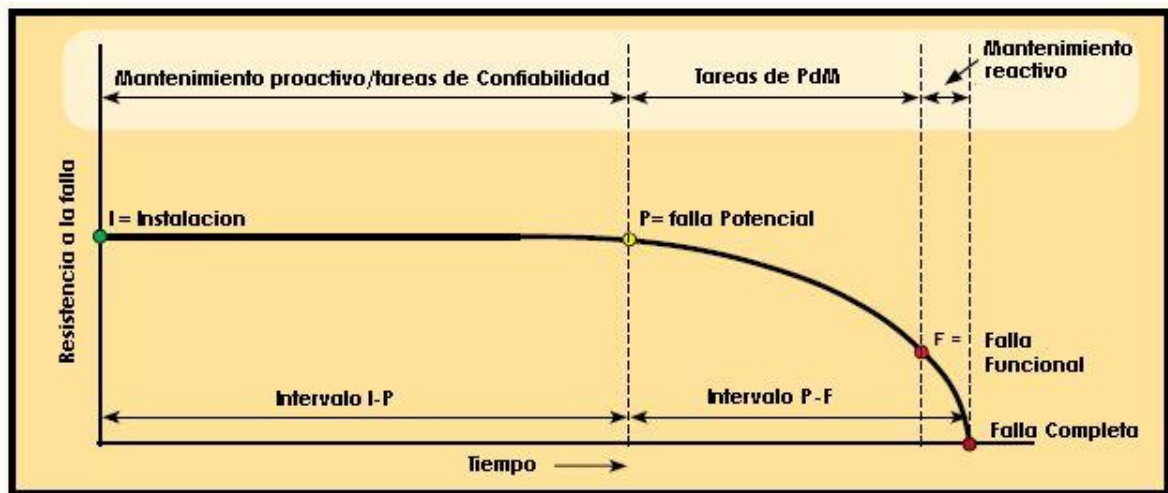
El momento en el proceso en el cual es posible detectar que la falla funcional está ocurriendo o está a punto de ocurrir es conocido como falla potencial. De esta forma se puede definir falla potencial: como una condición física identificable la cual indica que la falla funcional está a punto de ocurrir o que ya está ocurriendo dentro del proceso. Entre los ejemplos más comunes de fallas potenciales tenemos:

- Lecturas de vibración que indiquen inminentes fallas en los cojinetes o rodamientos de un equipo rotativo, como bomba, compresor o motor.
- Grietas existentes en metales indican inminentes fallas por metales fatigados.
- Partículas en el aceite de una caja de engranajes, indican inminentes fallas en los dientes de los engranajes.
- Puntos calientes indican deterioro en el material refractario del hogar de una caldera, etc.

El comportamiento en el tiempo de gran parte de los distintos tipos de modos de fallas se ilustra en la figura 67. Curva del comportamiento de las fallas potenciales. En esta figura, se muestra como una falla empieza a ocurrir (punto de inicio "I", muchas veces este punto no puede ser detectado), incrementado su deterioro hasta el punto en el cual la falla puede ser detectada (punto de falla potencial "P"). Si en este punto la falla no es detectada y corregida, continua aumentando su

deterioro (usualmente de forma acelerada) hasta que alcanza el punto donde se produce la falla funcional (punto “F”, el activo ha dejado de cumplir su función).

Figura 67. Curva de comportamiento de las fallas potenciales.



Fuente. Los Autores.

5.11.1.3 Tareas de reacondicionamiento. Son actividades periódicas que se llevan a cabo para restaurar un activo (sistema, equipo, parte) a su condición original. En otras palabras las actividades de restauración programada, son aquellas actividades de prevención realizadas a los activos (en la mayoría de los casos equipos mayores) a un intervalo frecuencial menor al limite de vida operativo del activo, en función del análisis de sus funciones en el tiempo. En este tipo de actividades de mantenimiento preventivo, los activos son puestos fuera de servicio, se desarman, se desmontan, se inspeccionan de forma general y se corrigen y reemplazan de ser necesario, partes defectuosas, con el fin de prevenir la aparición de posibles modos de fallas. Las tareas de restauración programadas son conocidas como “overhauls”, y su aplicación mas común es en equipos mayores: compresores, turbinas, calderas, hornos, bombas de multiples etapas, motores de combustión interna y eléctricos.

5.11.1.4 Tareas de sustitución – reemplazo programado. Este tipo de actividad preventiva está orientada específicamente hacia el reemplazo de componentes o partes usadas de un activo, por unos nuevos a un intervalo de tiempo menor al de su vida útil (antes de que fallen). Las actividades de descarte programado le devolverán la condición original al componente, ya que el componente viejo será reemplazado por uno nuevo. La diferencia entre las tareas de descarte programado y las tareas de restauración programada es que las primeras son aplicadas a componentes y/o partes de un activo y no a activos complejos (activos con varios componentes), y a su vez la acción de ejecutar en las tareas de descarte programado es específicamente el reemplazo de un componente viejo por uno nuevo. En el caso de las tareas de restauración programada las acciones a ejecutar pueden ser: ajustar, inspeccionar, mejorar, limpiar, restaurar y hasta cambiar partes viejas por nuevas.

5.11.1.5 Tareas de búsqueda de fallas ocultas. Como se ha mencionado anteriormente, los modos de fallas ocultos, no son evidentes bajo condiciones normales de operación, por lo cual este tipo de fallas no tienen consecuencias directas, pero las mismas propician la aparición de fallas en un determinado contexto operacional. Uno de los caminos que puede ayudar a minimizar los posibles efectos de una falla múltiple es tratar de disminuir la probabilidad de ocurrencia de las fallas ocultas, chequeando periódicamente si la función oculta está trabajando correctamente. Estos chequeos son conocidos como las tareas de búsqueda de fallas ocultas.

En conclusión, las tareas de búsqueda de fallas ocultas, consiste en realizar chequeos, inspecciones, pruebas funcionales a los activos con funciones ocultas, a intervalos regulares de tiempo, con el fin de detectar si dichas funciones ocultas se encuentran en estado normal de operación o en estado de falla.

5.11.2 Actividades correctivas. Cuando las actividades de mantenimiento preventivo para un determinado modo de falla, no son técnicamente factibles o no son efectivas, las actividades correctivas serán las que se apliquen. Las acciones correctivas a ser ejecutadas en el caso de no conseguir ninguna actividad de prevención, serán:

- **Rediseño:** en el caso que no se consigan actividades de prevención que ayuden a reducir los modos de fallas que afecten a la seguridad o al ambiente a un nivel aceptable, es necesario realizar un rediseño que minimice o elimine las consecuencias de los modos de fallas.
- **Actividades de mantenimiento no programado:** en el caso que no se consigan actividades de prevención económicamente más baratas que los posibles efectos que traerán consigo los modos de fallas con consecuencias operacionales o no operacionales, se podrá tomar la decisión de esperar que ocurra la falla y actuar de forma correctiva.

5.12 ANALISIS COSTO BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACION DEL RCM EN LA PIA 3.

La implementación del RCM, produce muchos beneficios, uno de ellos, es por ejemplo, en cuanto a costos de mantenimiento, comparado con otras metodologías tradicionales, como por ejemplo un plan de mantenimiento basado en recomendaciones dadas por el fabricante.

A continuación, mencionaremos algunos casos en donde se pueden encontrar potenciales ahorros de costos de mantenimiento, con la implementación de la metodología RCM.

Caso 1: Un modo de falla tradicionalmente se manejaba con un mantenimiento preventivo. En el análisis grupal de RCM se determina que existe un predictivo que es técnicamente posible y merece la pena.

En efecto: el preventivo requería el recambio de una pieza cada seis meses.

Esta tarea insumía dos horas de trabajo cotizadas a US\$ 40 /hora y un repuesto que cuesta US\$ 180.

Es decir que cada vez que se ejecuta la tarea, su costo es de US\$ 260, y como se realiza dos veces por año, el costo anual de este preventivo es de US\$ 520.

El predictivo por el cual se propone reemplazarlo, permite esperar un MTBF (Tiempo Medio Entre Fallos) de ocho meses.

Por consiguiente el reemplazo a condición de que aparezca el Fallo Potencial, ocurrirá en promedio 1,5 veces por año.

El costo del reemplazo sería idéntico por vez, ya que requerirá la misma mano de obra y el mismo repuesto.

Ahora el costo anual será de $1,5 \times 260 = 390$, o sea US\$ 130/año menos que históricamente.

Este ejercicio se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 14. Caso 1 Ahorros costos de mantenimiento.

ANTES:		
Preventivo, dos veces/año		
Mano de Obra	2 hrs x US\$ 40/hr = US\$ 80	
Repuesto	US\$ 180	
Total por rutina	US\$ 260	
Total/año	US\$ 520	Suponiendo que la rutina es semestral
NUEVO:		
Predictivo (MTBF: 8 Meses)		
Verificación cada 3 meses		
Mano de Obra	Operario presente	
Reparación a condición	US\$ 260	
Total/año (x 1,5)	US\$ 390	
AHORRO por pasar de preventivo a predictivo		US\$ 130/año

Fuente. Los Autores.

En este caso, si en la planta, existen varios equipos que cumplan esta condición, el ahorro será aún mucho mayor.

Caso 2: Un modo de falla en una bomba de inyección, se realizaba con mantenimiento correctivo (es decir no se hacía nada para prevenirlo, y se reparaba cuando se producía). Al proceder de esta manera, la mano de obra requerida eran cuatro horas, y los repuestos cuestan US\$ 500. Ya sabemos que sea correctivo o predictivo, estos costos serán los mismos. Sin embargo, cuando se hacía el correctivo, se incurría en los siguientes costos adicionales:

- a) Diferida de producción, como consecuencia de la No inyección de agua, por esta bomba, la bomba, tenía una capacidad de inyección de 30.000 Barriles/día, y asociado tenía una producción de crudo de 1 barril por cada 10 barriles de agua inyectados a la formación, por consiguiente la consecuencia era una diferida asociada de 3000 barriles de crudo. Asumiendo un costo del barril de US\$ 50. Se tiene un costo por diferida de producción de: $(3000/24)*4*US\$50 = US\25.000 .

Al descubrir un predictivo, esta diferencia fue ahorrada, ya que permitía ahorrar el tiempo y costo de la mano de obra, como del repuesto y evitar la diferida en inyección de agua. Puesto que se trata de una falla que ocurre en promedio dos veces por año, la economía anual resulta de US\$ 51.000.

El Predictivo, implica un técnico CBM, cuyo servicio cuesta US100. Suponiendo que con el predictivo, se tenga un MTBF de 1 vez al año, se tiene un ahorro, de US\$ 50.900 al año.

Sin embargo se pueden mencionar algunos otros casos frecuentes en forma genérica:

- 1) Un preventivo que genera mayor costo anual que "dejar que se rompa".

- 2) Un correctivo que puede ser ejecutado por el mismo operador, en lugar de esperar al mecánico y distraer tiempo de mano de obra de mayor costo y que puede ser mejor aprovechado en otra tarea de mantenimiento más costo-eficaz.

- 3) Un correctivo que implica costos suficientemente altos como para justificar claramente un rediseño.

- 4) Un fallo oculto que de no ser detectado oportunamente genera consecuencias de alto costo, totalmente evitables con la detección. (“Búsqueda de fallo”).

- 5) Un preventivo que no es técnicamente viable en términos de RCM porque el componente que falla no tiene una vida útil determinada (no responde al patrón de fallo tradicional de “vida útil”, o no es coherente, o no es conocido). Un preventivo que desestabiliza (o arriesga desestabilizar) un proceso en funcionamiento de régimen normal).

- 9) El recambio preventivo de una pieza que de hecho presenta una alta probabilidad de “mortandad infantil.

6. CONCLUSIONES

Hay que tener claro que el proceso de implementación del RCM, no traerá consigo resultados inmediatos, los mismos podrán cuantificarse y evaluarse de forma segura y confiable en un periodo de tres años aproximadamente. Por lo cual este debe ser un proyecto de largo alcance y con visión de futuro.

El RCM ha sido útil en la optimización de la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos, al tiempo que reducen los costos de mantenimiento para partes y la labor y tiempo de inactividad para el mantenimiento planificado.

Si el RCM se usa correctamente para volver a evaluar los requisitos de mantenimiento de los equipos existentes, transformará ambos requisitos y la forma en que se percibe la función del mantenimiento como operación total. El resultado es un mantenimiento menos costoso, más armonioso y más eficaz.

De nada sirve un análisis de RCM si no se aplica de manera adecuada; sin planeación y programación bien aplicadas; sin gestión de compras, inventarios y almacenes bien enfocados; sin mantenedores competentes, eficientes y eficaces; sin un buen sistema de información para mantenimiento por computador y sin la voluntad de cambiar y vencer los paradigmas.

El proceso RCM, es un proceso dinámico, que se encuentra enmarcado dentro del ciclo PHVA, Planear-Hacer-Verificar-Actuar, esto implica que es un proceso que debe ser revisado, cada dos años, en el cual se haga una actualización y una revisión general de todo el proceso, así como una validación de todas las tareas, ya que si recordamos las funciones, fallas funcionales, modos de falla y asignación de tareas, se encuentran basados y fundamentados en un contexto operacional definido, y es muy factible, que este cambie con el tiempo, debido a cambios en

los niveles de producción, calidad y características del agua de inyección, condiciones de presión en el anillo de inyección, que requieren que el contexto operacional sea modificado y adaptado a las nuevas condiciones requeridas.

El proceso RCM requiere no solo de la definición de funciones, fallas funcionales y modos de falla a ser analizados, y tampoco termina con la definición de todas las tareas de mantenimiento establecidas, sino que éste debe ser implementando completamente en el sistema de administración del mantenimiento, que para el caso de ECOPETROL, es Ellipse, el verdadero éxito de esta metodología, radica en que se encuentre implementando en el CMMS, y no quede solo en el papel.

Es importante, que para lograr el éxito y los resultados esperados, se requiere de la participación de todo el equipo facilitador: Ingenieros de mantenimiento, supervisores, planeadores y programadores de mantenimiento, personal de operaciones, ingeniería, proyectos, personal de HSE y todas aquellas personas que se consideren importantes en la participación en cada uno de los talleres programados.

Además del proceso RCM, se definieron indicadores de gestión de mantenimiento claves que permitirán medir la calidad de los trabajos de mantenimiento, el mejor indicador para medir la confiabilidad es el tiempo medio entre fallas (MTBF), un incremento en el MTBF indica directamente un incremento en la confiabilidad del equipo y mejora en la calidad de los trabajos de mantenimiento.

BIBLIOGRAFIA

BLOOM, Neil, RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE Implementation Made Simple.

IEC 60300-3-11, Application Guide –Reliability Centred Maintenance.

Instructivo general de operaciones de la planta de inyección PIA-3. PCG-I-003.

ISO 14224, Petroleum and natural gas industries —Collection and Exchange of Reliability and Maintenance data for equipment.

MORA GUTIERRÉZ, Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo, 2012.

MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004.

NOWLAN STANLEY, F y HEAP F. HOWARD, Reliability - Centered Maintenance, 1978.

ORTIZ PLATA, Daniel. Curso Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM.

PEREZ J, Carlos Mario. Gerencia de Mantenimiento – Sistemas de Información. Soporte y CIA Ltda – Colombia.

SAE JA1011, Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance.

SAE JA1012, A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard.

SMITH, Anthony y HINCHCLIFFE, Glenn, RCM- Gateway to World Class Maintenance.

ANEXOS

ANEXO A. CLASIFICACIÓN DE CRITICIDAD DE LOS EQUIPOS PIA 3.

DESCRIPCION EQUIPOS	TAG	FRECUENCIA	IMPACTO OPERACIONAL	FLEXIBILIDAD	COSTOS DE MANT.	IMPACTO SHA	CONSECUENCIAS	TOTAL	CRITICIDAD
MOTOBOMBA BOOSTER P3231 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3231	4	6	4	1	1	26	104	CRITICO
MOTOBOMBA BOOSTER P3232 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3232	4	6	4	1	1	26	104	CRITICO
MOTOBOMBA BOOSTER P3233 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3233	4	6	4	1	1	26	104	CRITICO
MOTOBOMBA BOOSTER P3234 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3234	4	6	4	1	1	26	104	CRITICO
MOTOBOMBA BOOSTER P3235 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3235	4	6	4	1	1	26	104	CRITICO
MOTOBOMBA BOOSTER P3236 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3236	4	6	4	1	1	26	104	CRITICO
MOTOBOMBA DE INYECCION C/LIFT P3251 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3251	4	6	4	2	1	27	108	CRITICO
MOTOBOMBA DE INYECCION C/LIFT P3252 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3252	4	6	4	2	1	27	108	CRITICO
MOTOBOMBA DE INYECCION C/LIFT P3253 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3253	4	6	4	2	1	27	108	CRITICO
MOTOBOMBA DE INYECCION C/LIFT P3254 PLANTA DE	EPIA3P3254	4	6	4	2	1	27	108	CRITICO

INYECCION No 3 LCI									
MOTOBOMBA DE INYECCION C/LIFT P3255 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3255	4	6	4	2	1	27	108	CRITICO
MOTOBOMBA DE INYECCION C/LIFT P3256 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3256	4	6	4	2	1	27	108	CRITICO
MOTOBOMBA DE AGUA A REPROCESO P3035 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3035	3	1	1	1	1	3	9	NO CRITICO
MOTOBOMBA DE AGUA A REPROCESO P3036 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3036	3	1	1	1	1	3	9	NO CRITICO
MOTOBOMBA DE AGUA A REPROCESO P3037 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3037	3	1	1	1	1	3	9	NO CRITICO
MOTOBOMBA DE AGUA REPROCESO LCI3A P3038 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3038	3	1	1	1	1	3	9	NO CRITICO
MOTOBOMBA DE AGUA REPROCESO LCI3A P3039 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3039	3	1	1	1	1	3	9	NO CRITICO
DECANTADOR D3091 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3D3091	1	8	2	2	1	19	19	NO CRITICO
DECANTADOR D3092 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3D3092	1	8	2	2	1	19	19	NO CRITICO
F3071 FILTRO PETRECO 40KBWPD PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3F3071	2	1	1	2	2	5	10	NO CRITICO
F3072 FILTRO PETRECO	EPIA3F3072	2	1	1	2	2	5	10	NO CRITICO

40KBWPD PLANTA DE INYECCION No 3 LCI									
F3073 FILTRO PETRECO 40KBWPD PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3F3073	2	1	1	2	2	5	10	NO CRITICO
F3074 FILTRO PETRECO 40KBWPD PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3F3074	2	1	1	2	2	5	10	NO CRITICO
MOTOBOMBA DE AGUA A FILTROS P3031 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3031	3	6	1	1	1	8	24	NO CRITICO
MOTOBOMBA DE AGUA A FILTROS P3032 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3032	3	6	1	1	1	8	24	NO CRITICO
MOTOBOMBA DE AGUA A FILTROS P3033 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3033	3	6	1	1	1	8	24	NO CRITICO
MOTOBOMBA DE AGUA A FILTROS P3034 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3P3034	3	6	1	1	1	8	24	NO CRITICO
SISTEMA REDES PLANTA N° 3 INYECCION PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3RC	2	10	4	2	4	46	92	CRITICO
AIRE ACOND OFIC.OPERADOR PIA3 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3SAA	3	1	4	1	1	6	18	NO CRITICO
AIRE ACONDICIONADO 2(MED) PIA3 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3SAA2	3	1	4	1	1	6	18	NO CRITICO
SISTEMAS DETECCIÓN INCENDIOS PLANTA DE	EPIA3SDIN	2	6	4	2	10	36	72	MEDIA CRITICIDAD

INYECCION No 3 LCI									
TANQUE DE RECIBO AGUA FRESCATK3011 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3TK3011	2	10	4	2	4	46	92	CRITICO
TANQUE DE RECIBO AGUA FRESCATK3012 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3TK3012	2	10	4	2	4	46	92	CRITICO
TANQUE DE RECIBO AGUA FRESCATK3211 PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3TK3211	2	10	4	2	4	46	92	CRITICO
MOTOCOMPRESOR IR1 DE AIRE A INS 3920A PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3AC1	3	8	1	2	2	12	36	NO CRITICO
COMPRESOR IR2 DE AIRE A INS 3920B PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3AC2	3	8	1	2	2	12	36	NO CRITICO
SECADOR IR SIST COMPRESION DE AIRE A INS PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3ASE	2	10	4	1	4	45	90	CRITICO
SISTEMA ELECTRICO DE LA PIA3 DE INYEC. PLANTA DE INYECCION No 3 LCI	EPIA3SL	2	10	4	2	1	43	86	MEDIA CRITICIDAD

Fuente. Los Autores.

ANEXO B. HOJA FMEA PARA LOS MODOS DE FALLA DEFINIDOS.

Cód.. Func.	Función	Cód.. FF	Descripción Falla Funcional	Cód.. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos	Frecuencia de eventos por año fallos/año	EVALUACION DE CONSECUENCIAS				Valor del riesgo económico
								H	S	E	O	
1	Bombear el agua de inyección de alta presión: bombas horizontales centrífugas y multietapas (25), dentro de los límites funcionales DE PRESIÓN Y CAUDAL	1A	No bombea el agua de inyección	1A1	Falla del suministro eléctrico	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): se presenta falla en el suministro eléctrico, El motor eléctrico no suministra la potencia requerida a la bomba, como consecuencia ésta se detiene. parada del equipo, con una diferida de 30.000 Bls/día de agua y una diferida asociada a crudo de 3000 Bls/Día, mientras se repone el suministro eléctrico	0,2	N	N	N	Y	M\$ 150
				1A2	Bomba de lubricación no levanta presión suficiente	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): La presión de lubricación de la bomba no es suficiente como para levantar el permisivo que permita arrancar la bomba de inyección. Acción correctiva: se debe parar el equipo para revisar, 2 horas, 2 Mecanicos, costo de la falla 10 M\$	3	N	N	N	Y	M\$ 10

				1A3	Dispositivos de protección, Seguridad y control fallan	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): La bomba no arranca, muestra falla en uno o varios dispositivos de protección, Acción correctiva: se verifica el lazo de control de la bomba.	2	N	N	N	Y	M\$ 10
				1A4	bomba presenta falla en una o más etapas	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Se manifiesta en el cuarto de control, se para el equipo. . Pérdidas de producción asociadas a 30 KBAPD, y un promedio de 3000 Bls de crudo de diferida de producción. No implica riesgo para la seguridad, ni el medio ambiente. Costo de reparación de la bomba aprox. M\$ 300 Acción correctiva: Se debe desacoplar la bomba del motor eléctrico, una pareja de Mecanicos por 4 horas, para revisar, se verifica giro libre de la bomba, si ésta no gira, se debe proceder a enviar para reparación	0,5	N	N	N	Y	M\$ 300

				1A5	Acople entre las dos bombas suelto	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): El acople entre las dos bombas esta suelto, como consecuencia la bomba no levanta presión, más que la misma presión de succión, no se transmite potencia y torque de la bomba de baja a la bomba de alta presión, se para el equipo, de desacopla el motor de la c.e, y se desacoplan las dos bombas para revisar, si el acople presenta rotura o falla por torsión, se debe bajar la bomba y enviarla a reparación para cambio de eje.	0,5	N	N	N	Y	M\$ 10
				1A6	Alta vibración en la bomba	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): La bomba presenta alta vibración como consecuencia de la soldadura o falla de uno o varios bujes estabilizadores, se incrementa la vibración, se detiene el equipo por la acción de la protección por vibración, produce ruido. Acción correctiva: Se debe detener el equipo completamente para realizar la revisión	0,3	N	N	N	Y	M\$ 300

				1A7	bomba presenta obstrucción interna (amarrada/pegada)	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): la bomba no gira o no levanta presión suficiente, se incrementa el ruido y la vibración, puede fracturarse el eje y falla considerable en los internos de la bomba. Acción Correctiva: desmontar y Reparar la bomba M\$ 300	0,3	N	N	N	Y	M\$ 300
				1A8	Válvula de control de presión o descarga presentan falla	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): La sintonía del lazo de control puede presentar falla o la válvula de la descarga no abrió completamente, generando mayor presión y restricción de flujo, el equipo para por alta presión de descarga. Acción correctiva: Se debe detener completamente el equipo y revisar la válvula de descarga y de control de presión.	2	N	N	N	Y	M\$ 5
				1A9	falla del suministro de aire de instrumentos	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Paro de planta Acción correctiva: Reposición del aire de instrumento	0,5	N	N	N	Y	

			1A10	Falla humana	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Paro de Planta Acción correctiva: Capacitación de personal	0,2	N	N	N	Y		
		1B	No bombea el agua de inyección dentro del estándar requerido y/o no provee un sellado de forma eficiente	1B1	Fallo del sistema de sellado de la cámara de empuje (sellos rotos)	Evidente / No evidente: Sí Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Fuga de fluido de proceso al exterior. Acción correctiva: cambio de sello mecánico.	2	N	N	N	Y	M \$5
				1B2	Fallo de válvula cheque	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): La falla no es evidente, en el momento de parar el equipo, se aprecia que el fluido en la descarga viene en retroceso hacia la bomba, por daño en el cheque en la descarga, esto ocasiona daño en el sello mecánico.	0,2	Y	N	N	Y	M \$5
				1B3	Fallo mecánico (cojinetes, acoples, eje, carcasa,...)	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Alta vibración y golpeteo de acoplamiento Acción correctiva: Ajuste de elementos de sujeción	0,5	N	N	N	Y	M \$50

				1B4	Fuga en conexiones	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Se detectan una o más fugas al exterior, bien sea de aceite o fluido de proceso Acción correctiva: Ajuste de conexiones fallidas	3	N	N	N	Y	M \$0.05
				1B5	Fallo en el sistema de refrigeración (circuito cerrado de aceite con filtro magnético para partículas) del cámara de empuje de la bomba	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Calentamiento de la cámara de empuje, actúa la protección por alta temperatura, apagando el motor, la cámara de empuje se detiene, y por consiguiente la bomba se para. Acción correctiva: Reparar o cambiar la cámara de empuje	1	N	N	N	Y	M \$60
2	Impulsar el agua de inyección	2A	No impulsar el fluido de forma eficiente con sellado eficiente	2A1	Soltura de bujes estabilizadores, tornillos impulsores, impulsores	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Alta vibración y golpeteo de partes internas Acción correctiva: Desarmado de bomba y verificación de ajustes, se requiere reparar la bomba, costo de reparación M\$ 200	0,3	N	N	N	Y	M\$ 200
				2A2	Fuga por conexionado de bridas a la descarga	Evidente / No evidente: Sí Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga al exterior de producto Acción correctiva: Ajustes de bridas	0,7	N	N	N	Y	M\$ 10

				2A3	Cavitación de la bomba	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Sonido audible, vibraciones e implosiones en el impulsor. Acción correctiva: Correcto cebado de la bomba ; eliminación de vapores	2	N	N	N	Y	M\$ 150
				2A4	Problemas en filtros - Baja presión de succión	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Baja presión de descarga Acción correctiva: Verificar filtro de succión , verificar válvula de ingreso	1	N	N	N	Y	M\$ 2
				2A5	Mala regulación de alineación conjunto cámara de empuje-bomba	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Alta vibración Acción correctiva: Verificar alineación y corregir	2	N	N	N	Y	M\$ 5
3	Motor eléctrico para Suministrar movimiento para impulsar las bombas y generar potencias de 1500 Hp, @ 3600 rpm y 4160 Voltios a la bomba (dentro de unas condiciones	3A	No funciona	3A1	Falla del sistema de arranque	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Perdida de Producción Acción correctiva: Arranque de Bomba de respaldo	0,2	Y	N	N	Y	
				3A2	Falla del sistema de conexonado eléctrico	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Paro de Bomba Acción correctiva: Arranque de Bomba de respaldo	0,2	Y	N	N	Y	

	de operación)			3A3	Barras rotas o bobinas cruzadas (Espiras cortocircuitadas)	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Paro de Bomba Acción correctiva: Arranque de Bomba de respaldo	0,2	Y	N	N	Y	
		3B	No impulsa las bombas (lo hace fuera de las especificaciones requeridas)	3B1	Alta temperatura: Sobrecalentamiento por obstrucción en filtros de entrada de aire	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Incremento de la temperatura del motor, puede provocar el paro por alta temperatura. Acción correctiva: Revisión del sistema enfriamiento (filtros de aire)	2	N	N	N	Y	M\$ 2
				3B2	Fallo del sistema de conexonado eléctrico	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Paro de Bomba Acción correctiva: Arranque de Bomba de respaldo	0,2	N	N	N	Y	M\$ 3
				3B3	Barras rotas o bobinas cruzadas (Espiras cortocircuitadas)	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Paro de Bomba Acción correctiva: Arranque de Bomba de respaldo	0,2	N	N	N	Y	M\$ 60
				3B4	Rodamientos en mal estado	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Alta vibración del motor Acción correctiva: Programar cambio de rodamientos	0,25	N	N	N	Y	M\$ 60

				3B5	Problemas en lubricación	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Calentamiento de rodamiento Acción correctiva: Agregar aceite lubricante	2	N	N	N	Y	M\$ 0.06
				3B6	Fallo de aislamiento	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Motor se deteriora Acción correctiva: Megado del aislamiento. Barnizado del devanado y secado al horno.	0,2	N	N	N	Y	M\$ 60
				3B7	Desalineamiento (alta vibración)	Evidente / No evidente: Sí Afecta SHA:No Efecto operacional (síntomas): Calentamiento acoplamiento y desgaste de rodamiento lado cople. Acción correctiva: Verificar alineamiento y realizar monitoreo de vibraciones.	2	N	N	N	Y	M\$ 2
4	Sistema Variador (regular la velocidad de la bomba para el caudal en condiciones de operación)	4A	No regular la velocidad en las condiciones de operación y en los límites de vibración	4A1	Problemas en el conjunto variador (fallo eléctricos o electrónicos) (tarjetas, ventilador, cableado, filtro,...) (este modo de fallo es analizado como un conjunto)	Evidente / No evidente: Sí Afecta SHA:No Efecto operacional (síntomas): Pérdida de control del procesos de bombeo (bombeo ineficiente). Acción correctiva: Verificar el funcionamiento del variador	1	N	N	N	Y	M\$ 8

5	Proveer el acople efectivo entre el motor y la cámara de empuje y entre bomba de baja presión y alta presión	5A	Acoplamiento ineficiente	5A1	Soltura de elementos de sujeción del acoplamiento	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Alta vibración y golpeteo de acoplamiento Acción correctiva: Ajuste de elementos de sujeción	1	N	N	N	Y	M\$1
				5A2	Desgaste de elementos de sujeción del acoplamiento	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Alta vibración y golpeteo de acoplamiento Acción correctiva: Cambio de elementos de sujeción	0,2	N	N	N	Y	M\$ 5
6	Sistema de Lubricación: Suministrar el aceite a la presión requerida (26-28 psig) a la cámara de empuje y realizar un enfriamiento adecuado del aceite de lubricación	6A	No bombear el aceite en condiciones adecuadas	6A1	Fallo de bomba de lubricación	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Incremento de la temperatura del aceite, puede provocar la parada de la unidad. Acción correctiva: revisión del sistema de lubricación	0,5	N	N	N	Y	M\$ 5
				6A2	Fallo del intercambiador de calor del aceite	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Incremento de la temperatura y cambios en la presión del aceite, puede provocar la parada de la unidad. Acción correctiva: revisión del sistema de lubricación	1	N	N	N	Y	M\$ 5
				6A3	Fallo del circuito de lubricación (tuberías,	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No	0,5	N	N	N	Y	M\$ 1

					conexiones, tanques y válvulas)	Efecto operacional (síntomas): Incremento de la temperatura y cambios en la presión del aceite, puede provocar la parada de la unidad. Acción correctiva: revisión del sistema de lubricación						
				6A4	Problemas en las condiciones físico químicas del aceite	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Incremento de la temperatura, puede provocar la parada de la unidad. Acción correctiva: revisión del sistema de lubricación, específicamente análisis del aceite	2	N	N	N	Y	M\$ 5
				6A5	Fallo del motor eléctrico de bombas de lubricación	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Incremento de la temperatura del aceite, puede provocar la parada de la unidad. Acción correctiva: revisión del sistema de lubricación	0,5	N	N	N	Y	M\$ 2.5
7	Sistema de Control, vigilancia y protección del conjunto de bomba de alta presión (variador, motor, flujo de descarga (válvulas de descarga),	7A	No controla la operación del conjunto	7A1	Fallo en sensores	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de sensor	1	N	N	N	Y	M\$ 2
				7A2	Fallo en tarjetas electrónicas	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva:	0,5	N	N	N	Y	M\$ 5

sistema de lubricación (bomba de aceite)				Cambio de tarjeta electrónica						
	7A3	Conexión y borneras en mal estado	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de conexiones	2	N	N	N	Y	M\$ 1	
	7A4	Fallo del módulo de control	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de módulo	0,2	N	N	N	Y	M\$ 10	
	7A5	Fallo del cableado	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas):afectación parcial, podría llegar a para el sistema. Acción correctiva: Cambio de cable	0,25	N	N	N	Y	M\$ 12	
	7A6	Fallo de alimentación	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Paro del equipo con pérdida de producción Acción correctiva: Reponer la energía (evento externo)	1	N	N	N	Y	M\$ 4	
	7A7	Fallo de actuadores de control y válvulas de control	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Afectación en el proceso de control con posibles pérdida de producción Acción correctiva: Revisar el sistema de	1	N	N	N	Y	M\$ 2	

					válvulas de control							
		7B	No realiza las actuaciones de protección	7B1	Fallo en sensores	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de sensor	1	Y	N	N	Y	M\$ 2
				7B2	Fallo en tarjetas electrónicas	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de tarjeta electrónica	0,2	Y	N	N	Y	
				7B3	Conexión y borneras en mal estado	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de conexiones	1	Y	N	N	Y	M\$ 2
				7B4	Fallo del módulo de control	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de módulo	0,2	Y	N	N	Y	M\$ 12
				7B5	Fallo del cableado	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de cable	0,2	Y	N	N	Y	M\$ 12
				7B6	Fallo en válvulas relacionadas con sistemas de protección	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Revisión	0,5	Y	N	N	Y	M\$5

						de válvulas						
				7B7	Fallo del software de vigilancia	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Verificación del software	0,5	Y	N	N	Y	M\$ 4
8	Lazo de control de flujo mínimo de la bomba: ser capaz de parar la bomba, cuando se tenga baja presión de succión, alta presión de descarga, alta vibración cámara de empuje o alta temperatura en la cámara de empuje.	8A	Medición de flujo errónea	8A1	Falla del Sensor	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de sensor	1	N	N	N	Y	
				8A2	Falla de la tarjeta electrónica	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de tarjeta electrónica	0,2	N	N	N	Y	
				8A3	Conexión y borneras en mal estado	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de conexiones	1	N	N	N	Y	
		8B	Falla del sistema de control	8B1	Mala sintonía del lazo	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Sintonización de lazo	0,2	N	N	N	Y	
				8B2	Falla del módulo de control	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de módulo	0,2	N	N	N	Y	

				8B3	Falla del terminador	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de terminador	0,2	N	N	N	Y			
				8B4	Falla del Hawken	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de Hawken	0,2	N	N	N	Y			
				8B5	Falla del cableado	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de cable	0,2	N	N	N	Y			
			8C	Mal funcionamiento del posicionador de la válvula de control de flujo mínimo PCV-32512/522/532	8C1	Falla del sensor de posición	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de sensor de posición	0,2	N	N	N	Y		
						8C2	Falla de la tarjeta electrónica	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de tarjeta electrónica	0,2	N	N	N	Y	
						8C3	Falla del I/P	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de I/P	0,2	N	N	N	Y	
						8C4	Falla de la sintonía del lazo interno	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Calibración de lazo de control	0,2	N	N	N	Y	

				8C5	Conexión y borneras en mal estado	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Cambio de conexiones	2	N	N	N	Y	
				8D1	Suciedad en el cuerpo de la válvula	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Limpieza de internos de válvula	1	N	N	N	Y	
				8D2	Falla del actuador	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Reparación del mecanismo del actuador	0,2	N	N	N	Y	
				8D3	Falla de suministro de aire	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Reestablecer el aire	0,1	N	N	N	Y	
				8D4	Falla humana	Evidente / No evidente: Afecta SHA: Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva:	0,2	N	N	N	Y	
		8D	Mal funcionamiento de la válvula de control de flujo mínimo PCV- 32512/522/532									
				9A1	Descalibración del transmisor de nivel	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Calibración de transmisor de nivel	1	N	N	N	Y	
				9A2	Taponamiento de las tomas de impulso	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Limpieza	2	N	N	N	Y	
9	Ser capaz de parar la bomba cuando tenemos bajo nivel en el tanque de cabeza K-3211	9A	La no activación del LSSL-32111 cuando tengamos muy bajo nivel en el tanque K-3211									

						de tomas de impulso							
				9A3	Alineamiento incorrecto en el manifold	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Alinear correctamente el manifold	0,2	N	N	N	Y		
				9A4	Fugas por las tomas de conexión	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Remediar la fuga y limpieza de zona	0,5	N	N	N	Y		
			9B	La activación del LSSL-32111 cuando tengamos nivel superior al muy bajo nivel	9B1	Descalibración del transmisor de nivel	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Calibración de transmisor de nivel	1	N	N	N	Y	
					9B2	Taponamiento de las tomas de impulso	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Limpieza de tomas de impulso	2	N	N	N	Y	
					9B3	Alineamiento incorrecto en el manifold	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Alinear correctamente el manifold	0,2	N	N	N	Y	
					9B4	Fugas por las tomas de conexión	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Acción correctiva: Remediar la fuga y limpieza de zona	0,5	N	N	N	Y	

Fuente: Los Autores.

ANEXO C. LISTADO DE TAREAS DE MANTENIMIENTO.

Cód.. Func.	Cód.. FF	Cód.. MF	Modo de Falla	TIPO DE DECISIÓN	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA (mes)	RECURSOS
1	1A	1A1	Falla del suministro eléctrico	PM	Revisar el sistema de generación , alimentación y distribución eléctrica (fuera del límite de batería)	fuera del límite de batería	N/A
		1A2	Bomba de lubricación no levanta presión suficiente	MC	Medición de vibraciones y temperatura	3M	Técnicos de Vibraciones
		1A3	Dispositivos de protección, Seguridad y control fallan	TBT PFO	1. Rutina de mantenimiento y calibración de toda la instrumentación asociada a la bomba 2. Revisión del sistema de seguridad (PCS) ; cumpliendo pruebas de verificación	12M	Frente Instrumentos
		1A4	bomba presenta falla en una o más etapas	MC	Medición de Eficiencia de la bomba (Flujo, presión y temperatura). Monitoreo de Vibraciones	6M	Frente Mecánica
		1A5	Acople entre las dos bombas suelto	PM	Verificación del acople Lubricación del Acople	3M	Frente Mecánica
		1A6	Alta vibración en la bomba	MC	1. Medición de vibraciones en la bomba	24M	Técnicos de Vibraciones
		1A7	bomba presenta obstrucción interna (amarrada/pegada)	MC	1. Medición de vibraciones 2. Medición de Eficiencia de la bomba (Flujo, presión y temperatura).	3M	Técnicos de Vibraciones
		1A8	Válvula de control de presión o descarga presentan falla	TBT	Calibración y mantenimiento de válvulas de control	6M	Frente Instrumentos
		1A9	falla del suministro de aire de instrumentos	PM	Revisión del sistema de Compresión de Aire y las líneas de distribución.	3M	Frente Mecánica
		1A10	Falla humana	PM	Capacitar al personal en las actividades requeridas.	Una sola vez	Gerencia
	1B	1B1	Fallo del sistema de sellado de la cámara de empuje (sellos rotos)	MC PM PM	1. Revisión de las presiones de trabajo del sistema de sellado 2.Verificación de elementos de unión; ajustes de elementos roscados 3.Cambio de sello mecánico; verificación de elementos	1.Diario 2.12M 3. 12M	Operador y Frente Mecánica
	1B2	Fallo de válvula cheque	PFO (prueba de fallos ocultos)	Pruebas operacionales de la válvula antirretorno	3M	Operaciones	

2		1B3	Fallo mecánico (cojinetes, acoples, eje, carcasa,...)	MC PM	1. Realizar el monitoreo de vibraciones y desarrollar tendencias 2. Realizar el ajuste de los elementos de sujeción aplicando los torques adecuados; verificar los elementos resilientes y los ajustes y tolerancias de las partes del acople.	1.3M 2.12M	Técnicos Vibraciones y Mecánica	
			1B4	Fuga en conexiones	MC PM	1. Verificar las condiciones de presión y caudal y desarrollar tendencias 2. Verificación de elementos de unión; ajustes de elementos roscados.	1. diario 2. anual	Operaciones y Frente Mecánica
			1B5	Fallo en el sistema de refrigeración (circuito cerrado de aceite con filtro magnético para partículas) del cámara de empuje de la bomba	MC	1. Verificación de las condiciones de temperatura de la cámara de empuje y del nivel y calidad del aceite en el circuito de refrigeración. 2. Revisión de las condiciones físico químicas del aceite.	1. Diaria 2. 3M	Operaciones y Técnicos CBM
		2A	2A1	Soltura de bujes estabilizadores, tornillos impulsores, impulsores	MC PM PM	1. Seguimiento al monitoreo de vibraciones y desarrollar tendencias 2. Desarmado de la bomba, verificación de las partes internas y verificando los ajustes y tolerancias de los elementos rotóricos; cambiar los elementos que no cumplan con las tolerancias y luego realizar el balanceo dinámico del conjunto rotórico	1.3M 2.24M	Grupo CBM y Mecánica
			2A2	Fuga por conexionado de bridas a la descarga	MC PM	1. Verificar las condiciones de presión y caudal 2. Verificar el ajuste de las bridas y la soltura de espárragos, cambiar empaques de ser necesario.	1. Diario 2. 6M	Operaciones y Frente Facilidades
			2A3	Cavitación de la bomba	MC PM	1. Verificar las condiciones de presión y caudal (desarrollar tendencias). 2. Realizar el purgado de la bomba, eliminar vapores de las tuberías y arrancar la bomba.	1. Diario 2. mensual	Operaciones y Mecánica
			2A4	Problemas en filtros - Baja presión de succión	MC PM	1. Verificar la caída de presión en la descarga vía factores operativos 2. Realizar la limpieza del filtro de succión; verificar la	1. diario 2. mensual (asociado al delta Presión)	Operaciones y facilidades

					integridad de la malla de filtración.		
		2A5	Mala regulación de alineación conjunto cámara de empuje-bomba	PM	1. Realizar la regulación de la altura con la tuerca de regulación del acoplamiento, según la especificación de ingeniería. 2. Verificación de la alineación conjunto motor-cámara de empuje-bomba	Como mínimo una vez al año (12M)	Frente de Mecánica
3	3A	3A1	Falla del sistema de arranque	MC PM	1. Verificación de sistema por termografía y ultrasonido. 2.Revisión del sistema de arranque , prueba de componentes, reemplazo de partes deterioradas y pruebas de trabajo.	1M 3M	Frente Eléctrico
		3A2	Falla del sistema de conexionado eléctrico	MC PM	Verificación de sistema por termografía y ultrasonido Revisión del cableado ; pruebas de continuidad del cableado	1M 3M	Frente Eléctrico
		3A3	Barras rotas o bobinas cruzadas (Espiras cortocircuitadas)	MC MC MC PM	Seguimiento al monitoreo de vibraciones Pruebas de Análisis de Corrientes Reparación del rotor; cambio de barras y prueba de trabajo.	mensual anual trianual	Frente Eléctrico
	3B	3B1	Alta temperatura: Sobrecalentamiento por obstrucción en filtros de entrada de aire	PM	1. Limpieza de los filtros de Aire del motor. 2. Verificación del nivel de aceite del motor y reponer, de ser necesario. 3. Realizar análisis fisicoquímico al aceite.	1.Diario 2. trimestral	Frente Eléctrico y Frente Mecánica
		3B2	Fallo del sistema de conexionado eléctrico	MC PM	1.Verificación de sistema por termografía 2.Revisión del cableado ; pruebas de continuidad del cableado	1.mensual 2.trimestral	Frente Eléctrico
		3B3	Barras rotas o bobinas cruzadas (Espiras cortocircuitadas)	MC MC PM	1. Seguimiento al monitoreo de vibraciones 2.Pruebas de Análisis de Corrientes 3.Reparación general del rotor; cambio de barras y prueba de trabajo.	1.mensual 2.anual 3.trianual	Grupo CBM y Frente Eléctrico

		3B4	Rodamientos en mal estado	MC	Seguimiento del monitoreo de vibraciones y proponer el cambio de rodamientos según condición; verificación de ajustes y tolerancias; verificación de elementos dinámicos.	mensual	Frente Eléctrico y Grupo CBM
		3B5	Problemas en lubricación	MC PM	1. Seguimiento de las variables básicas: temperatura, presión y caudal de aceite 2.Limpieza de recipiente de lubricación, relleno de aceite lubricante.	1. diario 2.anual	Operaciones, Frente Eléctrico y Frente Mecánica
		3B6	Fallo de aislamiento	PM	Megado del motor, barnizado del devanado y secado al horno ; estudio de factibilidad de instalación de heaters para mantener sin humedad los devanados (verificar esta recomendación)	anual	Frente Eléctrico
		3B7	Desalineamiento (alta vibración)	MC PM	1. Seguimiento del monitoreo de vibraciones 2.Realizar verificación de los elementos del acoplamiento; verificar medidas y tolerancias; además inspeccionar y cambiar de ser necesario los elementos de sujeción y arrastre.	1.mensual 2.semestral	Grupo CBM y Frente Mecánica
4	4A	4A1	Problemas en el conjunto variador (fallo eléctricos o electrónicos) (tarjetas, ventilador, cableado, filtro,...) (este modo de fallo es analizado como un conjunto)	MC MC PM PM	1. Seguimiento de variables básicas: ruido, vibración, temperaturas, consumo eléctrico. 2. Seguimiento y análisis detallado del monitoreo de vibraciones y de variables eléctricas 3.Realizar verificación de los elementos del acoplamiento; verificar medidas y tolerancias ; además inspeccionar y cambiar de ser necesario los elementos de sujeción y arrastre. 4. Pruebas a la parte de instrumentación y control del variador	1. diario 2.mensual 3.semestral 4. anual	Operaciones Grupo CBM Frente Mecánica Frente Instrumentos

		6A4	Problemas en las condiciones físico químicas del aceite	MC	1. Verificar las condiciones básicas de temperatura y presión del aceite. 2. Realizar el monitoreo del aceite y evaluar la tendencia en el tiempo	1. diario 2. semestral	Operaciones y Grupo CBM
		6A5	Fallo del motor eléctrico de bombas de lubricación	MC	Revisión de las variables eléctricas más importantes del motor (Megger Amperímetros)	1 año	Frente Eléctrico
7	7A	7A1	Fallo en sensores	PM	Calibración del sensor/transmisor	semestral	Frente Instrumentos
		7A2	Fallo en tarjetas electrónicas	PM	Revisión y pruebas de la tarjeta	anual	Frente Instrumentos
		7A3	Conexión y borneras en mal estado	PM	Revisión de conexiones y borneras	semestral	Frente Instrumentos
		7A4	Fallo del módulo de control	PM	Cambio del módulo de control	pentanual	Frente Instrumentos
		7A5	Fallo del cableado	PM	Revisión del cableado	semestral	Frente Instrumentos
		7A6	Fallo de alimentación	MC	Evento Externo (verificar condiciones de la energía)	diario	Frente Instrumentos
		7A7	Fallo de actuadores de control y válvulas de control	PM	Verificación de internos, cambio de componentes mecánicos de las válvulas, Calibración de válvula y prueba de verificación	anual	Frente Instrumentos
	7B	7B1	Fallo en sensores	PFO	Pruebas de fallos ocultos	semestral	Frente Instrumentos
		7B2	Fallo en tarjetas electrónicas	PFO	Pruebas de fallos ocultos	semestral	Frente Instrumentos
		7B3	Conexión y borneras en mal estado	PFO	Pruebas de fallos ocultos	semestral	Frente Instrumentos
		7B4	Fallo del módulo de control	PFO	Pruebas de fallos ocultos	semestral	Frente Instrumentos
		7B5	Fallo del cableado	PFO	Pruebas de fallos ocultos	semestral	Frente Instrumentos
		7B6	Fallo en válvulas relacionadas con sistemas de protección	PFO	Pruebas de fallos ocultos	semestral	Frente Instrumentos
		7B7	Fallo del software de vigilancia	PFO	Pruebas de fallos ocultos	semestral	Frente Instrumentos
8	8A	8A1	Falla del Sensor	PM	Calibración del sensor/transmisor	semestral	Frente Instrumentos
		8A2	Falla de la tarjeta electrónica	PM	Cambio y calibración del sensor/transmisor	anual	Frente Instrumentos
		8A3	Conexión y borneras en mal estado	PM	Cambio de conexiones y borneras	anual	Frente Instrumentos
	8B	8B1	Mala sintonía del lazo	PM	Sintonización del lazo de control	anual	Frente Instrumentos

		8B2	Falla del módulo de control	PM	Cambio del módulo de control	pentanual	Frente Instrumentos	
		8B3	Falla del terminador	PM	Cambio del terminador	pentanual	Frente Instrumentos	
		8B4	Falla del Hawken	PM	Revisión y posible cambio del Hawken	pentanual	Frente Instrumentos	
		8B5	Falla del cableado	PM	Revisión del cableado	Anual	Frente Instrumentos	
	8C	8C1	Falla del sensor de posición	PM	Cambio del sensor de posición (potenciometro) y calibración de válvula de control	anual	Frente Instrumentos	
		8C2	Falla de la tarjeta electrónica	PM	Decomisionar módulo, cambio de tarjeta electrónica, comisionar	trianual	Frente Instrumentos	
		8C3	Falla del I/P	PM	Cambio del I/P	trianual	Frente Instrumentos	
		8C4	Falla de la sintonía del lazo interno	PM	Autocalibración de válvula	anual	Frente Instrumentos	
		8C5	Conexión y borneras en mal estado	PM	Cambio de conexiones y borneras	anual	Frente Instrumentos	
	8D	8D1	Suciedad en el cuerpo de la válvula	PM	Sacar fuera de servicio la válvula, desarmar y limpieza de internos, calibración del bench set y autocalibrar con el posicionador	anual	Frente Instrumentos	
		8D2	Falla del actuador	PM	Desarmar actuador, cambiar internos necesarios, ensamblar válvula, calibrar bench set y autocalibrar con el posicionador	pentanual	Frente Instrumentos	
		8D3	Falla de suministro de aire	CM	Revisar presión de alimentación de aire y regulador de aire	Continúa	Frente Instrumentos	
		8D4	Falla humana	PM	Capacitar al personal en las actividades requeridas.	anual	Gerencia	
	9	9A	9A1	Descalibración del transmisor de nivel	PM	Calibración de transmisor de nivel y revisar el set de activación en sistema de control.	anual	Frente Instrumentos
			9A2	Taponamiento de las tomas de impulso	PM	Limpieza de tomas de impulso	semestral	Frente Instrumentos
			9A3	Alineamiento incorrecto en el manifold	PM	Alinear correctamente y capacitar al personal en la actividad requerida. Si fuese necesario recalibrar el transmisor de nivel.	anual	Frente Instrumentos y Gerencia
9A4			Fugas por las tomas de conexión	PM	Ajustar y eliminar fugas, si fuese necesario cambiar elementos de conexión	anual	Frente Instrumentos	
9B		9B1	Descalibración del transmisor de nivel	PM	Calibración de transmisor de nivel y revisar el set de	anual	Frente Instrumentos	

					activación en sistema de control.		
		9B2	Taponamiento de las tomas de impulso	PM	Limpieza de tomas de impulso	semestral	Frente Instrumentos
		9B3	Alineamiento incorrecto en el manifold	PM	Alinear correctamente y capacitar al personal en la actividad requerida. Si fuese necesario recalibrar el transmisor de nivel.	Bianual	Frente Instrumentos y Gerencia
		9B4	Fugas por las tomas de conexión	PM	Ajustar y eliminar fugas, si fuese necesario cambiar elementos de conexión	anual	Frente Instrumentos

Fuente. Los Autores.