

**PLAN DE MEJORAMIENTO ENFOCADO EN LA ESTRATEGIA RCM PARA EL  
MANTENIMIENTO EN LAS CAMARAS DE EMPUJE DEL SISTEMA DE  
INYECCIÓN DE AGUA POR BOMBAS MULTITAPAS DE LA PLANTA DE  
INYECCION 5A DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS ECOPETROL.**

**EDINSON PARDO NIEVES  
JORGE ELIECER ARDILA PEREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA INGENIERÍA DE MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA**

**2014**

**PLAN DE MEJORAMIENTO ENFOCADO EN LA ESTRATEGIA RCM PARA EL  
MANTENIMIENTO EN LAS CAMARAS DE EMPUJE DEL SISTEMA DE  
INYECCIÓN DE AGUA POR BOMBAS MULTITAPAS DE LA PLANTA DE  
INYECCION 5A DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS ECOPETROL.**

**EDINSON PARDO NIEVES  
JORGE ELIECER ARDILA PEREZ**

**Trabajo de Grado para optar el título de:  
ESPECIALISTA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO**

**Director  
ALEXANDER MIGUEL MORA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA INGENIERÍA DE MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

A Dios: Con el corazón rebotante de alegría primeramente quiero honrar con este trabajo, que representa la culminación un año de esfuerzo, altibajos, a quien merece toda gloria y alabanza, mi Dios. Tú Señor lo hiciste todo posible. A ti te entregué mi especialización, me guiaste de regreso al camino correcto en momentos cuando lo creí todo perdido, me fortaleciste, me renovaste, por esto y mucho más, gracias Jesús. Madre María, gracias por interceder, gracias por confortarme.

A mi esposa, **Carolina Prada**, por su colaboración, dedicación y apoyo en la búsqueda de mi mejora continua como persona y profesional para lograr proyectarme en un futuro cercano en una mejor posición laboral y así brindar estabilidad y un futuro lleno de oportunidades a nuestra Hija **María Fernanda**.

**Edinson Pardo Nieves**

A Dios: Con el corazón rebotante de alegría primeramente quiero honrar con este trabajo, que representa la culminación un año de esfuerzo, altibajos, a quien merece toda gloria y alabanza, mi Dios. Tú Señor lo hiciste todo posible. A ti te entregué mi especialización, me guiaste de regreso al camino correcto en momentos cuando lo creí todo perdido, me fortaleciste, me renovaste, por esto y mucho más, gracias Jesús. Madre María, gracias por interceder, gracias por confortarme.

A mi esposa, **Ana María Rocha**, por su colaboración, dedicación y apoyo en la búsqueda de mi mejora continua como persona y profesional para lograr proyectarme en un futuro cercano en una mejor posición laboral y así brindar estabilidad y un futuro lleno de oportunidades a nuestros Hijos **Martín** y **María Paula**.

**Jorge Eliecer Ardila**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios, por acompañarme y bendecirme en el desarrollo de este proyecto. También a todos los docentes porque con su esmero, conocimientos y orientación fueron fundamentales en el proceso de aprendizaje en esta especialización.*

**Edinson Pardo Nieves**

**Jorge Eliecer Ardila**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>1. CONCEPTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1 MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>18</b>
1.1.1 Campo la Cira Infantas.....	18
1.1.2 Producción terciaria. ....	20
1.1.3 Localización geográfica del campo la Cira Infantas. ....	23
1.1.4 Descripción del proceso de inyección de agua en la PIA 5ª. ....	25
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>28</b>
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO .....</b>	<b>31</b>
<b>1.4 OBJETIVOS .....</b>	<b>33</b>
<b>1.4.1 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>33</b>
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	33
<b>2. MARCO TEORICO.....</b>	<b>35</b>
<b>2.1 GLOSARIO .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2 EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO .....</b>	<b>37</b>
<b>2.3 Descripción de los componentes del sistema de bombeo horizontal .....</b>	<b>41</b>
<b>2.4 OPERACIÓN SISTEMA HORIZONTAL .....</b>	<b>51</b>
<b>2.5 REPUESTOS RECOMENDADOS PARA SISTEMAS HORIZONTALES.....</b>	<b>57</b>
<b>2.5 CONCEPTOS DE CONFIABILIDAD .....</b>	<b>58</b>
<b>3. PREPARACION DE LA INFORMACION.....</b>	<b>65</b>
<b>3.1. ANÁLISIS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO EN EL CAMPO LA CIRA INFANTAS .....</b>	<b>65</b>
3.1.1. Costos generales de mantenimiento.....	65
3.1.2. Costos de mantenimiento de la especialidad Mecánica .....	68
3.1.3. Costo de mantenimiento de la Subespecialidad de Equipo Estacionario.....	70
3.1.4. Costos de mantenimiento por tipo de servicio .....	72
3.1.5. Costos de mantenimiento en Bombas de Inyección.....	74
<b>3.2 ANÁLISIS DE LAS RUTINAS PREVENTIVAS PARA LAS CÁMARAS DE EMPUJE EN EL CAMPO LA CIRA .....</b>	<b>77</b>
3.2.1. Rutinas de 90 días bomba inyección .....	77
3.2.2. Análisis de rutina .....	78
<b>3.3 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE LA FALLAS ENCONTRADAS EN CÁMARAS DE EMPUJE.....</b>	<b>78</b>
<b>4. MODELO DE IMPLEMENTACION PROPUESTO.....</b>	<b>93</b>

<b>4.1 DEFINICION DE FUNCIONES.....</b>	<b>97</b>
<b>4.2 DEFINIR LAS FALLAS FUNCIONALES: .....</b>	<b>98</b>
<b>4.3 DEFINIR LOS MODOS DE FALLA .....</b>	<b>99</b>
<b>4.4 DEFINIR EL EFECTO DE LA FALLA Y LA CONSECUENCIA DE LA FALLA .....</b>	<b>99</b>
<b>4.5 DEFINIR QUE PUEDE HACERSE PARA EVITAR LA FALLA.....</b>	<b>101</b>
<b>4.6 DEFINIR QUE PUEDE HACERSE SI NO SE CONOCE LA FALLA .....</b>	<b>104</b>
<b>5. ANÁLISIS DE COSTO BENEFICIO RESPECTO A LA PROPUESTA DE MEJORA.....</b>	<b>105</b>
<b>6. ANALISIS DE REPUESTOS.....</b>	<b>115</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>117</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>120</b>

## LISTA DE TABLAS

Pág.

<i>Tabla 1. Características de la primera generación del mantenimiento .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 2. Características de la segunda generación del mantenimiento .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3. Características de la tercera generación del mantenimiento .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 4 REPUESTOS RECOMENDADOS (por el fabricante) .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 5. Especialidades área mantenimiento .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 6. Gráfico de Costo por Especialidad .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 7. Subespecialidad mecánica .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 8. Costos subespecialidad mecánica .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 9. Tipos de servicio y costos .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 9. Costos de mantenimiento por tipo de servicio .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 11. Archivo de Costos de Mantenimiento correctivo en Bombas de Inyección .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 12. Falla ruptura eje alta bomba P5012 .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 13. Recomendaciones .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 14. De falla limpieza interna cámara empuje .....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 16. Falla revisión cámara empuje .....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 18. Cámara de empuje P3255 .....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 20. Falla daño en sello mecánico P 3254 .....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 21. Recomendaciones .....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 22. Fronteras RCM .....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 23. Características técnicas .....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 24. Condiciones operacionales .....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 25. Interfaces .....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 26. Ejemplo rotura ejes .....</i>	<i>101</i>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1 Hidro avión.....</i>	18
<i>Figura 2. Recuperación asistida.....</i>	21
<i>Figura 3. Recuperación asistida fases.....</i>	22
<i>Figura 4. Mapa del campo La Cira Infantas.....</i>	24
<i>Figura 5. Panorámica General Planta de Inyección 5A.....</i>	25
<i>Figura 6. Esquema General Planta de Inyección de agua PIA 5A.....</i>	27
<i>Figura 7. Plano sistema HP Pump.....</i>	30
<i>Figura 8. Esquema de desplazamiento de petróleo por agua.....</i>	31
<i>Figura 9. Sistema de bombeo horizontal.....</i>	41
<i>Figura 10. Patin.....</i>	42
<i>Figura 11. Motor eléctrico.....</i>	43
<i>Figura 12. Acople del motor.....</i>	44
<i>Figura 13. Cámara de empuje.....</i>	45
<i>Figura 14. Sello tipo cartucho.....</i>	46
<i>Figura 15. Plan de sellado sistema horizontal.....</i>	47
<i>Figura 16. Admisión producto.....</i>	48
<i>Figura 17. Bomba multietapas.....</i>	49
<i>Figura 18. Descarga de producto.....</i>	50
<i>Figura 19. Plano sistema de lubricación.....</i>	54
<i>Figura 20. costos por especialidad.....</i>	67
<i>Figura 21. costos sub especialidad mecánica.....</i>	69
<i>Figura 22. Costo por tipo de servicio.....</i>	71
<i>Figura 23. Costo por tipo de mantenimiento.....</i>	73
<i>Figura 24. Costo por componente de las Bombas de Inyección.....</i>	76

<i>Figura 25. ANALISIS DE CAUSA RAIZ DE LA FALLA .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 26. Falla revisión cámara empuje .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 27. Falla daño en sello mecánico P 3254 .....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 28. Flujo grama RCM.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 29 Matriz de valoración de riesgos RAM .....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 30. Árbol lógico de fallas.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 31. Esquema del riesgo.....</i>	<i>106</i>

## LISTA DE ANEXOS

	Pág
<i>ANEXO A. Hoja FMEA para los modos de falla definidos.....</i>	<i>122</i>
<i>ANEXO B. Listado de tareas de mantenimiento.....</i>	<i>136</i>

## RESUMEN

**TITULO:** PLAN DE MEJORAMIENTO ENFOCADO EN LA ESTRATEGIA RCM PARA EL MANTENIMIENTO EN LAS CÁMARAS DE EMPUJE DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA POR BOMBAS MULTITAPAS DE LA PLANTA DE INYECCION 5A DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS ECOPETROL.<sup>1</sup>

**AUTOR:** EDINSON PARDO NIEVES  
JORGE ELIECER ARDILA PEREZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Petróleo, Inyección de agua, Bombas centrifugas, Planta de inyección de agua, RCM, Mantenimiento, Presión, Control.

### CONTENIDO:

La monografía contempla el desarrollo de un plan de mejoramiento enfocado en estrategia RCM para el mantenimiento de las cámaras de empuje del sistema de inyección de agua por bombas multi etapas para la planta de inyección 5A del campo La Cira Infantas, elaborada con el objetivo de aumentar la rentabilidad de la inversión de Ecopetrol S.A.

La información de costos e información técnica de esta monografía son extraídos del software de mantenimiento Ellipse y manual operativo de la planta de inyección 5A, la identificación de modos de falla fue realizada bajo la experiencia de personal de mantenimiento y proyectos que laboran en este tipo de equipos, obteniendo toda la información necesaria se logran establecer las actividades para preservar las cámaras de empuje lo que nos lleva a optimizar las actividades de mantenimiento, reducir los costos y optimizar la confiabilidad operativa de las cámaras de empuje a través de RCM

La estrategia de mantenimiento tendrá como soporte un análisis a un año de los costos comparados con el mantenimiento actual para verificar la viabilidad y efectividad de la estrategia.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento  
Director: Ing. Alexander Miguel Mora Silva.

## ABSTRACT

**TITLE:** IMPROVEMENT PLAN STRATEGY RCM FOCUSED ON KEEPING ON CAMERA SYSTEM PUSHING WATER INJECTION PUMPS MULTISTAGE INJECTION PLANT THE FIELD 5A INFANTAS CIRA ECOPEPETROL.\*

**AUTHORS:** EDINSON PARDO NIEVES  
JORGE ELIECER ARDILA PEREZ

**KEYWORDS:** Oil, Water injection, Centrifugal pumps, Ground water injection, RCM, Maintenance, Pressure.

### CONTENTS:

The paper includes the development of an improvement plan focused on RCM strategy for maintaining thrust chambers water injection system for multi -stage pumps for injection plant 5A Princesses La Cira field, made with the aim of reducing maintenance costs and increase operational availability of these teams.

The cost information and technical information in this monograph are extracted of Ellipse software maintenance and operating manual 5A injection plant ,the identification of failure modes was performed under the experience of maintenance team and projects working in this type of equipment , obtaining all the necessary information is able to establish the activities to preserve the thrust chambers which leads us to optimize maintenance activities , reduce maintenance costs and optimize operational reliability of thrust cameras via RCM.

The maintenance strategy will support one-year analysis of the costs compared to the current maintenance to verify the feasibility and effectiveness of the strategy.

---

\*Monograph

\*\* School of Physics and Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management  
Directed by Engineer. Alexander Miguel Mora Silva.

## INTRODUCCIÓN

La historia de La Cira Infantas inicio el 11 de noviembre de 1918 cuando expulsó el petróleo que posaba en el subsuelo sorprendiendo a los trabajadores de la TROCO y a sus lugareños, alcanzo su época dorada en los años cuarenta cuando aún seguía brotando con fuerza hasta marcar una producción de 60.000 BPD pero la historia del campo estuvo a punto de concluir a inicios de este siglo pues la producción alcanzo 5.500 BPD.

La salvación del campo llego en 2005 con la alianza empresarial entre Ecopetrol y Occidental Andina, el reto era revivir no solo el campo más antiguo del país sino también la historia misma de la industria petrolera, Ecopetrol y Occidental está aumentando la energía natural del yacimiento con inyección de agua, el procedimiento de inyección de agua fue consolidado en 2006, esta técnica ha dado frutos ya que de los 1900 pozos 450 son inyectoros y la producción actual es de 38000 BPD pero la meta es alcanzar los 50.000 BPD en 2015. La Cira infantas proyecta el desarrollo de esta nueva fase de producción para 20 años.

La inyección de agua se desarrolla por el ingreso de facilidades de inyección como la planta de inyección 5ª la cual fue construida y puesta en funcionamiento en el año 2008, el elemento primordial para alcanzar la presión requerida de 2000 psi en los pozos inyectoros son las bombas de inyección multi-etapas las cuales cuentan con un sistema de control complejo y elementos de alta tecnología los cuales han sido operados y mantenidos por Ecopetrol.

El desarrollo de esta monografía pretende profundizar en los conceptos teóricos del RCM mantenimiento centrado en la confiabilidad bajo el contenido operacional considerado como base para la optimización del mantenimiento preventivo y predictivo de las cámaras de empuje de las bombas de inyección de agua en la superintendencia la Cira Infantas.

El objetivo de este Proyecto es reducir tiempos de mantenimiento y evitar paradas no programadas en los equipos de Inyección de Agua de las Planta de Inyección 5A, aumentando la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. En resumen, la proyección del proyecto es reducir costos, aumentar la inyección de agua y garantizar la seguridad e integridad del personal y de sus instalaciones.

# 1. CONCEPTOS TEÓRICOS

## 1.1 MARCO CONCEPTUAL

### 1.1.1 Campo la Cira Infantas

La historia del campo se remonta desde que la empresa Troco, en unión con la poderosa Stamford Oil Company, arribó al puerto petrolero Barrancabermeja con sed de oro negro, que empezaba a padecer Estados Unidos ante el acelerado crecimiento de su industria automotriz.<sup>2</sup>

Los equipos de taladro comenzaron a perforar dos pozos en 1917. El primero en terminarse fue el Infantas II, que tuvo una producción inicial de 42 barriles. Meses después nacieron los pozos Infantas I y III, el primero perforado a una profundidad de 2.285 pies y con una producción inicial de 2 mil barriles. Se dice que ese día, el 11 de noviembre de 1918, cuando abrió los ojos el Infantas I, hubo alarma entre los vecinos del lugar, quienes no podían dar crédito a lo que veían: un chorro de aceite negro, pegajoso e incontenible, que salía disparado en todas las direcciones.**Figura 1 Hidro avión**



Fuente: Página de Ecopetrol, [http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta\\_petrolera119/rev\\_cronica.ht](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera119/rev_cronica.ht)

<sup>2</sup> Ecopetrol. Temas especiales, crónica.  
[http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta\\_petrolera119/rev\\_cronica.ht](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera119/rev_cronica.ht)

En la década de los años 20 este era el hidroavión utilizado por las compañías petroleras en Barrancabermeja.

“El 25 de agosto de 1951 se lleva a cabo la reversión de la concesión de mares al estado colombiano, es decir todos los bienes pasaron a ser parte de la nación. Para manejar ese patrimonio, la ley 165 de 1948 había creado la empresa colombiana de petróleos Ecopetrol, que asumió a partir de ese día, como empresa estatal lo que hasta entonces fue la concesión.

En Colombia, los recursos naturales no renovables, entre ellos los hidrocarburos, son de propiedad del estado, la política petrolera la define el gobierno nacional a través del ministerio de minas y energía y, hasta el 28 de mayo del 2003, Ecopetrol, como entidad del estado, era la encargada de su gestión. El campo la Cira Infantas pese a ser el primer campo de extracción de petróleo de Colombia tubo tiempos difíciles y su producción alcanzó los 5000 BPD.

Se trata de un renacer que comenzó desde el año 2005, cuando se firmó un contrato de colaboración empresarial con la Occidental Andina a fin de recuperar 150 millones de barriles de reservas adicionales, para ayudar a frenar la caída de la producción de petróleo en el país y extender la fecha de la pérdida de la autosuficiencia petrolera.”<sup>3</sup>

---

3 ECOPETROL. El petróleo y su mundo. Petróleo en Colombia.  
<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/petroleoencolombia2.htm>

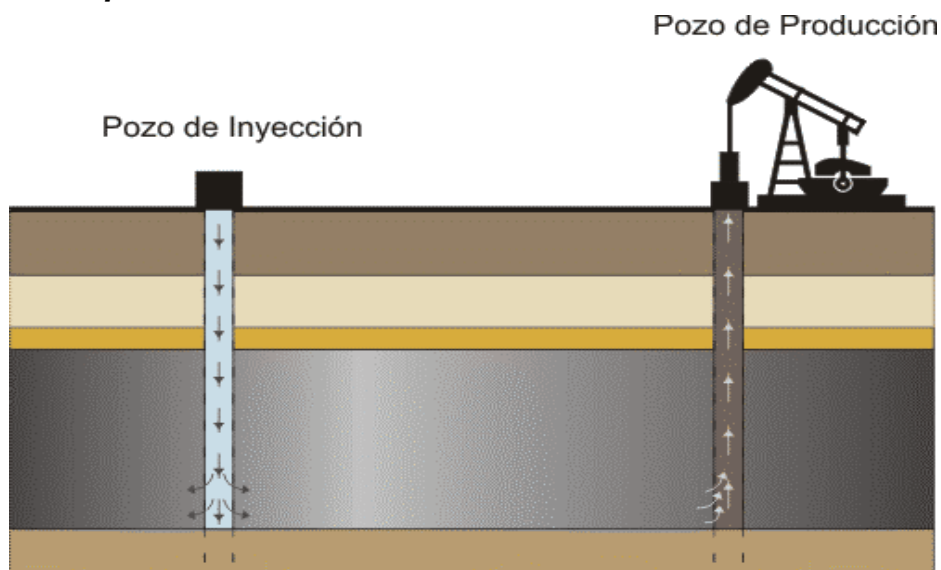
### **1.1.2 Producción terciaria**

La recuperación asistida es generalmente considerada como la tercer o última etapa de la secuencia de procesamiento del petróleo, en ciertos casos se la considera como una producción terciaria. El primer paso o etapa inicial del procesamiento del petróleo comienza con el descubrimiento del yacimiento, utilizando los mismo recursos que la naturaleza provee para facilitar la extracción y la salida del crudo a la superficie (generalmente se utiliza la expansión de los componentes volátiles y el pumping o bombeo forzado para removerlo hacia la superficie). Cuando se produce una considerable disminución de esta energía, la producción declina y se ingresa en la etapa secundaria donde energía adicional es administrada al reservorio por inyección de agua. Cuando la inyección de agua deja de ser efectiva por la evaluación entre una pequeña extracción de crudo y un elevado costo de la operación, se considera de mayor provecho el tratamiento del pozo. Se inicia en este punto el tratamiento terciario o recuperación asistida del pozo de petróleo. El pozo se encuentra en la etapa final de su historia utilizable y por lo tanto se comienza a entregarle a la misma energía química y térmica con el fin de aprovecharlo y recuperar al máximo la producción. Actualmente el desarrollo de la técnica de recuperación permite aplicar este método en cualquier momento de la historia útil del pozo, siempre y cuando sea obvia la necesidad de estimular la producción.

El total de la producción de petróleo, combinando el proceso o etapa primaria y secundaria es del orden del 40 % respecto de la cantidad original de materia prima en el lugar. Por eso, la recuperación asistida es de trascendental importancia en el trabajo con el pozo para aprovechar al máximo el rendimiento económico y útil del mismo.

Antes de iniciar la recuperación asistida, el operador debe recoger tanta información como le sea posible acerca del pozo y del estatus y de las condiciones de saturación del reservorio. Este estudio se realiza mediante ensayos que involucran técnicas analíticas y geológicas acerca de la morfología del terreno. Toda esta cadena de información fundamenta las bases racionales para la predicción de reservas recuperables de petróleo mediante las distintas técnicas que puede involucrar una recuperación asistida. Los procedimientos de recuperación involucran la inyección de compuestos químicos disueltos en agua, inyección de gases miscibles en alternación con las aplicaciones de agua, la inyección de las denominadas micellar solutions (que son micro emulsiones compuestas por surfactantes, alcoholes y aceites crudos.), la inyección de vapor, y la combustión in-situ.

**Figura 2. Recuperación asistida**

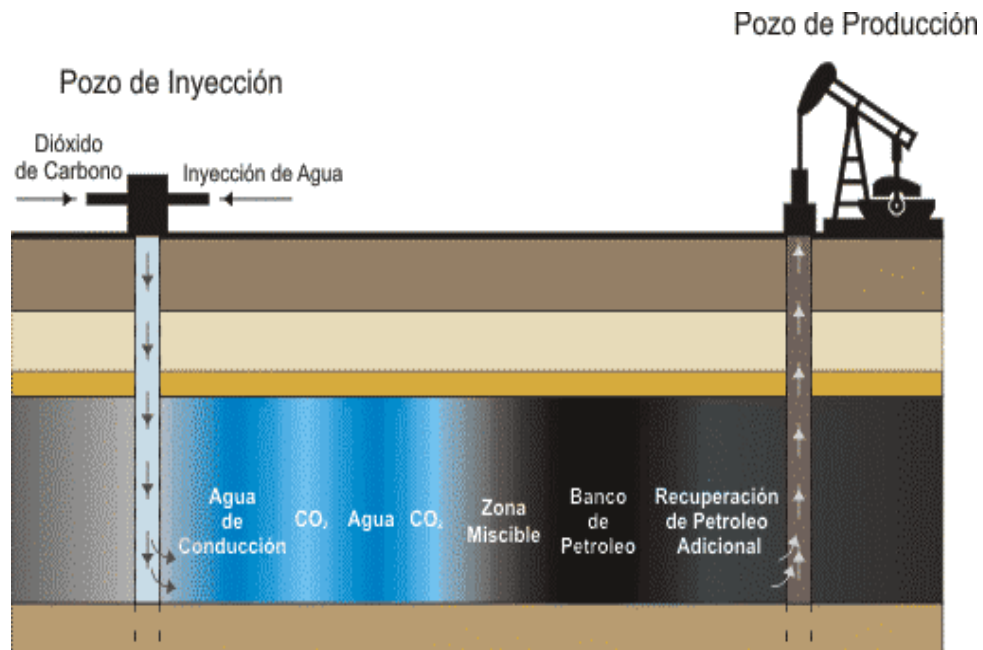


**Fuente: Textos científicos punto com. Recuperación asistida de petróleo, <http://www.textoscientificos.com/petroleo/recuperacion>**

El procedimiento químico general de una recuperación asistida se ilustra en la figura 2, utilizando el método específico de polímeros alcalinos. Por lo general, la introducción de productos químicos a un pozo se encuentra precedida por un preflush (esto consiste en la inyección de agua de baja salinidad o de contenidos

salinos determinados por adición a la misma de cantidades específicas.) para producir un buffer acuoso compatible entre el reservorio de alta salinidad y las soluciones químicas, las cuales pueden ser adversamente afectadas por las sales en solución. Los aditivos químicos son del tipo de detergentes (generalmente petróleo sulfonados.), polímeros orgánicos (para incrementar la eficacia del removido en un reservorio heterogéneo.) y micellar solutions. La solución alcalina u otras soluciones son inyectadas luego de que se haya realizado el preflush del pozo. Dicha inyección se halla proseguida por la inyección de una solución de polímeros (usualmente un poliacrilamida o polisacárido) para incrementar la viscosidad del fluido, ganar espacio y minimizar pérdidas por dilución o channeling. Finalmente, la salinidad del agua adicionada que siga a la inyección del polímero es aumentada respecto de la concentración normal que caracterizan a los fluidos petroquímicos.<sup>4</sup>

**Figura 3. Recuperación asistida fases**



**Fuente: Textos científicos punto com. Recuperación asistida de petróleo, <http://www.textoscientificos.com/petroleo/recuperacion>**

<sup>4</sup> Textos científicos punto com. Recuperación asistida de petróleo, <http://www.textoscientificos.com/petroleo/recuperacion>

Otro tipo de recuperación asistida de reservorio saturado, consiste en la inyección de gas y desplazamiento del crudo por soluciones miscibles como se observa en la figura 1.2. La adición de dióxido de carbono es una de las técnicas más utilizadas en las instalaciones de recuperación en la actualidad.

### **1.1.3 Localización geográfica del campo la Cira Infantas**

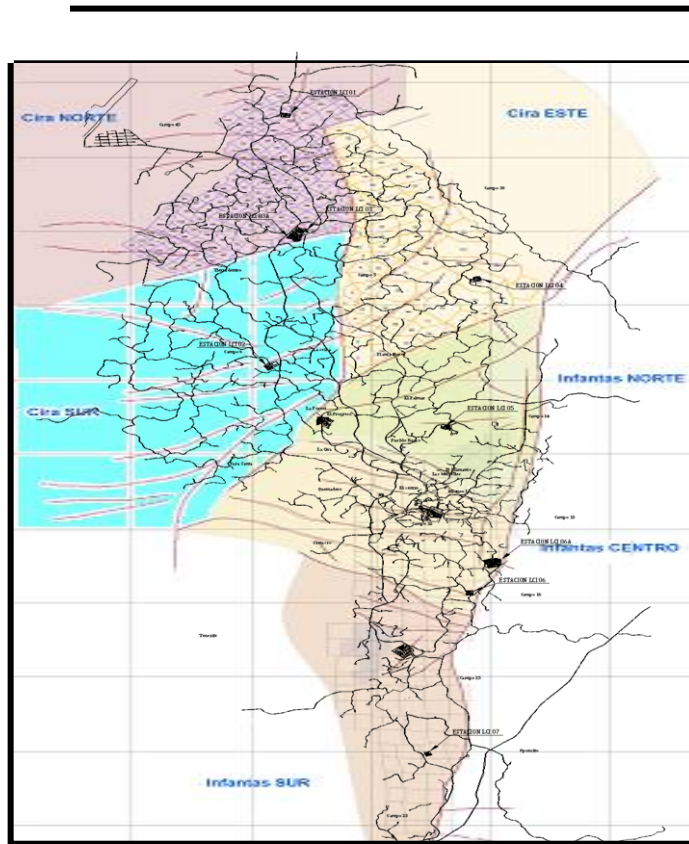
Campos La Cira E Infantas están ubicados en la parte central de la antigua Concesión de Mares, al oriente del río Magdalena y al sur del río Sogamoso, abarcando un área de 160 kilómetros cuadrados y a 22 kilómetros del suroeste de Barrancabermeja en el corregimiento El Centro, Departamento de Santander, Colombia. 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 38.000 Barriles promedio día de crudo, tiene aproximadamente 1.500 Km de vías, el crudo extraído tiene arena y alto corte de agua, usa sistemas de levantamiento artificial como:

- Unidades de bombeo mecánico,
- Bombas de cavidades progresivas (PCP).
- Bombas electrosumerjibles (BES)

Geológicamente el campo se encuentra situado en la sección central del Río Magdalena sobre sedimentos terciarios transportados por el mismo río, que

descansan sobre material cretácico predominantemente marino. Existen 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 5 se encuentra al Nororiente del Campo La Cira-Infantas y tiene una extensión de aproximadamente veinte (20) Kilómetros cuadrados (2000 Hectáreas).

**Figura 4. Mapa del campo La Cira Infantas**

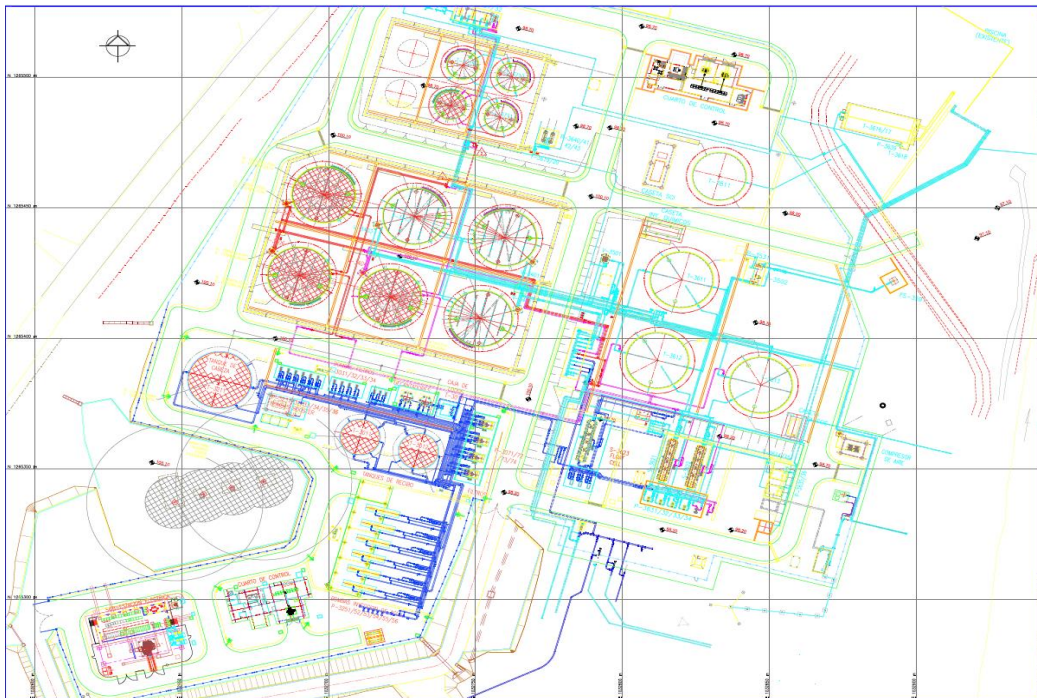


**Fuente: Presentación Facilidades La Cira Infantas. ECOPETROL S.A.**

#### 1.1.4 Descripción del proceso de inyección de agua en la PIA 5ª

La planta de inyección PIA 5A, tiene una capacidad de filtración e inyección de 240.000 Barriles de agua diarios, el proceso inicia con el recibo del agua de reinyección, que proviene de la mega estación LCI 3ª y la estación LCI 2 , la cual es separada del crudo que se recibe de los pozos que llegan a dichas estaciones. El agua es recibida en dos (2) tanques de acero API, posteriormente, esta agua es bombeada por bombas centrífugas Goulds a filtros Petreco a una presión de 50 Psi 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 centrífugas booster a mínimo 45 Psi a las bombas multi-etapas centrífugas de inyección, y de estas es bombeada al anillo de inyección, el cual es repartida a los diferentes pozos de inyección, del área Cira Norte, Cira Este y Cira Sur.

**Figura 5. Panorámica General Planta de Inyección 5A.**



**Fuente. Sistema de Información LCI ECOPETROL S.A.**

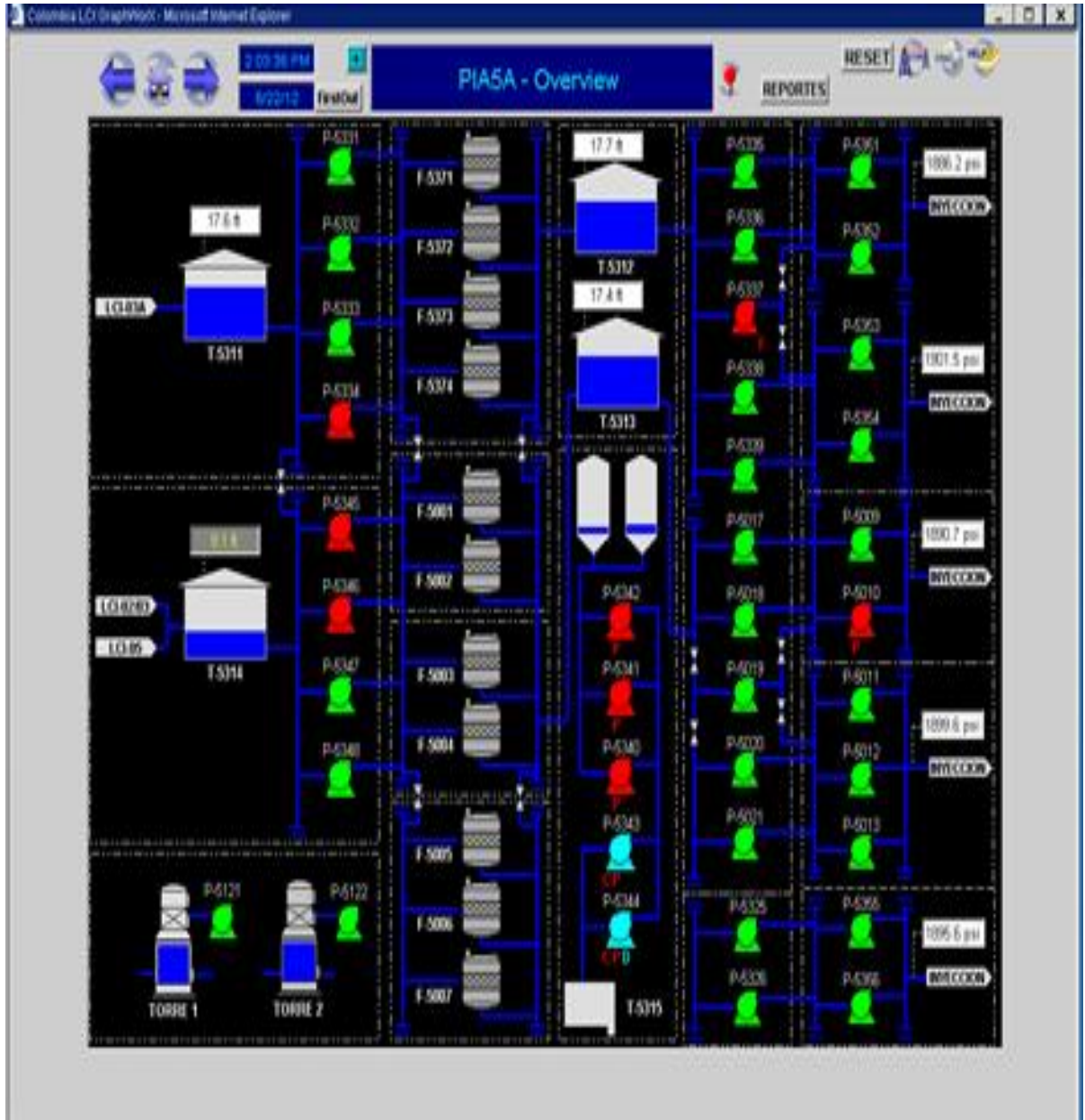
### **1.1.5. Descripción de la planta de inyección PIA 5ª.**

A manera de resumen se hace una breve descripción de la planta, la cual estará compuesta por los siguientes equipos principales:

- Dos tanques de acero de 16000 barriles de capacidad volumétrica c/u, de recibo de agua producida.
- Dos tanques de acero de 16000 barriles de capacidad volumétrica para cabeza de bombas booster.
- 1 tren de 4 bombas de filtros de 40 MBPD de capacidad cada una.
- 1 tren de 4 filtros de cascara de nuez Petreco de 40 MBPD de capacidad cada uno y sus sistemas asociados de decantadores, bombas de agua y de lodos.
- 1 tren de 12 bombas booster.
- 1 tren de bombas de inyección controladas para 2000 psi consistente en 4 bombas Reda de 30 MBPD, 3 bombas Centrilif de 20MBPD con arrancador Benshaw y 5 bombas Centrilif de 30MBPD con arrancador Benshaw
- 1 Sub Estación eléctrica y su respectivo edificio.
- 1 cuarto de control y CCM
- 1 sistema de compresión de aire
- Vías internas y cerramiento

Esquema general de una Planta de Inyección de Agua:

Figura 6. Esquema General Planta de Inyección de agua PIA 5A.



Fuente: Iconics Sistema Scada Oxy.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El campo La Cira Infantas es un proyecto desarrollado entre Occidental Andina y Ecopetrol S.A. que inicio en el año 2005 a fin de recuperar 150 millones de barriles de reservas adicionales para ayudar a frenar la caída de la producción de petróleo del país y extender la fecha de la perdida de la autosuficiencia petrolera. El proyecto dio inicio con un porcentaje de partición de 48% y 52% respectivamente, la operación del campo OPEX se encuentra a cargo de Ecopetrol S. A. y la construcción de Facilidades está a cargo de Occidental Andina CAPEX.

La Cira Infantas es un campo de recuperación secundaria, el cual inicio a mediados del 2005 con una producción de 5600 BPD, actualmente registra una producción Promedio diaria de 38000 BPD.

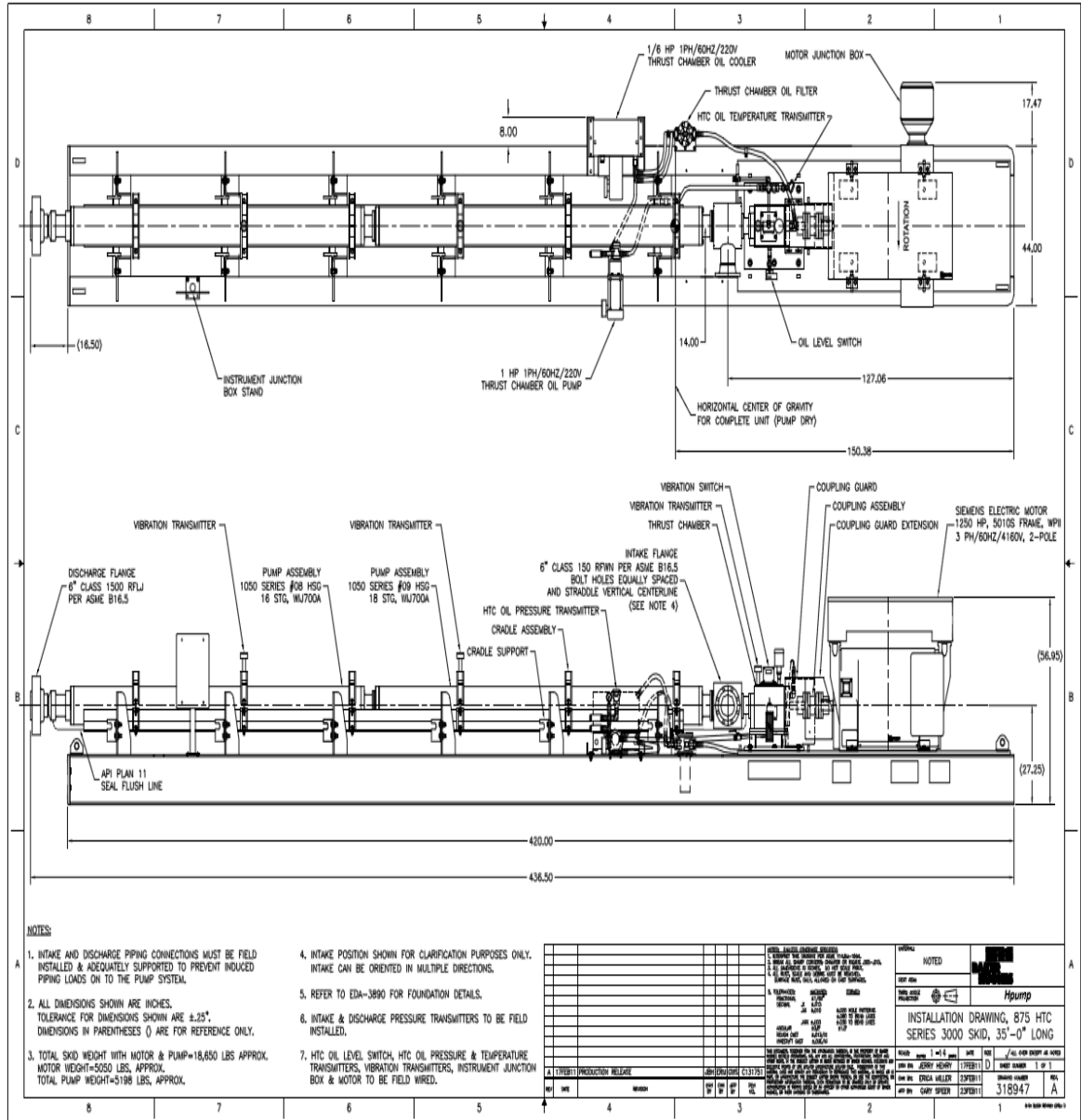
El proyecto inicia con la construcción de una facilidad de Inyección para 240 KBPD de agua industrial, siendo las Bombas multi-etapas de inyección de agua las encargadas del suministro de caudal y presión a los pozos inyectoros del Campo. Inicialmente se cuenta con 12 Bombas Multi etapas de doble cuerpo en Planta de Inyección 5A, posteriormente se amplía la capacidad de Inyección del Campo con la Construcción de la Facilidad PIA 6 con 8 Bombas Multi etapas doble cuerpo y finalmente PIA 3 con 6 Bombas Multi-etapas.

El sistema de bombeo por inyección se compone de motor ya sea eléctrico o a gas, cámara de empuje, bombas de 11 y 14 etapas y facilidades (tubería de succión y descarga, válvulas motorizadas bombas booster de suministro en la succión, protecciones y válvulas cheques).

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 genera 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 módulo que las RTD del motor) y el nivel del aceite de lubricación.

Desde el inicio de la operación de las plantas de inyección de agua se han tenido muchos inconvenientes con el mantenimiento de estos equipos ya que poseen elementos de alta tecnología y otros elementos sellados solo conocidos por sus fabricantes. Estos inconvenientes han llevado a daños parciales y totales en los diferentes elementos de la bomba, costos elevados en mantenimiento y altos tiempos de parada.

Figura 7. Plano sistema HP Pump



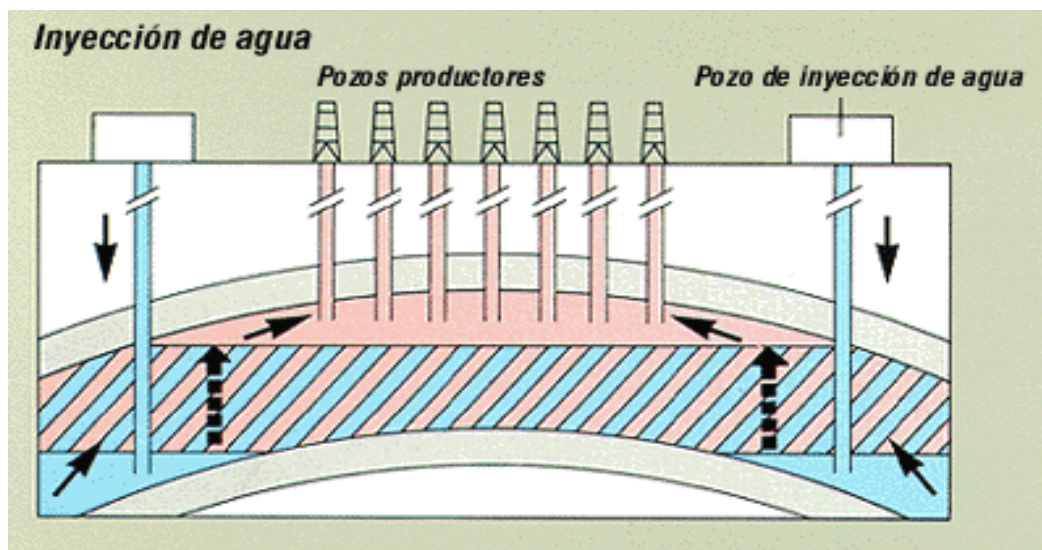
Fuente: Manual de operación y mantenimiento bombas multi-etapas centrífugas

### 1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO

El campo La Cira infantas se encuentra ubicado en el Magdalena medio y pertenece a la Gerencia Regional Magdalena Medio, es un campo de recuperación secundaria el cual se encuentra actualmente operado por Ecopetrol S.A. en convenio con Occidental Andina como constructor de facilidades.

La inyección de agua es un proceso donde el petróleo es llevado hacia los pozos de producción por acción de la presión ejercida por el agua, esta operación fue realizada por primera vez en la ciudad de Pithole, al oeste de Pennsylvania, en el año 1985. Hoy en día el método de inyección de agua es el más utilizado de los métodos de recuperación secundaria, cubriendo así más de la mitad de la producción de los pozos a nivel mundial.<sup>5</sup>

**Figura 8. Esquema de desplazamiento de petróleo por agua**



Fuente: La Comunidad Petrolera. Inyección de agua. <http://industria-petrolera.lacomunidadpetrolera.com/2009/01/inyeccion-de-agua.html>

<sup>5</sup> La Comunidad Petrolera. Inyección de agua. <http://industria-petrolera.lacomunidadpetrolera.com/2009/01/inyeccion-de-agua.html>.

El desarrollo de esta monografía pretende profundizar en los conceptos teóricos del RCM mantenimiento centrado en la confiabilidad bajo el contenido operacional considerado como base para la optimización del mantenimiento preventivo y predictivo de las cámaras de empuje de las bombas de inyección de agua en la superintendencia la Cira Infantas.

El objetivo de este proyecto es reducir tiempos de mantenimiento y evitar paradas no programadas en los equipos de Inyección de Agua de las Planta de Inyección 5A, aumentando la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. En resumen, la proyección del proyecto es, aumentar la inyección de agua y garantizar la seguridad e integridad del personal y de sus instalaciones.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Aplicar los conceptos de RCM y las herramientas de Confiabilidad para el mejoramiento de la estrategia de mantenimiento en las cámaras de empuje del sistema de bombeo de agua industrial planta de Inyección 5A del Campo La Cira Infantas de Ecopetrol.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Identificar, por medio de un análisis de costos que las cámaras de empuje modelo HTC875 es un componente crítico en el sistema de bombeo de agua industrial de las Plantas de Inyección.

Diagnóstico, análisis de las rutinas y estándares de trabajo que actualmente alimentan el sistema de información Ellipse de Ecopetrol para el sistema de inyección y proponer las acciones de mejora con el fin de optimizar tiempos y reducir costos.

Desarrollar una propuesta de mejora de la estrategia de mantenimiento para las cámaras de empuje basados en conceptos RCM y herramientas de confiabilidad con el fin de disminuir los costos de y aumentar la confiabilidad operativa del sistema de bombeo de Agua Industrial del campo La Cira Infantas.

Realizar un análisis costo beneficio de la propuesta de mantenimiento planteada en este proyecto versus mantenimiento actual proyectado a un año

Realizar un análisis de los repuestos que actualmente se encuentran en el sistema de información de Ellipse y proponer el stock mínimo de repuestos para los componentes de las cámaras de empuje.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 GLOSARIO

- Almacenamiento: Es la acción y resultado de poner o guardar un fluido en cualquier tipo de recipiente.
- ANSI: American National Standard Institute. Estándares usados en la industria tales como el ANSI B 31.4, ANSI B31.3, ANSI 31.8, ANSI 16.5
- Bomba Centrífuga: es un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en energía cinética y potencial requerida. El fluido entra por el centro del impulsor, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba, la que por el contorno su forma lo conduce hacia la salida o hacia el siguiente impulsor (siguiente etapa en caso de bombas multi etapas).
- Energía cinética: La energía cinética de un cuerpo es una energía que surge en el fenómeno del movimiento. Está definida como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa dada desde su posición de equilibrio hasta una velocidad dada.
- Fluctuación: Es el cambio u oscilación en el flujo del fluido a través de la tubería
- Parte por millón (ppm): es una unidad de concentración utilizada para indicar una relación en volumen o en peso. En volumen indicaría por ejemplo cuantos

barriles (galones) del compuesto indicado con relación a un millón de barriles (o millón de galones) de fluido.

- PLC: Es un Controlador lógico programable.
- Potencia de un motor: La potencia indica la rapidez con que puede trabajar el motor. La potencia máxima es el mayor número obtenido de multiplicar el torque del motor por la velocidad de giro en que lo genera.
- Torque: Indicador del funcionamiento de un motor, no dice qué tanta fuerza puede producir. El torque es la fuerza que producen los cuerpos en rotación (un motor produce fuerza en un eje que se encuentra girando). Para medirlo, los ingenieros utilizan un banco ó freno dinamométrico que no es más que una instalación en la que el motor puede girar a toda su capacidad conectada mediante un eje a un freno o balanza que lo frena en forma gradual y mide la fuerza con que se está frenando.
- Válvula de Control: instrumentos de control más esenciales que pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases. Pueden ser de nivel, de presión, de flujo, de temperatura. La válvula automática de control generalmente constituye el último elemento en un lazo de control instalado en la línea de proceso y se comporta como un orificio cuya sección de paso varía continuamente con la finalidad de controlar un caudal en una forma determinada. Está compuesta de: un cuerpo de válvula y un actuador.

## 2.2 EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO

No son pocas las definiciones que a lo largo de la historia se le han dado al mantenimiento. En un principio mantener era sinónimo de reparar cuando existía una falla, con el tiempo pasó a ser visto como reparaciones programadas para aumentar la vida útil de los equipos, hasta llegar a la definición más aceptada hoy en día: Asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan<sup>6</sup>.

Esta visión del mantenimiento representa un avance significativo de lo que debe ser el objetivo del mantenimiento. John Moubray, en su libro Mantenimiento centrado en confiabilidad,<sup>7</sup> distingue un camino de tres generaciones de mantenimiento al observar cuales eran las prácticas utilizadas en cada época.

### Primera generación

Cubre el periodo desde 1930 hasta la segunda guerra mundial. En ese momento la maquinaria no estaba altamente mecanizada y no era relevante el tiempo de parada de la máquina. Por esta razón y además de caracterizarse por equipos fiables y sobredimensionados, la prevención de fallas no era una prioridad para los directores de mantenimiento. A su vez, el personal que efectuaba el mantenimiento no requería muchas habilidades.

---

<sup>6</sup>Textos científicos.com. Recuperación asistida de petróleo. 16/06/2005.  
<http://www.textoscientificos.com/petroleo/recuperacion>

<sup>7</sup> MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004. P.2-3

**Tabla 1. Características de la primera generación del mantenimiento**

<b>Expectativas</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Personal</b>
Reparar cuando se rompe	Mantenimiento correctivo	Pocas habilidades

**Fuente: MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004. P.2-3**

### **Segunda generación**

Durante la segunda guerra mundial, se vio disminuida la fuerza laboral, por lo que se aumentó abruptamente la mecanización. Ya durante los años 50's había aumentado la cantidad y complejidad de todo tipo de máquinas y la industria cada día dependía más de ellas. Al depender tan directamente la producción de las máquinas, se empezó a prestar importancia en los tiempo que las máquinas no trabajaban, lo que llevó a la idea que se debía actuar preventivamente ante las fallas, dando lugar al concepto del mantenimiento preventivo, que en un principio consistía principalmente en reparaciones mayores y cambio de componentes a intervalos definidos. La edad de un dispositivo y la probabilidad de falla se pensaba estaban estrechamente relacionadas.

Este tipo de acciones llevaron a incrementar excesivamente los costos de mantenimiento dando lugar al desarrollo de los sistemas de planeación y control que ayudaron a controlarlo y han sido establecidos como una parte del mismo.

**Tabla 2. Características de la segunda generación del mantenimiento**

<b>Expectativas</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Personal</b>
Mayor disponibilidad de la planta. Mayor vida útil de los equipos. Menor costo	Reparaciones programadas. Sistemas de planeamiento y control del trabajo. Computadoras grandes y lentas	Planeador
<b>Fuente: MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004. P.2-3</b>		

### **Tercera generación**

En las décadas de los sesentas y setentas se volvió mucho más prioritario los impactos a la producción por tiempos de parada de las máquinas, agravados por la tendencia mundial a sistemas de producción "Just in time", en donde una pequeña falla de cualquier equipo probablemente podría causar la parada de toda la planta. Las expectativas del usuario subieron y el mantenimiento debió evolucionar para cumplirlas.

La preocupación por la seguridad y el medio ambiente es otro de los temas que desde hace unos años tomó fuerza, inclusive por encima de la producción, algunas compañías literalmente deben adecuarse a las expectativas de seguridad y cuidado ambiental o dejar de operar. Aquí es cuando la dependencia a la integridad de los activos (Que puedan causar algún impacto) cobra una nueva magnitud que va más allá del costo, y que se torna en un ítem de supervivencia de la organización. En muy poco tiempo el mantenimiento pasó de no tener importancia a estar en la más alta prioridad de las organizaciones.

**Tabla 3. Características de la tercera generación del mantenimiento**

Expectativas	Técnicas	Personal
Mayor disponibilidad y confiabilidad de la planta. Mayor seguridad. Mejor calidad del producto. Ningún daño al medio ambiente. Mayor vida de los equipos. Mayor costo-eficacia	Monitoreo de condición. Diseño direccionado a la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento. Estudio de riesgos. Computadoras pequeñas y rápidas. Análisis de modos de falla y sus efectos. Sistemas expertos. Trabajo multifacético y en grupos	Especializado.
<p><b>Fuente: MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004. P.2-3</b></p>		

Esto llevó a desarrollar nuevas investigaciones que cambiaron muchas de las creencias más profundas en torno al mantenimiento. En particular la generalizada teoría que ligaba la edad de un activo con la probabilidad de falla del mismo, cada día parece tener menos validez, de hecho se han revelado seis patrones de falla distintos. Lo que muestra que muchas de las tareas que tradicionalmente venían haciéndose en nombre del mantenimiento preventivo no logren ningún resultado, de hecho pueden llegar a ser contraproducentes aunque se hagan de forma planeada.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> MOUBRAY, John. Mantenimiento centrado en confiabilidad. México: Aladon, 2004. p.4

### 2.3 Descripción de los componentes del sistema de bombeo horizontal

- **GENERAL**

Los principales componentes del sistema son: la bomba centrífuga multi-etapas, cámara de empuje (HTC), admisión y descarga de fluido, instrumentación y motor, todos estos instalados en un patín de acero.

**Figura 9.** *Sistema de bombeo horizontal*



**Fuente:** IOM manual Fabricante Baker Centrilift

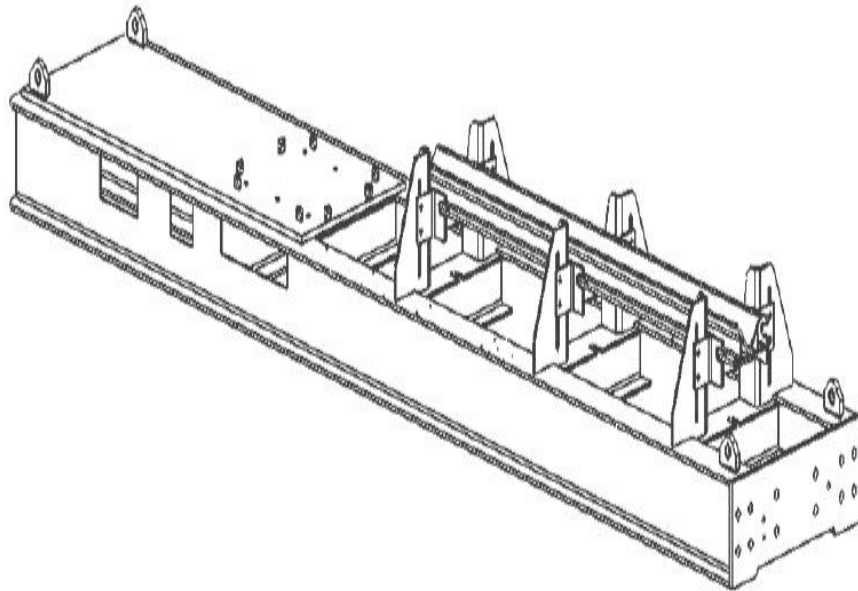
- **PATIN**

El patín es fabricado de acero y provee la plataforma para montar todos los componentes.

El sistema completo es alineado con láser en la fábrica antes de ser embarcado, la rigidez del patín minimiza la desalineación durante el transporte, instalación, y vibración normal durante la operación.

La bomba es soportada por una sección longitudinal atornillada a una cuna en forma de "V". Que permite desplazamiento horizontal y vertical para efectos de la alineación. Una serie de grapas aseguran la bomba a la cuna.

**Figura 10.Patin**



**Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift**

- **MOTOR**

Los sistemas HPump utilizan diferentes tipo de motor bien sea eléctricos o de combustión.

**Figura 11. Motor eléctrico**



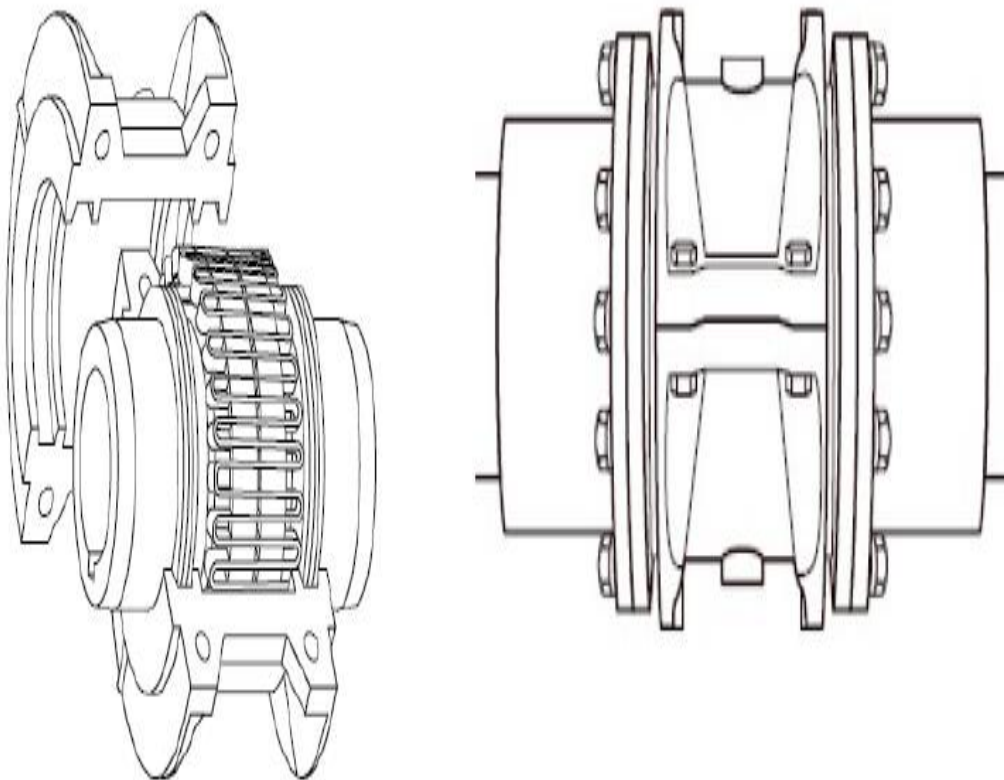
**Fuente: Registro fotográfico propio.**

- **ACOPLE DEL MOTOR**

**Acople Cerrado (Grid Type) Espaciador (Grid Type)**

Acoples de tipo Grilla son utilizados para conectar la HTC al motor, existen del tipo acople cerrado o espaciador. El acople espaciador permite retirar la HTC sin necesidad de remover las tuberías de alimentación y descarga.

**Figura 12. Acople del motor**



**Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift**

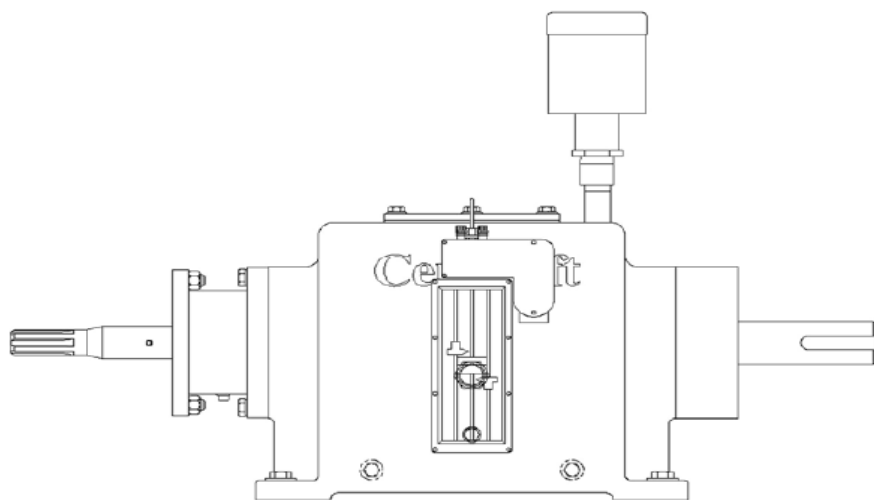
- **CAMARA DE EMPUJE HORIZONTAL (HTC)**

La HTC es un componente lubricado por aceite que tiene 3 propósitos principales: Transmitir el torque del motor a la bomba, absorber las cargas generadas por la bomba y sellar el fluido de bombeo del ambiente. La HTC utiliza una base modular de montaje que sirve para ser conectada a motores de diferente altura. Hay disponibles 4 modelos de HTC con diferente capacidad de carga: 1.XE, 1.XT, 3.X, y 875. Cada HTC está compuesta de carcasa, eje, rodamientos, sello del eje y sello mecánico para fluido. Diferentes tipos de instrumentos están disponibles para Medir la vibración, el nivel de aceite y temperatura de la HTC.

### **Modelo 875**

El modelo HTC 875 también va montado sobre patas, y tiene la misma impresión de montaje que las de la serie 1. Este modelo de cámara de empuje posee la misma capacidad de carga que el modelo 3.X y también requiere sistema independiente de lubricación.

**Figura 13. Cámara de empuje**

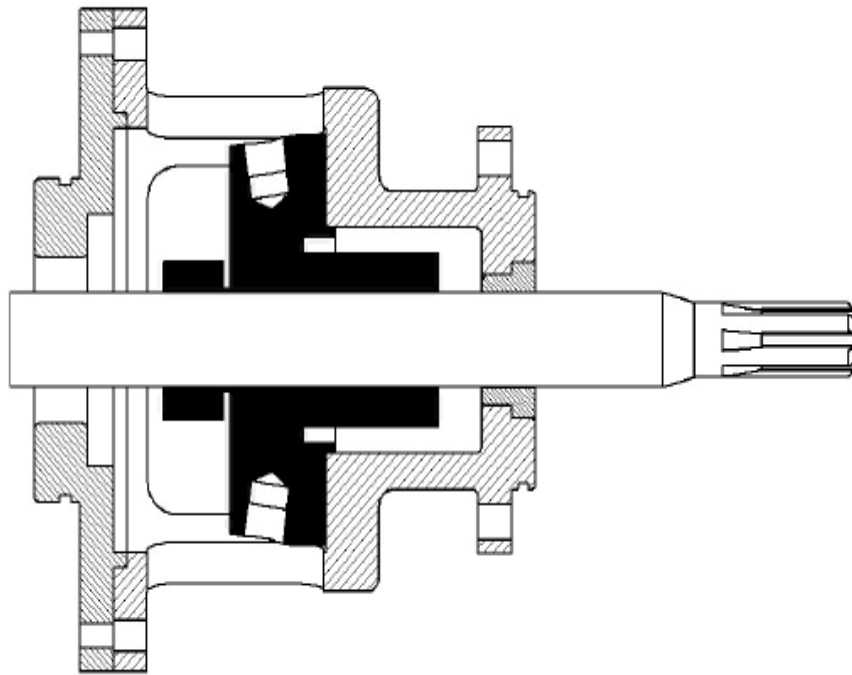


**Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift**

- **SELLO MECANICO PARA FLUIDO**

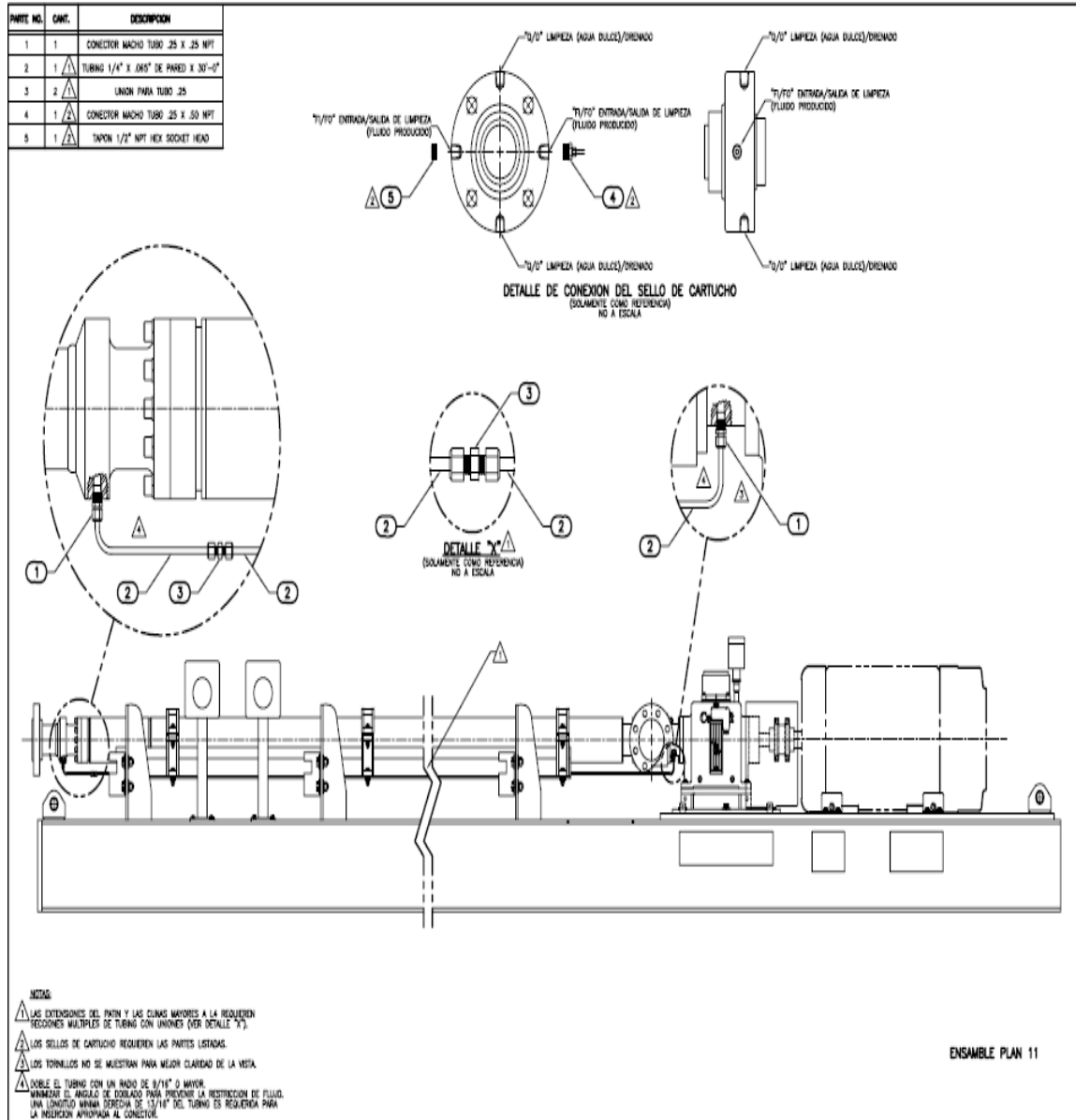
Este sello está diseñado para mantener el fluido a ser bombeado aislado del medio ambiente. Normalmente este sello es instalado en la cabeza de la HTC o en la cámara para sello. Gran variedad de sellos y sistemas de lavado de sellos están disponibles en el mercado para diferentes aplicaciones. Las propiedades del fluido y condiciones de operación son las que indican que tipo de sello se debe utilizar.

**Figura 14. Sello tipo cartucho**



**Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift**

**Figura 15. Plan de sellado sistema horizontal**

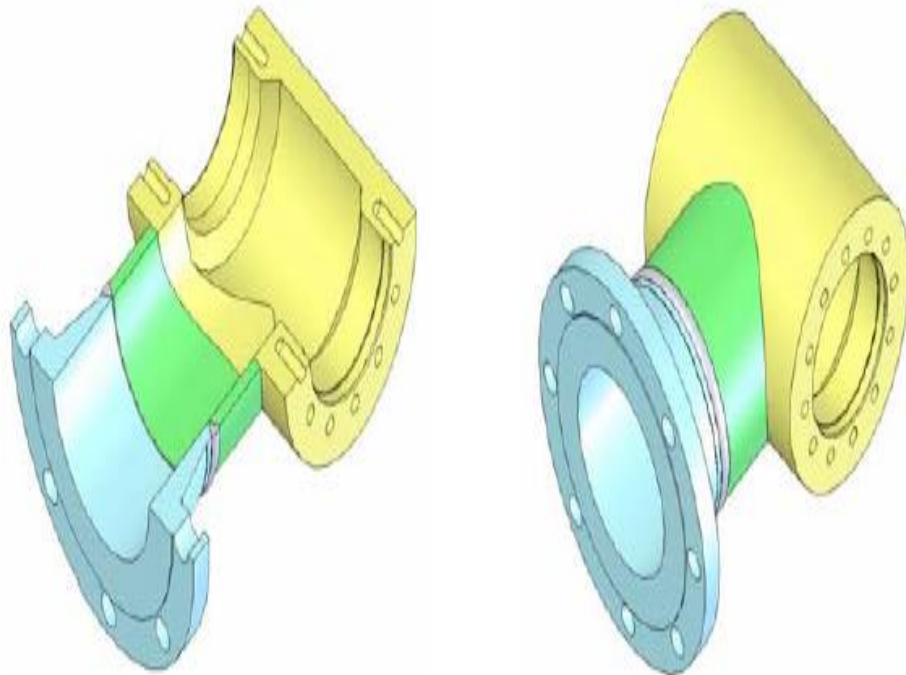


Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift

- **ADMISION (INTAKE)**

El ensamble soldado de admisión va atornillado a la bomba y a la HTC. Su función principal es permitir la entrada de fluido a la bomba. Admisiones de diferentes tamaños y tipos de brida están disponibles para diversas aplicaciones de bombeo. La dirección de la admisión puede ser cambiada en el campo (incrementos de 90°) de acuerdo al arreglo disponible de las tuberías.

**Figura 16. Admisión producto**

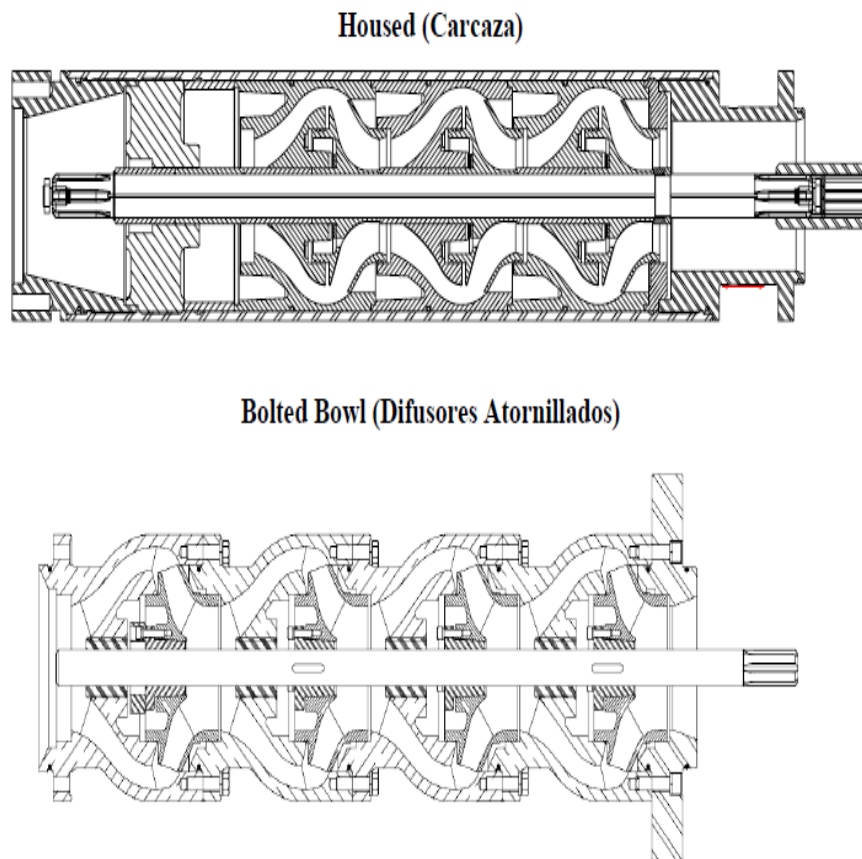


**Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift**

- **BOMBA**

Es una bomba centrífuga multi-etapas, instalada horizontalmente. Tiene varios difusores estacionarios y el mismo número de impulsores giratorios. La cabeza de la bomba va atornillada a la descarga y la base atornillada a la admisión. Hay 2 tipos de bomba disponibles dependiendo de los requerimientos de caudal y presión: De carcaza o difusores atornillados.

**Figura 17. Bomba multi-etapas**

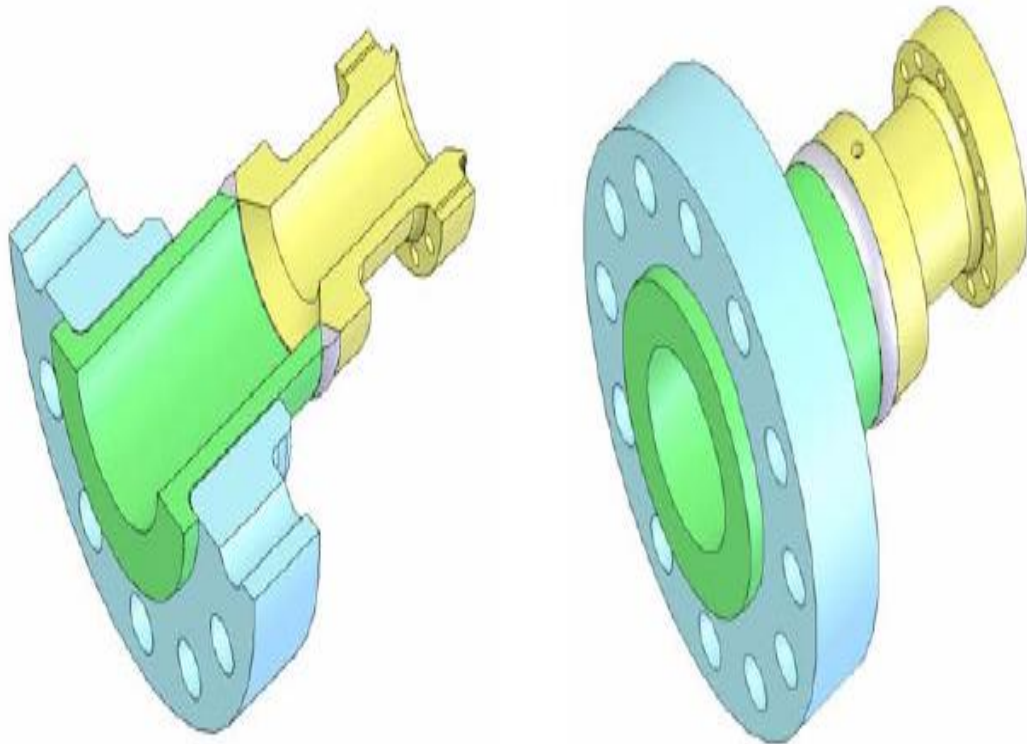


**Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift**

- **DESCARGA**

El ensamble soldado de descarga va atornillado a la cabeza de la bomba, lleva el fluido de alta presión de la bomba a la línea de flujo. Hay disponibilidad de diferentes tamaños y tipos de brida de acuerdo a los requerimientos de la línea de flujo. La descarga posee una brida rotatoria que facilita los trabajos de conexión.

**Figura 18. Descarga de producto**



**Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift**

- **INSTRUMENTACIÓN**

La instrumentación estándar de los sistemas HPump son los siguientes: vibración de la HTC, nivel de aceite de la HTC, presión de entrada y descarga de la bomba. Están disponibles instrumentos para medir la temperatura del aceite de la HTC y embobinado del motor. Los instrumentos de medición pueden ser cableados a un controlador de velocidad variable (VSD) Centrilift o cualquier sistema de control utilizado por el cliente.

## **2.4 OPERACIÓN SISTEMA HORIZONTAL**

Las bombas centrifugas multi-etapas están diseñadas para operar en un rango específico de presión y caudal. La operación fuera de éste rango puede ocasionar daño en las etapas de la bomba por empuje ascendente o descendente resultando en la reducción del tiempo de vida útil de los equipos. Operar dentro del rango establecido mejora la eficiencia y reduce el consumo de potencia. La presión mínima requerida varía dependiendo de cada modelo de bomba.

## **PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE**

Hay varios aspectos que deben ser revisados antes del arranque inicial del equipo y cada vez que el mismo ha estado fuera de servicio por un periodo de tiempo considerable.

- Verifique que la bomba esté girando en el sentido correcto haciendo un arranque del motor.

- Verifique el nivel de aceite de la HTC en el visor o manómetro.
- Si el equipo está provisto de un sistema de refrigeración para la HTC, arranque el sistema y púrguelo antes de arrancar la unidad de bombeo.
- Revise todos los tornillos, cableado y líneas de flujo.
- Revise todos los manómetros, válvulas, y todos los instrumentos para verificar su correcta posición u operación, verifique el punto de ajuste de todos los instrumentos en el arrancador.
- Asegúrese de tener la válvula de la línea de flujo de la admisión completamente abierta.
- Asegúrese que la válvula de la descarga esté por lo menos un 25% abierta; puede ser necesario hacer contra-presión ajustando la válvula para mantener la bomba dentro de su rango de operación mientras que el sistema se estabiliza.
- Asegúrese que la unidad esté nivelada y no haya vibración excesiva.
- Si está operando con un variador de frecuencia, arranque a baja velocidad para revisar a baja presión que no haya fugas.

## **OPERACIÓN DE BOMBA**

### **I. SUMINISTRO DE FLUIDO**

Asegúrese que las válvulas de la línea de flujo estén abiertas, y que haya fluido en la línea. Si está utilizando una bomba para aumentar la presión (booster), ésta

debe estar operativa, si hay filtros instalados en el sistema estos deben estar limpios.

## **II. PURGA**

Retire todo el aire que haya en el área de admisión (Línea, admisión y bomba), asegúrese que la bomba esté llena de fluido (cebada) antes de dar arranque al equipo.

## **III. VALVULAS DE DESCARGA**

Asegúrese que todas las válvulas estén ajustadas adecuadamente y los equipos aguas abajo estén listos para recibir el fluido. Durante el período de estabilización del fluido, aplique la contra-presión requerida para garantizar que la bomba siempre esté operando en su rango.

## **IV. PRECAUCIONES DURANTE LA OPERACIÓN**

Para evitar el recalentamiento, desgaste o fallas prematuras en la bomba nunca la opere bajo las siguientes condiciones:

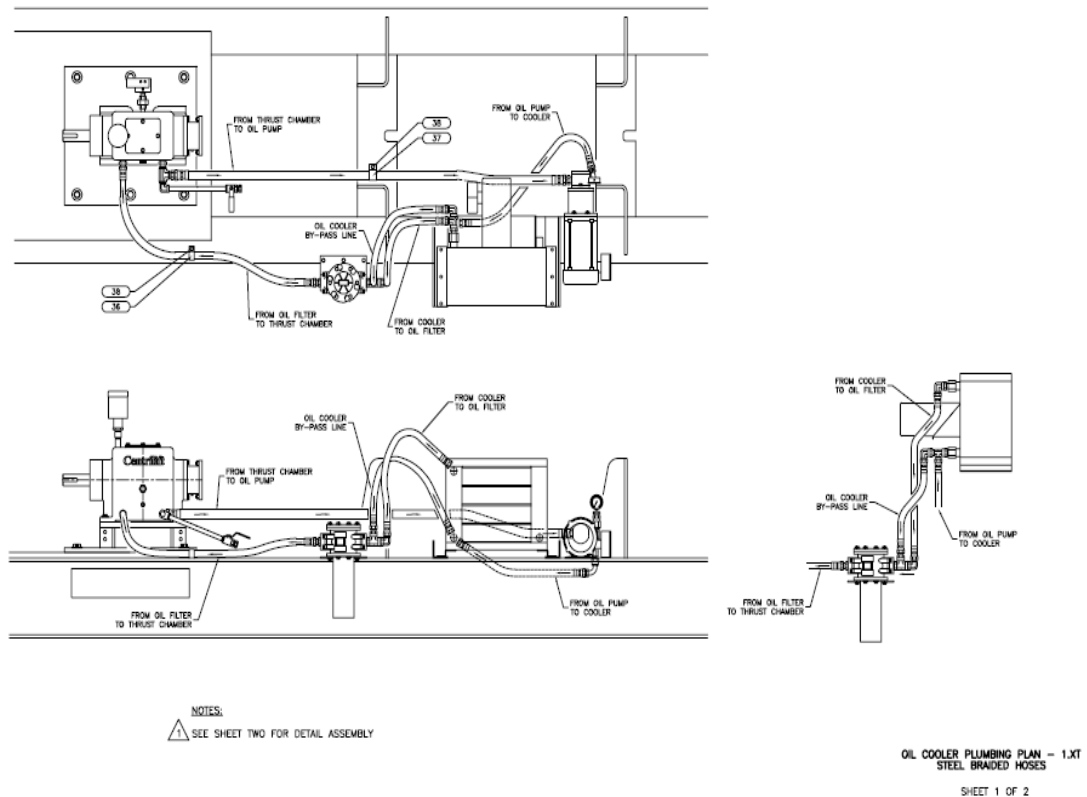
- Operar fuera del rango de diseño.
- Operación en condiciones de caudal o cabeza mínimas.
- Tener la bomba sin fluido.
- Cuando el fluido a bombear contiene cantidades considerables de gas o aire.

- Cuando el fluido a bombear contiene arena o abrasivos. Los abrasivos generan un daño gradual en las bombas.

## OPERACIÓN CAMARA DE EMPUJE HTC

Para los modelos 1.XT y 1.XE, revise el nivel de aceite en el visor y agregue si es necesario. El nivel de aceite debe ser revisado con el equipo en operación y cuando esté caliente. Cuando se excede el nivel de aceite, éste puede salir por los sellos del eje.

**Figura 19. Plano sistema de lubricación de Cámara de empuje**



**Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift**

## **OPERACION ACOPLE DEL MOTOR**

Asegúrese de tener la guarda protectora instalada antes de arrancar el equipo. El acople estándar en una malla de acero flexible diseñada para soportar la potencia y velocidad del motor. El acople debe ser engrasado siguiendo las instrucciones del fabricante y mantenimiento preventivo

## **OPERACIÓN MOTOR ELECTRICICO**

El motor normalmente es de 2 polos 3600 RPM con rodamientos de bola o manguitos en cada punta del eje. No debe ser operado por encima de la velocidad recomendada por el fabricante. Siga las instrucciones de lubricación mostradas en la placa. Amperaje, y factor de servicio.

## **OPERACIÓN MOTOR DE COMBUSTIÓN**

La operación de estos motores debe ser estrictamente bajo las indicaciones del fabricante.

## **OPERACIÓN CAJA INCREMENTADORA DE VELOCIDAD**

Normalmente estos motores trabajan a una baja velocidad que no es recomendable para la eficiente operación de las bombas, por lo tanto es necesario utilizar una caja de engranajes que incrementa la velocidad. Estas cajas normalmente necesitan sistemas de refrigeración del lubricante,

## **OPERACIÓN PANEL DE CONTROL DEL MOTOR**

Si el motor que va a utilizar está provisto de un panel de control, toda manipulación debe estar de acuerdo a las instrucciones provistas en el manual del fabricante.

## **CHEQUEO DE OPERACIÓN**

Todos los manómetros e instrumentos deben indicar condiciones normales y seguras de operación, la velocidad de la bomba debe ser verificada. Si alguna condición está fuera de los rangos normales de operación el sistema debe ser apagado.

## **PROCEDIMIENTOS DE APAGADO**

Se recomienda seguir la siguiente secuencia de pasos cuando se vaya a apagar la unidad:

- Ajuste la válvula de la descarga a flujo mínimo
- Apague el motor desde el panel de control.
- Cierre la válvula de la descarga por completo.
- Inmediatamente de que el eje de la bomba pare de rotar cierre la válvula de la descarga.

## 2.5 REPUESTOS RECOMENDADOS PARA SISTEMAS HORIZONTALES

La siguiente lista indica los repuestos que se recomienda tener en el almacén, esta lista es por unidad instalada. Dependiendo de la especificación de la unidad puede haber algunos repuestos que no estén en la lista pero que se deben tener.

**Tabla 4 REPUESTOS RECOMENDADOS (por el fabricante)**

COMPONENTE	PERIODO DE TIEMPO			METODO DE ALMACENAMIENTO
	Arranque	0-2 Años	2+ Años	
Grasa del acople de malla	X	X	X	En empaque original
Acople de malla		X	X	Lejos de contaminantes
Empaque del acople		X	X	Lejos de contaminantes
Aceite para HTC	X	X	X	Depósito Cerrado
Respirador HTC		X	X	En empaque original en sitio seco
Filtro del sistema de lubricación de la HTC		X	X	En empaque original lejos de posibles contaminantes
Sistema de lubricación de la HTC			X	En empaque original lejos de fuentes de vibración
HTC			X	Tapada, llena de aceite lejos de Fuentes de vibración
Sellos de cartucho		X	X	En empaque del fabricante (Cerrados)
O-Rings de admisión		X	X	En empaque original lejos de posibles contaminantes
O-Rings de descarga	X	X	X	
O-Rings de HTC		X	X	
Bomba(s)			X	Tapada, llena de fluido preservativo adecuado lejos de Fuentes de vibración
Sistema completo (HPump)			X	Lejos de Fuentes de vibración y en sitio cerrado

**Fuente: IOM manual fabricante Baker Centrilift**

## 2.5 CONCEPTOS DE CONFIABILIDAD

El Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) es una herramienta de prevención que permite identificar los posibles fallos de un producto o proceso, bien sea nuevo o ya existente, determinando sus causas. Con su utilización se pueden evaluar la gravedad de los efectos de los fallos y, por tanto, establecer líneas de actuación con prioridades para evitarlos; En general, su principal objetivo es asegurar que no se produzcan los fallos más probables ni lo más graves.<sup>9</sup>

El AMFE es una herramienta de uso continuo y, por tanto, necesita constantes actualizaciones. Una limitación que se le atribuye es que, aunque analiza en detalle muchos fallos de elementos, no tiene en cuenta la combinación de los fallos que se pueden producir. Por ejemplo, en un automóvil, un fallo en el cinturón de seguridad puede ser importante, pero si además se produce un fallo en el sistema de frenado, podría ser catastrófico.

“Para poder analizar y presentar una propuesta respecto a un equipo y con base a RCM se deben realizar 7 preguntas básicas.

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de ejecución asociados con el activo, en su actual contexto operacional?
2. ¿En qué forma falla el equipo, con respecto a la función que cumple en el contexto operacional?
3. ¿Que causa la falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando falla?
5. ¿Qué ocurre si falla?
6. ¿Qué puede hacerse para evitar la falla?

---

<sup>9</sup> Ensayo. DATOS, 'Diego Camilo Pérez, 17 de Febrero 2014. <http://clubensayos.com/Informes-De-Libros/Datos/1454695.html>

## 7. ¿Qué puede hacerse si no se conoce una tarea para evitar la falla?”<sup>10</sup>

La primera pregunta busca identificar cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional. Estas funciones son jerarquizadas por funciones primarias, que corresponden a la naturaleza del activo y por funciones secundarias, que corresponden a la función que se espera que cada activo cumpla.

La segunda pregunta busca identificar la falla funcional, la cual se define como la incapacidad de cualquier elemento físico de satisfacer un criterio de funcionamiento deseado. Cualquier elemento puede tener más de una función, cualquier función puede estar sujeta a más de una falla funcional.

La tercera pregunta busca identificar cual es la causa de cada falla funcional, es decir el modo de falla.

La cuarta pregunta busca determinar que sucede cuando ocurre cada falla, en otras palabras, nos pregunta qué pasaría si la falla ocurriera.

Una vez sean determinadas las funciones, las fallas funcionales, los modos de falla y los efectos de los mismos en cada elemento significativo, la siguiente pregunta (quinta) en el proceso del RCM es preguntar cómo y cuánto importa cada falla, la razón de esto es porque las consecuencias de cada falla dicen si se necesita tratar de prevenirlos, si la respuesta es positiva, también sugiere con qué esfuerzo debemos tratar de encontrar las fallas.

---

<sup>10</sup> ARDILA, PÉREZ. Gabriel y MANTILLA, GONZÁLEZ. José Julián. Proyecto de grado Diseño de la estrategia basada en RCM para bombas centrífugas y reciprocantes, compresores y bombas de combustión interna de la planta de inyección de agua Casabe planta de reinyección de agua residual Cantagallo y estación 2 de recolección y tratamiento de crudo Casabe de la superintendencia del rio de Ecopetrol. Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga. 2008 [http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/131/1/digital\\_15507.pdf](http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/131/1/digital_15507.pdf)

Un punto fuerte del RCM es que reconoce que las consecuencias de las fallas son más importantes que sus características técnicas, de hecho reconoce que la única razón para hacer cualquier tipo de mantenimiento proactivo no es evitar las fallas por si mismo sino evitar o reducir las consecuencias de las fallas.

RCM clasifica las consecuencias de las fallas:

- Consecuencias de las fallas ocultas: fallas que no tienen un impacto directo pero exponen a la organización a otras fallas muy serias, a menudo catastróficas, como ejemplo, la falla en un sistema contra incendios.
- Consecuencias en la seguridad y el medio ambiente: son aquellas fallas que impactan directamente en las personas, pudiéndolas afectar físicamente y/o si infringen las normas gubernamentales relacionadas con el medio ambiente.
- Consecuencias operacionales: son aquellas fallas que cuando ocurren afectan la producción (capacidad, calidad del producto, servicio al cliente o costos industriales en adición al costo directo de la reparación).
- Consecuencias no operacionales: no afectan ni la seguridad, ni a la producción, únicamente tienen asociados costos de reparación de la falla por sí misma.

La mayoría de la gente cree que el mejor modo de mejorar al máximo la disponibilidad de planta es hacer algún tipo de mantenimiento de forma rutinaria. El conocimiento de la segunda generación sugiere que esta acción preventiva debe consistir en una reparación del equipo o cambio de componentes a intervalos fijos.

La sexta pregunta en el proceso de RCM se dirige al establecimiento de tareas de mantenimiento proactivo (predictivo y preventivo). Cuando una tarea es

técnicamente viable y justificada, puede asignarse alguna de las siguientes clases de tareas:

### **Tareas programadas en base a condición**

Las tareas programadas en base a condición, se basan en el hecho de que la mayoría de los modos de falla no ocurren instantáneamente, sino que se desarrollan progresivamente en un periodo de tiempo. “Si la evidencia de este tipo de modo de fallo puede ser detectada bajo condiciones normales de operación, es posible que se puedan tomar acciones programadas en base a la condición del activo, que ayuden a prevenir estos modos de fallo y eliminar sus consecuencias.

Las tareas a condición se llaman así porque los elementos que se inspeccionan se dejan en servicio a condición de que continúen cumpliendo con los parámetros de funcionamiento especificados, esto también se conoce como mantenimiento predictivo (porque estamos tratando de predecir si y posiblemente cuando el elemento va a fallar basándonos en su comportamiento. Las técnicas usadas en el mantenimiento por condición son:

- Monitoreo de Condición, Técnica diseñada para detectar los efectos de las fallas por ejemplo, cambios en las características de vibración, temperatura, partículas de aceite.
- Técnica de la variación de la calidad del producto: esta técnica es basada en el control estadístico de procesos en el cual se analiza alguna característica especial de un producto.
- Técnicas de monitoreo de los efectos primarios (indicadores y equipos de monitoreo de procesos): esta técnica consiste en medir variables directas del producto como lo son caudal, presión, temperatura, potencia, amperaje.

- Técnicas de inspección basada en los sentidos humanos: esta técnica consiste en definir pequeñas tareas para ejecución que entregan cierta información del estado de los equipos y se pueden realizar acciones para corregir desviaciones en la operación garantizando la confiabilidad de los equipos.

### **Tarea programada de restauración o reincorporación**

El mantenimiento preventivo se refiere a aquellas tareas de restauración o reincorporación hechas a intervalos fijos independientemente del estado del elemento o componente. Estas tareas solo son válidas si existe un patrón de desgaste, es decir, si la probabilidad de falla aumenta rápidamente después de superada la vida útil del elemento.”<sup>11</sup>

### **Combinación de tareas**

En algunos casos, cuando hay consecuencias para la seguridad o medio ambiente es necesario asegurar que el riesgo sea bajo, para lo cual se requiere la unión de tareas proactivas que conlleven a prevenir la consecuencia de un modo de falla analizada.

---

<sup>11</sup> PARRA, Marquez. Carlos Alberto y CRESPO, Marquez. Adolfo. Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos, Desarrollo y aplicación práctica de un modelo de gestión de mantenimiento. [http://books.google.com.co/books?id=8xsnQ1aMg2gC&pg=PA136&lpg=PA136&dq=Si+la+evidencia+de+este+tipo+de+modo+de+fallo+puede+ser+detectada+bajo+condiciones+normales+de+operaci%C3%B3n,+es+posible+que+se+puedan+tomar+acciones+programadas+en+base+a+la+condici%C3%B3n+del+activo,+que+ayuden+a+prevenir+estos+modos+de+fallo+y+eliminar+sus+consecuencias.+Las+tareas+a+condici%C3%B3n+se+llaman+as%C3%AD+porque+los+elementos+que+se+inspeccionan+se+dejan+en+servicio+a+condici%C3%B3n+de+que+contin%C3%BAen+cumpliendo+con+los+par%C3%A1metros+de+funcionamiento+especificados,+esto+tambi%C3%A9n+se+conoce+como+mantenimiento&source=bl&ots=IYQZoeY150&sig=gpY\\_hMZajutoAgPZVOROwwCGorc&hl=es&sa=X&ei=Uf43VJz3LM2MNtSkQOAP&ved=0CBsQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.co/books?id=8xsnQ1aMg2gC&pg=PA136&lpg=PA136&dq=Si+la+evidencia+de+este+tipo+de+modo+de+fallo+puede+ser+detectada+bajo+condiciones+normales+de+operaci%C3%B3n,+es+posible+que+se+puedan+tomar+acciones+programadas+en+base+a+la+condici%C3%B3n+del+activo,+que+ayuden+a+prevenir+estos+modos+de+fallo+y+eliminar+sus+consecuencias.+Las+tareas+a+condici%C3%B3n+se+llaman+as%C3%AD+porque+los+elementos+que+se+inspeccionan+se+dejan+en+servicio+a+condici%C3%B3n+de+que+contin%C3%BAen+cumpliendo+con+los+par%C3%A1metros+de+funcionamiento+especificados,+esto+tambi%C3%A9n+se+conoce+como+mantenimiento&source=bl&ots=IYQZoeY150&sig=gpY_hMZajutoAgPZVOROwwCGorc&hl=es&sa=X&ei=Uf43VJz3LM2MNtSkQOAP&ved=0CBsQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false)

La séptima pregunta ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada? Cuando se ha identificado que no es posible establecer una tarea proactiva que permita atacar determinado modo de falla, RCM, propone tres categorías a acciones “A falta de”, y estas son: búsqueda de fallas, rediseño y ningún mantenimiento programado.

### **Tarea de búsqueda de fallas**

El mantenimiento detección o de búsqueda de fallas consiste en la prueba de dispositivos de protección bajo condiciones controladas, para asegurarse que estos dispositivos serán capaces de brindar la protección requerida cuando sean necesarios. En el mantenimiento detección no se está reparando un elemento que fallo (mantenimiento correctivo), no se está cambiando ni reacondicionando un elemento antes de su vida útil (mantenimiento preventivo), ni se están buscando síntomas de que una falla está en el proceso de ocurrir (mantenimiento predictivo).

Por lo tanto, el mantenimiento detección es un cuarto tipo de mantenimiento. A este mantenimiento también se lo llama búsqueda de fallas o prueba funcional, y al intervalo cada el cual se realiza esta tarea se lo llama intervalo de búsqueda de fallas.

### **Rediseño**

En el caso de no conseguir ningún tipo de actividad preventiva que ayude a reducir la posibilidad de ocurrencia de los modos de fallos que afecten a la seguridad o al ambiente a un nivel aceptable, es necesario realizar un rediseño o una modificación que permita minimizar o eliminar las consecuencias de esos modos de fallo.

## **Actividades de mantenimiento no programado**

En el caso de no conseguir actividades de prevención económicamente más baratas que los posibles efectos derivados de los modos de falla con consecuencias operacionales o no operacionales, se podrá tomar la decisión de esperar que ocurra el fallo y actuar de forma reactiva.

### 3. PREPARACIÓN DE LA INFORMACION

#### 3.1. ANÁLISIS DE COSTOS DE MANTENIMIENTO EN EL CAMPO LA CIRA INFANTAS

##### 3.1.1. Costos generales de mantenimiento.

Para el estudio se realizó un análisis de la información suministrada en el sistema de Información de Ecopetrol Ellipse<sup>12</sup>, donde se realizaron un listado de todas las actividades de mantenimiento los equipos de las Plantas de Inyección del Campo La Cira Infantas ECOPETROL S.A.

El análisis preliminar tiene como objetivo identificar los equipos que representan mayores costos de Mantenimiento para la Organización, información en la cual se incluyen costos de Mano de Obra, costos de Materiales y Costos de Contratos; quedan excluidos del análisis los Costos asociados a reparaciones pagadas por OXY, ya que una de las falencias del sistema de Información es que no permite la unión de los Costos de Ecopetrol y OXY.

En este barrido del sistema de información se analizan los costos y las Horas Hombre (HH) enfocados en: Tipo de Mantenimiento, Especialidades, Subespecialidades, Tipo de Prioridad y Fechas de Mantenimiento; posteriormente se procede a determinar por medio de un árbol lógico los equipos con mayor costo de mantenimiento.

---

<sup>12</sup> Ellipse ECP PRD 6.3.3. PROGRAMA DE INVENTARIO. sistema de información de Ecopetrol

**Tabla 5. Especialidades área mantenimiento**

ESPECIALIDADES	ESP. ELECTRICIDAD
	ESP. ELECTRÓNICA
	ESP. INST Y CONTROLES
	ESP. LÍNEAS Y TANQUES
	ESP. METALISTERÍA
	ESP. OBRAS CIVILES
	ESP. MECÁNICA

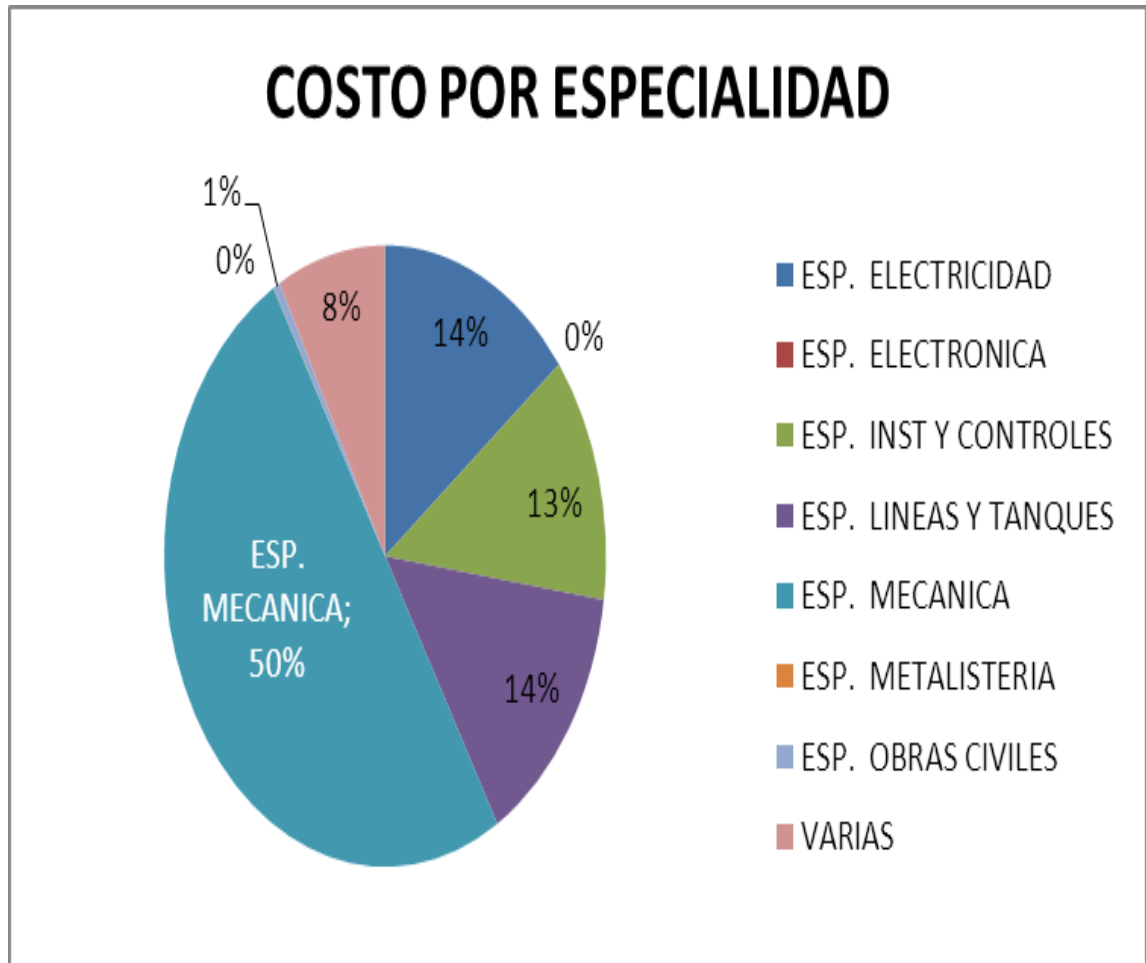
**Fuente Ellipse** ECP PRD 6.3.3

**Tabla 6. Gráfico de Costo por Especialidad**

ESPECIALIDAD	COSTO
ESP. ELECTRICIDAD	\$ 477.204.739
ESP. ELECTRÓNICA	\$ 420.500
ESP. INST Y CONTROLES	\$ 424.530.004
ESP. LINEAS Y TANQUES	\$ 471.964.861
ESP. MECÁNICA	\$ 1.656.627.722
ESP. METALISTERIA	\$ 556.202
ESP. OBRAS CIVILES	\$ 16.614.296
VARIAS	\$ 262.399.118
<b>T O T A L</b>	<b>\$ 3.310.317.442</b>

**Fuente Ellipse** ECP PRD 6.3.3

**Figura. 20 costos por especialidad**



**Fuente Ellipse** ECP PRD 6.3.3

Analizando por Especialidades, en la Figura 20 se observa como el área Mecánica abarca el 50,05% de los costos totales equivalentes a \$ 1.656.627.722 del total de costos de mantenimiento en las Plantas de Inyección del Campo La Cira

3.1.2. Costos de mantenimiento de la especialidad Mecánica

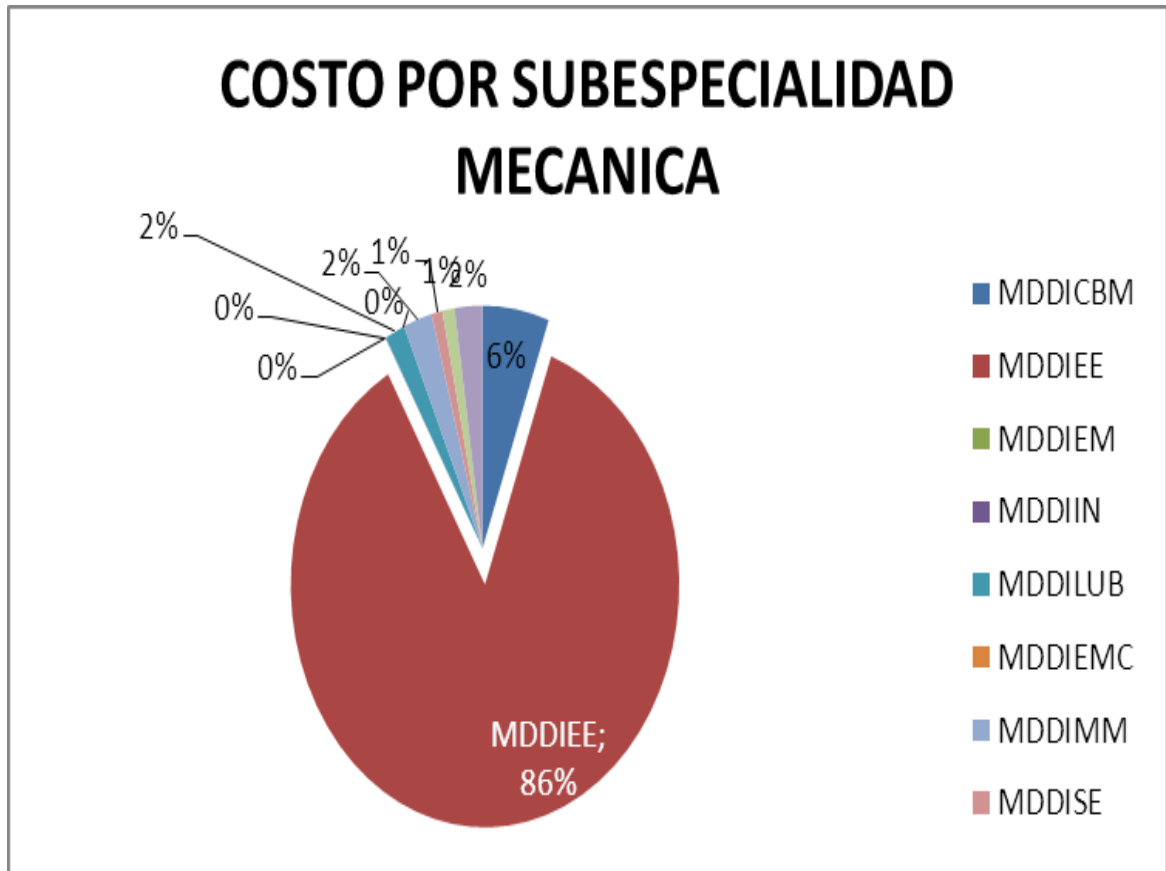
**Tabla 7. Subespecialidad mecánica**

<b>SUBESPECIALIDAD MECÁNICA</b>	MDDICBM	FRENTE DE CBM
	MDDIEM	FRENTE DE EQUIPO MÓVIL
	MDDILUB	FRENTE DE LUBRICACIÓN
	MDDISE	FRENTE DE SOLDADURA
	MDDISR	FRENTE DE FACILIDADES DE MANTENIMIENTO
	MDDISRP	FRENTE DE FACILIDADES DE OPERACIÓN
	MDDIEE	FRENTE DE EQUIPO ESTACIONARIO
	<b>Fuente Ellipse</b> ECP PRD 6.3.3	

Tabla 8. Costos subespecialidad mecánica

	\$ LABOR	\$ MATERIALES	\$ CONTRATOS	\$ TOTAL
MDDICBM	\$ 89.836.416	\$ 1.947.580	\$ 0	\$ 91.783.996
MDDIEE	\$ 509.023.912	\$ 916.944.887	\$ 987.229	\$ 1.426.956.028
MDDIEM	\$ 145.254	\$ 0	\$ 0	\$ 145.254
MDDIIN	\$ 449.611	\$ 0	\$ 0	\$ 449.611
MDDILUB	\$ 26.678.915	\$ 990.412	\$ 0	\$ 27.669.327
MDDIEMC	\$ 29.000	\$ 0	\$ 0	\$ 29.000
MDDIMM	\$ 0	\$ 0	\$ 39.546.775	\$ 39.546.775
MDDISE	\$ 15.198.100	\$ 110.126	\$ 0	\$ 15.308.226
MDDISR	\$ 16.739.505	\$ 0	\$ 0	\$ 16.739.505
MDDISRP	\$ 0	\$ 38.000.000	\$ 0	\$ 38.000.000
<b>T O T A L</b>	<b>\$ 658.100.712</b>	<b>\$ 957.993.005</b>	<b>\$ 40.534.004</b>	<b>\$ 1.656.627.722</b>
<b>Fuente Ellipse</b> ECP PRD 6.3.3				

**Figura 21 costos sub especialidad mecánica**



**Fuente Ellipse** ECP PRD 6.3.3

Desglosando la especialidad Mecánica y analizando por subespecialidad Mecánica observamos como el frente de Trabajo MDDIEE (Equipo Estacionario) gasta el 86% del Mantenimiento Mecánico en todas las Plantas de Inyección, el cual es equivalente a \$ 1.426.956.028.

### 3.1.3. Costo de mantenimiento de la Subespecialidad de Equipo Estacionario

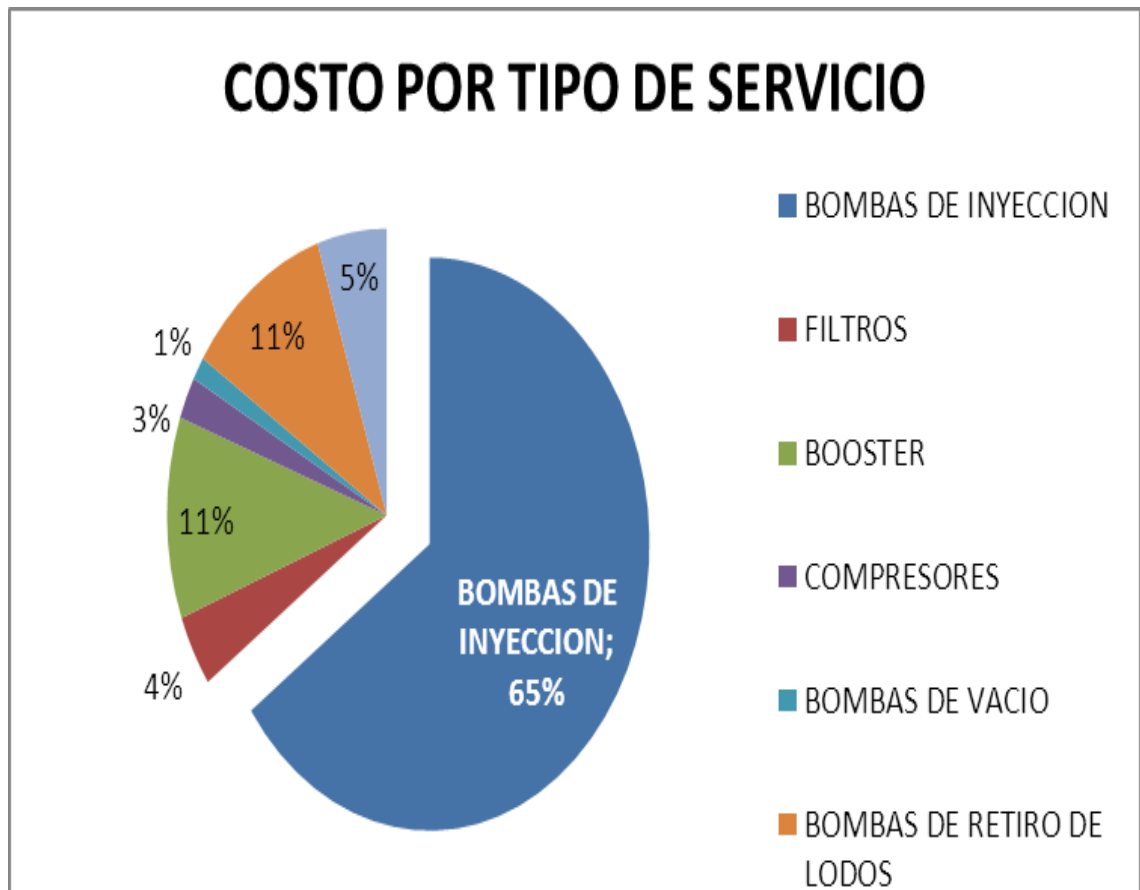
Del frente MDDIEE que comprende todos los equipos Estacionarios de las Plantas de Inyección de la Cira Infantas se encuentran las Bombas Centrifugas multi etapas de Inyección, Bombas Centrifugas Booster, Compresores de aire a Instrumentos, Bombas de Vacío, Bombas Verticales de Cavidades Progresivas para retiro de lodos y Bombas Centrifugas de servicios generales, Si analizamos los costos del Frente Estacionario especificados.

**Tabla 9. Tipos de servicio y costos**

TIPOS DE SERVICIO	
	BOMBAS DE INYECCION
	FILTROS
	BOMBAS BOOSTER
	COMPRESORES
	BOMBAS DE VACIO
	BOMBAS DE RETIRO DE LODOS
	BOMBAS DE SERVICIOS

	LABOR	MATERIALES	CONTRATOS	TOTAL
BOMBAS DE INYECCIÓN	\$ 269.885.138	\$ 658.370.274	\$ 987.229	\$ 929.242.641
FILTROS	\$ 25.250.816	\$ 32.513.969	\$ 0	\$ 57.764.785
BOOSTER	\$ 110.193.906	\$ 52.044.721	\$ 0	\$ 162.238.627
COMPRESORES	\$ 17.940.337	\$ 15.884.516	\$ 0	\$ 33.824.853
BOMBAS DE VACIO	\$ 10.156.449	\$ 8.582.858	\$ 0	\$ 18.739.307
BOMBAS DE RETIRO DE LODOS	\$ 21.140.607	\$ 131.252.375	\$ 0	\$ 152.392.982
BOMBAS DE SERVICIOS	\$ 32.199.845	\$ 12.766.980	\$ 0	\$ 72.752.833
<b>Fuente Ellipse ECP PRD 6.3.3</b>				

**Figura 22. Costo por tipo de servicio**



**Fuente Ellipse** ECP PRD 6.3.3

Se evidencia un notable gasto de Mantenimiento de las Bombas de Inyección, es decir, que de los mil cuatrocientos veintiséis millones de pesos (\$ 1.426.956.028) que se gastaron en el Área Mecánica en el periodo referenciado, las Bombas de Inyección debitaron el 65% correspondiente a novecientos veintinueve millones de pesos (\$ 929.242.641) aproximadamente.

### 3.1.4. Costos de mantenimiento por tipo de servicio

Analizando por Tipo de Mantenimiento se evidencia un alto costo en los mantenimientos correctivos, según los lineamientos de Ecopetrol el porcentaje de Preventivo – Correctivo debe ser de 80% - 20%. Durante el periodo referenciado el costo del Mantenimiento Correctivo fue aproximadamente \$ 1000.000.000 que representa un 31% del Costo Total tal como se muestra en la figura 23. Pág 74.

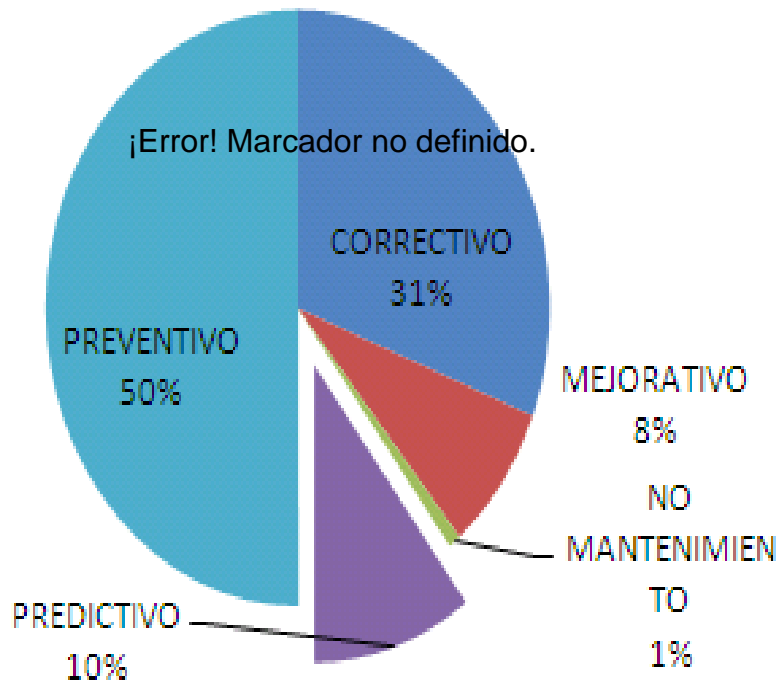
**Tabla 10. Costos de mantenimiento por tipo de servicio**

¡Error! Marcador no definido.

<b>TIPO DE MANTENIMIENTO</b>	<b>COSTO</b>
CORRECTIVO	\$ 1.022.745.871
MEJORATIVO	\$ 265.899.711
NO MANTENIMIENTO	\$ 25.796.415
PREDICTIVO	\$ 339.738.539
PREVENTIVO	\$ 1.656.136.906
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 3.310.317.442</b>
<b>Fuente Ellipse ECP PRD 6.3.3</b>	

**Figura 23. Costo por tipo de mantenimiento**

## Costos por Tipo de Mantenimiento



**Fuente Ellipse** ECP PRD 6.3.3

En total, se analizan 7007 ítems correspondientes a cada uno de las OT's reportadas, costeadas y cerradas de las Plantas de Inyección del campo La Cira Infantas durante el periodo de enero del 2008 hasta julio del 2013.

El costo total reportado en el sistema de información desde enero del 2008 hasta el Julio del 2013 es de \$ 3.310.317.442 en las Plantas de Inyección.

### **3.1.5. Costos de mantenimiento en Bombas de Inyección**

De todo lo plasmado anteriormente Se puede concluir que las Bombas de Inyección generaron el mayor gasto de mantenimiento en el área Mecánica, y que su vez el área mecánica generó el mayor gasto de Mantenimiento en las Plantas de inyección de La Cira Infantas.

Para concluir con el análisis de la información suministrada se debe determinar cuál componente de las Bombas de Inyección es el más crítico, el cual no se puede evidenciar como se explicó anteriormente debido a que el sistema de información no especifica el gasto económico por componente; para esta deducción se filtró la información suministrada por los Mantenimientos correctivos que se realizaron en el periodo referenciado y solo a partir de OT's manuales, es decir que se descartaron las rutinas de mantenimiento porque el costo de las rutinas de mantenimiento se carga al equipo completo y no al componente.

Tal como se explicó anteriormente, las Bombas de Inyección se pueden descomponen en: Motor (ya sea eléctrico o a gas), Cámara de Empuje, Instrumentación asociada, válvulas y Bombas Centrifugas Multi etapas;

**Tabla 11. Archivo de Costos de Mantenimiento correctivo en Bombas de Inyección**

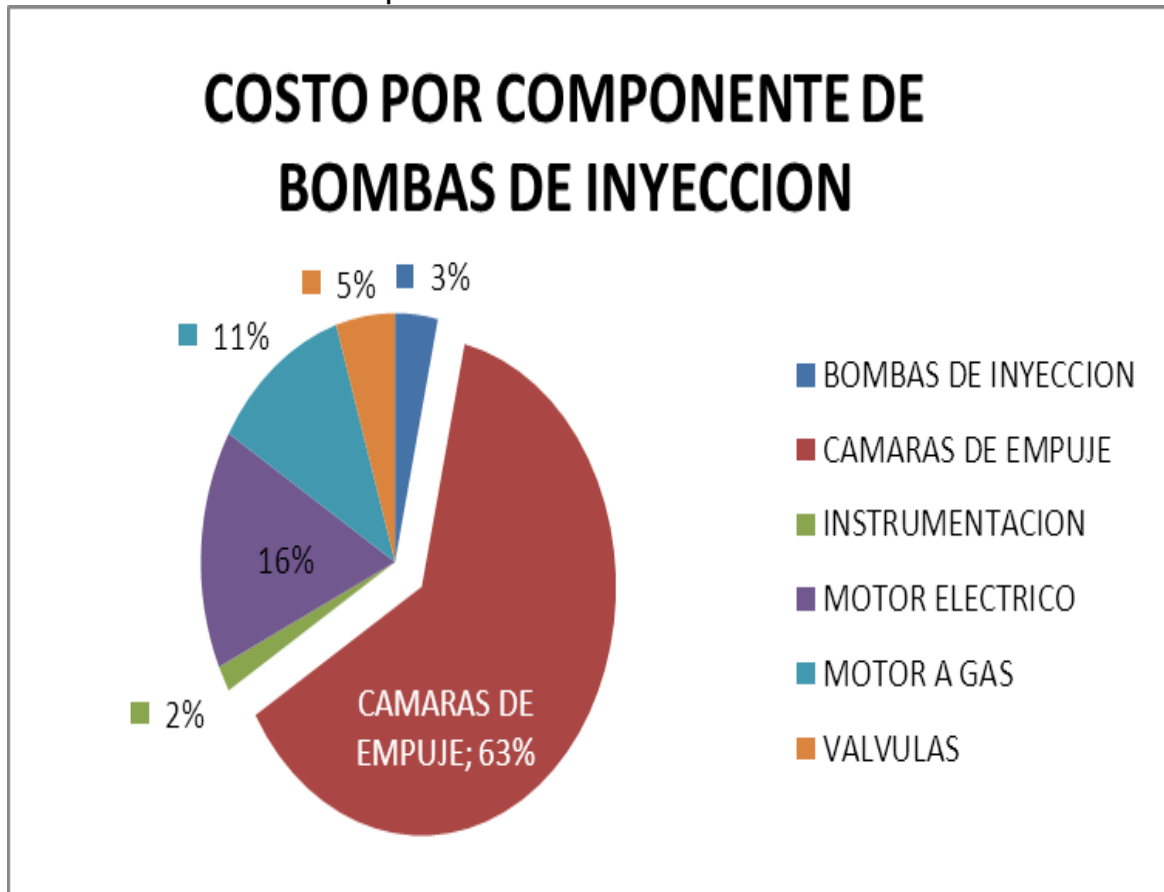
¡Error! Marcador no definido.

DISTRITO	PERIODO	CARGO CONTABLE	EQUIPO	DESCRIPCION	COMPONENTE (OT)	OT
LCI	200905	MPR2761	EPI5AP5351	P5351 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	MOTORES A GAS	LC009609
LCI	200905	MPR2761	EPI5AP5352	P5352 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	MOTORES A GAS	LC009610
LCI	200906	MPR2761	EPI5AP5352	P5352 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	MOTORES A GAS	LC010900
LCI	200906	MPR2761	EPI5AP5352	P5352 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	MOTORES A GAS	LC011177
LCI	200907	MPR2761	EPI5AP5011	P5011 MOTOBOMBA INYECCION AGUA CLT 1; SCI SUPERINT	INSTRUMENTACION	LC011928
LCI	200907	MPR2761	EPI5AP5009	P5009 MOTOBOMBA INYECCION AGUA REDA 1; SCI SUPERIN	INSTRUMENTACION	LC011929
LCI	200907	MPR2761	EPI5AP5351	P5351 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	MOTORES A GAS	LC011536
LCI	200908	MPR2761	EPI5AP5351	P5351 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	CAMARA DE EMPUJE	LC012568
LCI	200908	MPR2761	EPI5AP5352	P5352 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	CAMARA DE EMPUJE	LC012571
LCI	200908	MPR2761	EPI5AP5009	P5009 MOTOBOMBA INYECCION AGUA REDA 1; SCI SUPERIN	INSTRUMENTACION	LC011929
LCI	200908	MPR2761	EPI5AP5011	P5011 MOTOBOMBA INYECCION AGUA CLT 1; SCI SUPERINT	INSTRUMENTACION	LC012940
LCI	200908	MPR2761	EPI5AP5352	P5352 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	MOTORES A GAS	LC012457
LCI	200909	MPR2761	EPI5AP5351	P5351 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	MOTORES A GAS	LC012956
LCI	200909	MPR2761	EPI5AP5351	P5351 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	MOTORES A GAS	LC013410
LCI	200909	MPR2761	EPI5AP5352	P5352 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	MOTORES A GAS	LC013411
LCI	200910	MPR2761	EPI5AP5351	P5351 MOTOBOMBA INY AGUA WAUKESHA-REDA; SCI SUP	BOMBA DE INYECCION	LC014504

**Fuente Ellipse ECP PRD 6.3.3**

**Figura 24. Costo por componente de las Bombas de Inyección**

¡Error! Marcador no definido.



**Fuente ellipse** ECP PRD 6.3.3

Como resumen de este capítulo podemos concretar que basados en un árbol lógico de costos, las Cámaras de empuje son el componente más crítico de la Planta 5A, ya que consumen aproximadamente el 17,6% del total de todos los costos de mantenimiento asociados a esta Planta de Inyección y por consiguiente se requiere realizar un plan de mejoramiento para la disminución de los costos asociados al mantenimiento de este componente, el cual se realizará a partir de los conceptos de RCM y las herramientas de Confiabilidad que son el objeto de esta monografía.

### **3.2 ANÁLISIS DE LAS RUTINAS PREVENTIVAS PARA LAS CÁMARAS DE EMPUJE EN EL CAMPO LA CIRA**

A continuación se enumeran las rutinas de mantenimiento que actualmente se implementan en el campo la Cira infantas para el mantenimiento de las bombas de inyección las cuales se programan en el sistema de información Ellipse.

#### **3.2.1. Rutinas de 90 días bomba inyección**

- **Revisar acople anclaje y verificar alineación**

Las principales actividades a realizar en esta rutina son:

1. inspeccionar fugas.
2. revisar estado y ajuste de los tornillos de anclaje de motor y bomba.
3. limpiar acople, revisar condiciones de la manzana de acople a ejes motor bomba.
4. verificar alineación motor bomba, juego axial y radial del motor-bomba.
5. lubricación de la bomba cámara de empuje
6. cambiar aceite en rodamientos del motor

- **cambio de aceite y filtro cámara - motor.**

Las principales actividades a realizar en esta rutina son: cambio de aceite y filtro sistema refrigeración

### **3.2.2. Análisis de rutina**

De acuerdo a las rutinas establecidas se deduce que, si bien se tienen en cuenta las actividades preventivas para evitar daños en la lubricación de la cámara y el des alineamiento, no son efectivos a la hora de prevenir las fallas evidenciadas en los RCA's, los cuales presentan cantidad de fallas que no se corrigen con las rutinas Trimestrales que se establecieron, las cuales son:

1. Problemas de humedad interna en la cámara de empuje
2. Sedimentación y contaminación del aceite
3. Alta temperatura en cámara
4. degradación del aceite CL4 en el interior del Cooler y la cámara de Empuje.
5. no se tienen en cuenta para el mantenimiento los componentes internos del sistema de refrigeración.

Adicionalmente los costos por los cambios de aceite son altos debido a su frecuencia trimestral

### **3.3 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE LA FALLAS ENCONTRADAS EN CÁMARAS DE EMPUJE.**

A continuación se recopilan los RCA significativos realizados por el grupo de confiabilidad Ecopetrol.

### 3.3.1 Informe reporte de la falla ruptura eje alta bomba P5012

#### INFORMACIÓN GENERAL:

Tabla 12. Falla ruptura eje alta bomba P5012

Reporte:	Preliminar <input type="checkbox"/>	Final <input checked="" type="checkbox"/>	
Tipo de Reporte de Falla:	Reactivo <input checked="" type="checkbox"/>	Proactivo <input type="checkbox"/>	
Nombre del Evento:	Ruptura del eje de la bomba de alta de la P5012		OT CMMS: N/A
Preparado por:	Bibiana Ramírez, Roger Martinez, Edwin Sanchez, Octavio Villamizar, Fabian Martinez, Juan C. Villadiego, Rodrigo Manzano		Disciplina: Mecánico
Equipo (TAG):	EPI5AP5012	Componente o ítem que falló:	Bomba de alta presión
Fecha del Evento:	2-feb-12	Hora Parada:	23:00
Fecha de Arranque:	29-feb-12	Hora Arranque:	9:00 a.m.
Pérdidas de producción (bo):	N/A	Pérdidas ( \$ ):	91,000,000
Pérdidas de inyección (bw):	20,500	Seguridad:	No aplica
			Horómetro equipo: 22,785
			Horómetro componente: 22,785
			Ambiente (BIs): N/A
			Clasificación Matriz: B1

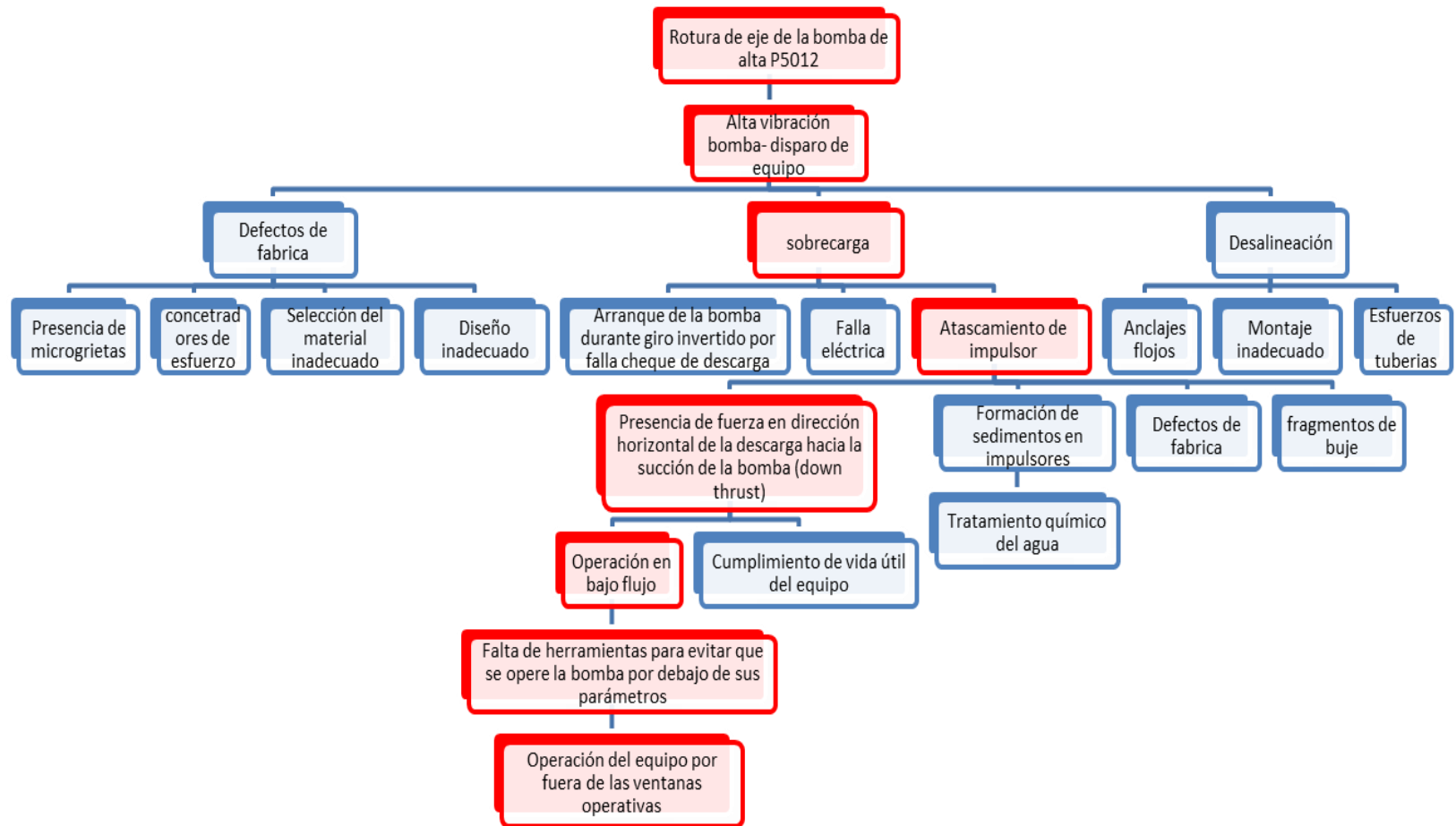
## RECOMENDACIONES

Tabla 13. Recomendaciones

	CAUSA RAIZ	RECOMENDACIONES	PRIORIDAD	RESPONSABLE	FECHA DE CUMPLIMIENTO	OT
1	Operación del equipo por fuera de las ventanas operativas	Divulgar los límites de bajo flujo y alto flujo cuando se realiza ajustes en la válvula de control de caudal de inyección	1. Alta	Ingenieria.	30-may-12	N/A
2	Operación del equipo por fuera de las ventanas operativas	Implementar alarma de bajo flujo y alto flujo de la bomba en panel de control.	2. Media	Por Definir	Por Definir	

## ANALISIS DE CAUSA RAIZ DE LA FALLA

Figura 25. ANALISIS DE CAUSA RAIZ DE LA FALLA



Fuente RCA Ecopetrol

### 3.3.2 Informe reporte de falla limpieza interna cámara empuje

#### INFORMACIÓN GENERAL

**Tabla 14. De falla limpieza interna cámara empuje**

Reporte:	Preliminar <input checked="" type="checkbox"/>	Final <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tipo de Reporte de Falla:	Reactivo <input checked="" type="checkbox"/>	Proactivo <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nombre del Evento:	LIMPIEZA INTERNA CÁMARA DE EMPUJE		OT CMMS: LC078643
Preparado por:	DIANA MARCELA AFANADOR		Disciplina: MECANICA
Equipo (TAG):	EPIA6P6257	Componente o ítem que falló: CAMARA DE EMPUJE	
Fecha del Evento:	21-ene-14	Hora Parada: 07:00	Horómetro equipo: <input type="checkbox"/>
Fecha de Arranque:	<input type="checkbox"/>	Hora Arranque: <input type="checkbox"/>	Horómetro componente: <input type="checkbox"/>
Pérdidas de producción (bo):	N/A	Pérdidas ( \$ ): pte por definir	Ambiente (Bls): <input type="checkbox"/>
Pérdidas de inyección (bw):	315546	Seguridad: <input type="checkbox"/>	Clasificación Matriz: D3

Fuente RCA Ecopetrol

## RECOMENDACIONES

Tabla 15. Recomendaciones

AÑO	FECHA MONITOREO (MES semana)		ESTADO	RECOMENDACIONES
2013	2013 Octubre S 40	4	Los niveles de desgaste de Fe, Cu, Sn en esta primera muestra evidencian estar un poco altos. Los demás parámetros viscosidad, oxidación, presencia de agua y elementos contaminantes están dentro de condiciones normales.	Por ser la primera muestra que se obtiene de este equipo es recomendable realizar seguimiento y tomar una nueva muestra para definir la condición
2013	2013 Octubre S44	3	La viscosidad se mantiene estable frente al anterior muestreo y se mantiene dentro de límites normales de operación. Niveles de contaminantes, oxidación, presencia de humedad y partículas de desgaste se encuentran dentro de niveles adecuados.	Continuar con el seguimiento a la condición de lubricación. No se requiere ninguna acción de mantenimiento.
2013	2013 Noviembre S 45	3	Los niveles de desgaste de Fe, Cu, Sn, Al, Zn se mantiene estable frente al anterior muestreo y se mantiene dentro de límites normales de operación. La presencia de humedad en el aceite aumento levemente.	Continuar con el seguimiento a la condición de lubricación. No se requiere ninguna acción de mantenimiento.
2013	2013 Noviembre S 47	6	Se evidencia incremento acelerado en las partículas de desgaste metálico (Cu y Fe) lo cual se asocia con desgaste en rodamientos y demás partes internas lubricadas; además se encontró incremento en el contenido de agua en el aceite que aunque aún se encuentra dentro de los límites permisibles, se debe tener en cuenta debido a su elevado incremento en un periodo corto de tiempo.	Realizar inspección de las partes internas de la cámara de empuje, realizar cambio de lubricante.
2014	2014 Enero S 04	6	La muestra del lubricante a simple vista evidencio degradación. De acuerdo al análisis del laboratorio las partículas metálicas se encuentran en niveles bastante elevados (Fe: 1736 ppm, Cu: 281 ppm, Cr: 2,7 ppm), relacionadas con desgaste en rodamientos. Se detectó presencia de oxidación en la muestra, así como presencia de humedad. La viscosidad se encuentra dentro de niveles normales.	Bajo la evidencia de la degradación del aceite. Se informó la condición y se recomendó intervenir el equipo de forma inmediata para verificar el estado de la cámara de empuje, mediante la revisión de elementos lubricados (rodamientos, eje, kingsbury) así como verificar juego axial. La intervención se llevó a cabo el 23 de enero y se encontraron los siguientes hallazgos: <b>Se observa trazas de crudo adheridas a los componentes de la parte giratoria, se calibra juego axial del kingsbury y tiene 0.018". Los rodamientos están marcados en pista interior posiblemente rose metal-metal. Se toma un out al eje dando máxima 1/2 milésima 0.0005". El kingsbury está en buenas condiciones, se realiza limpieza a sus partes.</b>

Fuente RCA Ecopetrol

### 3.3.3 Informe reporte de falla revisión cámara empuje

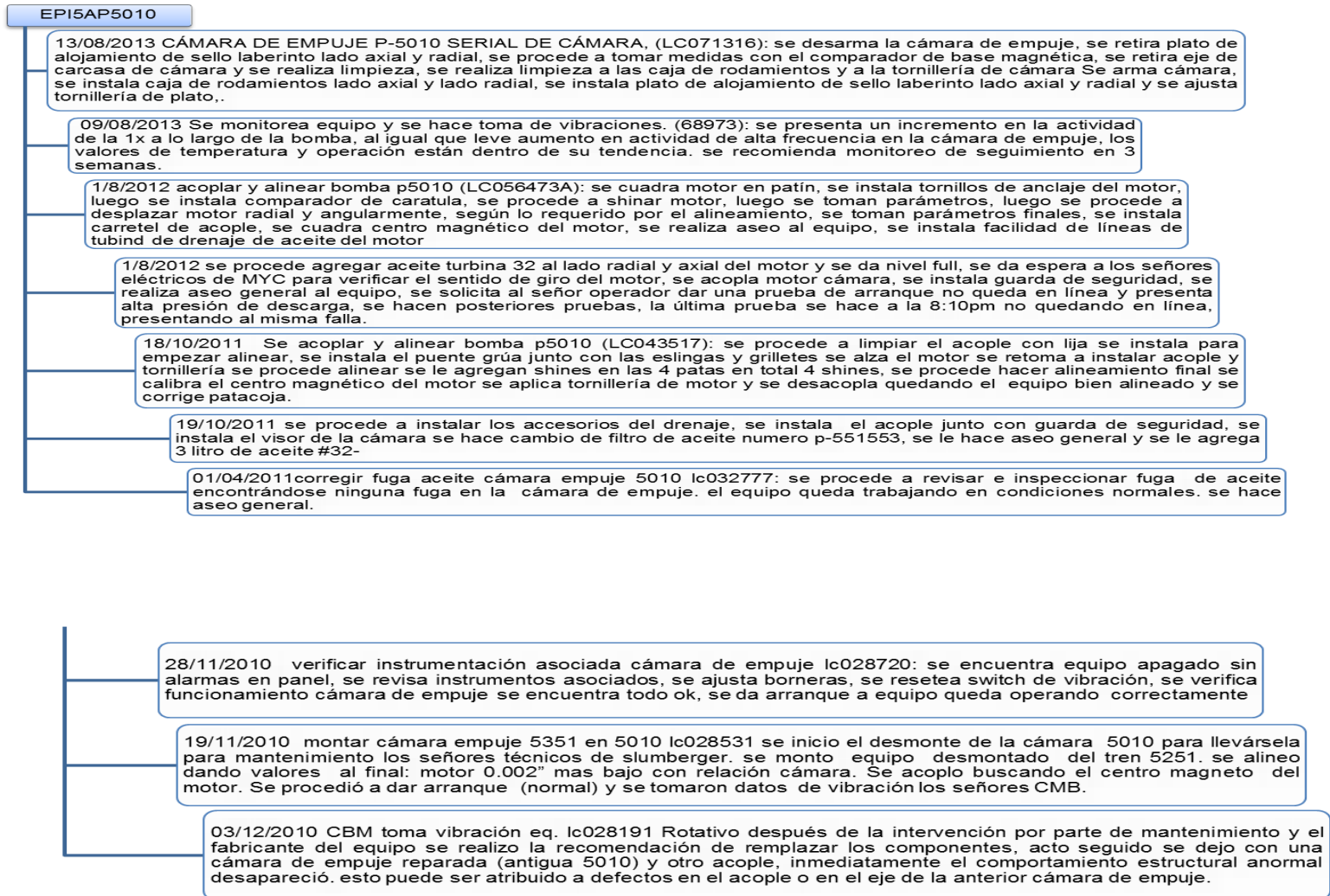
#### INFORMACIÓN GENERAL:

Tabla 16. Falla revisión cámara empuje

Reporte:	Preliminar <input type="checkbox"/>	Final <input checked="" type="checkbox"/>	
Tipo de Reporte de Falla:	Reactivo <input checked="" type="checkbox"/>	Proactivo <input type="checkbox"/>	
Nombre del Evento:	REVISION DE CAMARA DE EMPUJE		OT CMMS: LC071316
Preparado por:	DIANA MARCELA AFANADOR		Disciplina: MECANICA
Equipo (TAG):	EPI5AP5010	Componente o ítem que falló:	CAMARA DE EMPUJE
Fecha del Evento:	11-ago-13	Hora Parada:	Horómetro equipo:
Fecha de Arranque:		Hora Arranque:	Horómetro componente:
Pérdidas de producción (ho):	pte por definir	Pérdidas ( \$ ):	Ambiente (BIs):
Pérdidas de inyección (bw):	30000	Seguridad:	Clasificación Matriz: E3

Fuente RCA Ecopetro

**Figura 26. Falla revisión cámara empuje**



Fuente RCA Ecopetrol

- Instalación cámara de empuje nueva

Se realiza cambio de eje de cámara de empuje p5010 numero de serial 5db+h58120 a la cámara nueva con no. de serial xdb6k32456 porque la cámara nueva se le hizo metrología a eje para verificar como juego radial, juego Axial y rango lado motor cámara lado, cámara bomba porque no cambia con los parámetros. Se procede a instalar cajas de rodamientos lado axial y lado radial, se instala plato del alojamiento de sellos laberintos lado axial y radial, se instala espaciador, se instala caja de sello, se instala sello mecánico nuevo de John a Crane y se le da ajuste, se procede a instalar accesorios a cámara de empuje.

Se instala y se acopla cámara bomba en PIA 5A, se rectifica rosca de base de cámara porque se encontró con corrosión y pintura con machuelos de ½ NC. Se instala mangueras de lubricación de alta y baja de cámara a Enfriador, se acopla cámara motor se instala alineador laser para proceder a alinear el equipo, se agrega aceite a cámara quedando con su nivel, se ajusta prisioneros de manzanas motor cámara, se instala guarda de seguridad, se entrega el equipo a operaciones.

### 3.3.4 Informe reporte de falla cámara de empuje P3255

#### INFORMACIÓN GENERAL:

Tabla 17. Cámara de empuje P3255

Reporte:	Preliminar <input type="checkbox"/>	Final <input checked="" type="checkbox"/>
Tipo de Reporte de Falla:	Reactivo <input checked="" type="checkbox"/>	Proactivo <input type="checkbox"/>
Nombre del Evento:	REVISION DE CAMARA DE EMPUJE	
Preparado por:	Jorge Ardila - sonia Moreno	OT CMMS: LC071316
Equipo (TAG):	EPIA3P3255	Componente o ítem que falló: CAMARA DE EMPUJE
Fecha del Evento:	22-nov-13	Hora Parada: <input type="text"/>
Fecha de Arranque:	<input type="text"/>	Hora Arranque: <input type="text"/>
Pérdidas de producción (bo):	pte por definir	Pérdidas ( \$ ): pte por definir
Pérdidas de inyección (bw):	30000	Seguridad: <input type="checkbox"/>
		Horómetro equipo: <input type="text"/>
		Horómetro componente: <input type="text"/>
		Ambiente (BIs): <input type="text"/>
		Clasificación Matriz: E3
		Disciplina: MECANICA

Fuente RCA Ecopetrol

**Tabla 18. Cámara de empuje P3255**

AÑO	ESTACIÓN	DESCRIPCION DEL EQUIPO	TAG	OT'S MONITOREO	FECHA MONITOREO (MES semana)		ESTADO	RECOMENDACIONES
2013	PIA3	MOTOBOMBA DE INYECCION C/LIFT P3255	EPIA3P3255	LC070136	2013 Agosto S 32		El equipo presenta un comportamiento estable en bomba y motor, se aprecia aumento en actividad de rodamientos en motor bomba lubricación y cooler, se debe hacer seguimiento en 4 semanas	Monitoreo adicional en 3 semanas
2013	PIA3	MOTOBOMBA DE INYECCION C/LIFT P3255	EPIA3P3255	PD001245	2013 Septiembre S 37		El equipo presenta un comportamiento estable en bomba y motor se presentó disminución en actividad de rodamientos en motor bomba lubricación y cooler, se debe hacer seguimiento en próxima rutina cbm.	

Fuente RCA Ecopetrol

**Tabla 19. HALLAZGOS - TD HPUMP LA CIRA INFANTAS PIA-3 UNIDAD 3255**

**Temas Tratados: HALLAZGOS - TD HPUMP LA CIRA INFANTAS PIA-3 UNIDAD 3255**

El día 04 de Diciembre de 2013 se realizó el desensamble (TD) del equipo HPUMP de **LA CIRA INFANTAS PIA-3 UNIDAD 3255** de las empresas Occidental de Colombia y Ecopetrol SA, el cual presentaba 5163 Horas (215 días) de operación. La razón del pulling fue falla mecánica de cámara de empuje (eje roto).

**Cámara de empuje SN 10427192:** Eje no presentó giro, con juego radial excesivo en el lado del motor, infiriéndose que hubo eje roto posiblemente cerca a esta zona. Aunque no se pudo extraer, se pudo evidenciar daño del rodamiento del lado motor. Sello laberíntico de aceite con ruptura en pista. Señales de oxidación en tren de empuje. Carcaza con residuos de contaminación. Rodamiento y pista del lado bomba se halló en buen estado, demás componentes en condiciones normales. Zapata de empuje axial ascendente (Up-thrust ring) sin desgastes a considerar. Se pudo realizar desensamble únicamente hasta el rodete sólido (thrust-runner), ya que este se encontró adherido a la zapata de empuje axial descendente (Down-thrust bearing), por lo tanto no se pudo identificar el punto exacto de falla, ni visualizar las superficies de fractura del eje.

**Bomba Inferior SN: 10507854 - 14WJJ1000A:** Presentó giro normal, con desplazamiento axial del eje normal, con extensiones en rango (Up: 5-12/32" – Down: 5-24/32"). Se hallaron sólidos de propiedades magnéticas al exterior de los difusores. Housing, base, y cabezal en condiciones normales. Up-thrust plate con desgastes leves y el mismo desgaste en el pad de Up-thrust del difusor #14. Tapered-lock bushing, bujes de WC y bujes complemento en buen estado pero con presencia de emulsión. Difusores e impulsores en buenas condiciones. Eje sin desgastes a considerar, estrías sin deformaciones plásticas permanentes.

**Bomba Superior SN: 10507864 - 11WJJ1000A:** Presentó giro normal, con desplazamiento axial del eje normal, con extensiones en rango (Up: 5-12/32" – Down: 5-24/32"). Se hallaron sólidos de propiedades magnéticas al exterior de los difusores. Housing, base, y cabezal en condiciones normales. Up-thrust plate con desgastes moderados y el mismo desgaste en el pad de Up-thrust del difusor #25. Tapered-lock bushing, bujes de WC y bujes complemento en buen estado pero con presencia de emulsión. Difusores e impulsores en buenas condiciones. Eje sin desgastes a considerar, estrías sin deformaciones plásticas permanentes.

Fuente RCA Ecopetrol

### 3.3.5 Informe reporte de falla daño en sello mecánico P 3254

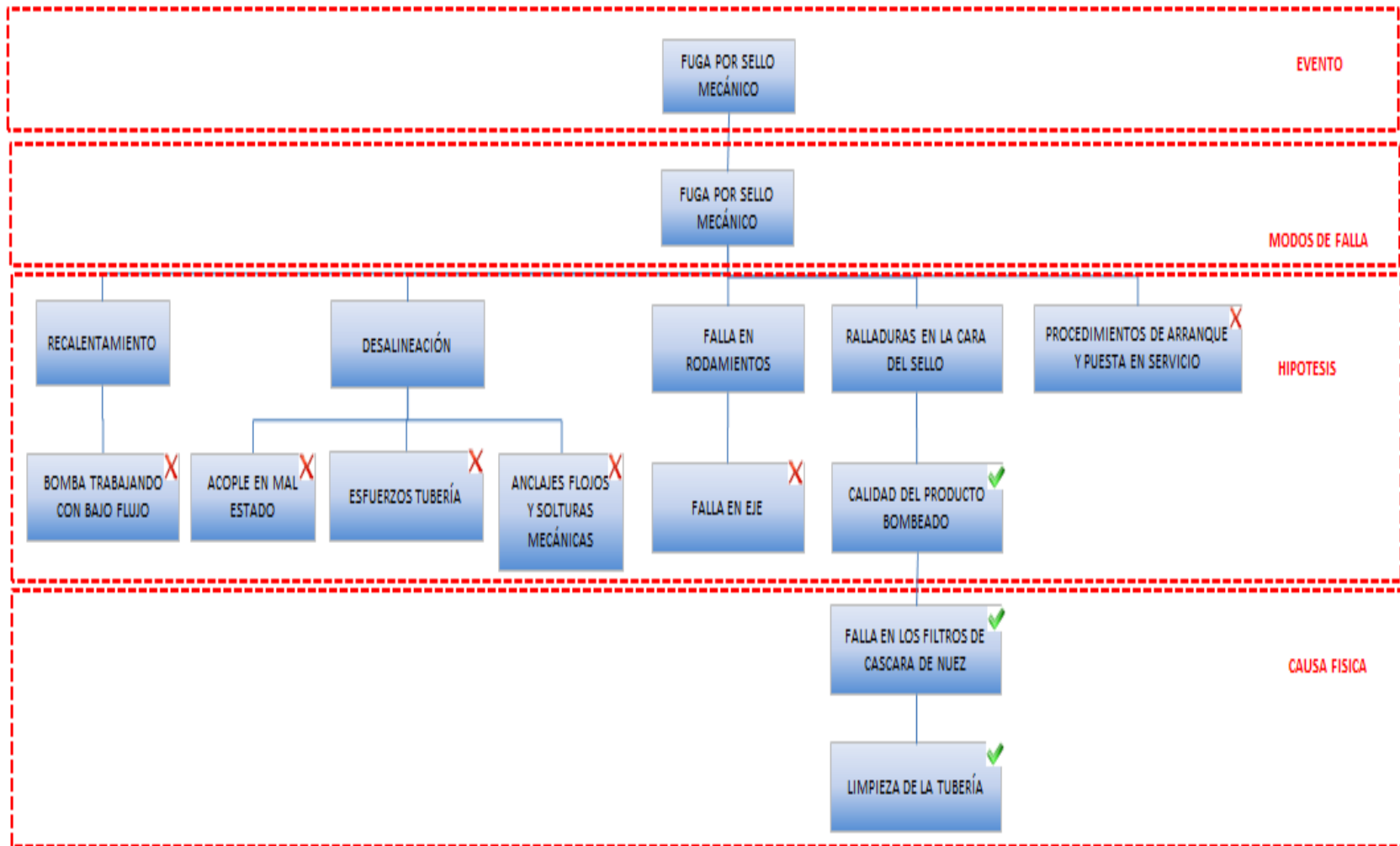
INFORMACIÓN GENERAL:

**Tabla 20. Falla daño en sello mecánico P 3254**

Reporte:	Preliminar <input type="checkbox"/>	Final <input checked="" type="checkbox"/>	
Tipo de Reporte de Falla:	Reactivo <input checked="" type="checkbox"/>	Proactivo <input type="checkbox"/>	
Nombre del Evento:	DANO EN SELLO MECANICO		OT CMMS: LC072694
Preparado por:	DIANA MARCELA AFANADOR		Disciplina: MECANICA
Equipo (TAG):	EPIA3P3254	Componente o ítem que falló: Sello camara de empuje	
Fecha del Evento:	19-sep-13	Hora Parada:	Horómetro equipo:
Fecha de Arranque:		Hora Arranque:	Horómetro componente:
Pérdidas de producción (bp):	pte por definir	Pérdidas ( \$ ):	Ambiente (BIs):
Pérdidas de inyección (bw):		Seguridad:	Clasificación Matriz:

Fuente RCA Ecopetrol

Figura 27. Falla daño en sello mecánico P 3254



Fuente RCA Ecopetrol

**. RECOMENDACIONES**

**Tabla 21. Recomendaciones**

	<b>CAUSA RAIZ</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>PRIORIDAD</b>	<b>RESPONSABLE</b>	<b>FECHA DE CUMPLIMIENTO</b>	<b>OT</b>
1	Falla en los filtros de cáscara de nuez	Limpieza de la tubería que conecta el filtro con la bomba	Alta	Mantenimiento	30/09/2013	N/A

Fuente RCA Ecopetrol

#### **4. MODELO DE IMPLEMENTACION PROPUESTO**

##### **DESARROLLO DE LA ESTRATEGIA METODOLOGIA DE RCM PARA LA CAMARA DE EMPUJE.**

La estrategia de RCM es un coagulo de métodos y procedimientos que nos sirven para optimizar las políticas de mantenimiento que se vienen aplicando y son soportadas por el Know how (saber hacer) de los programas de mantenimiento, en nuestro concepto, el RCM lo definimos como “el procedimiento” para implementar un nuevo plan de mantenimiento bajos unos métodos establecidos y está compuesto de los siguientes pasos<sup>13</sup>:

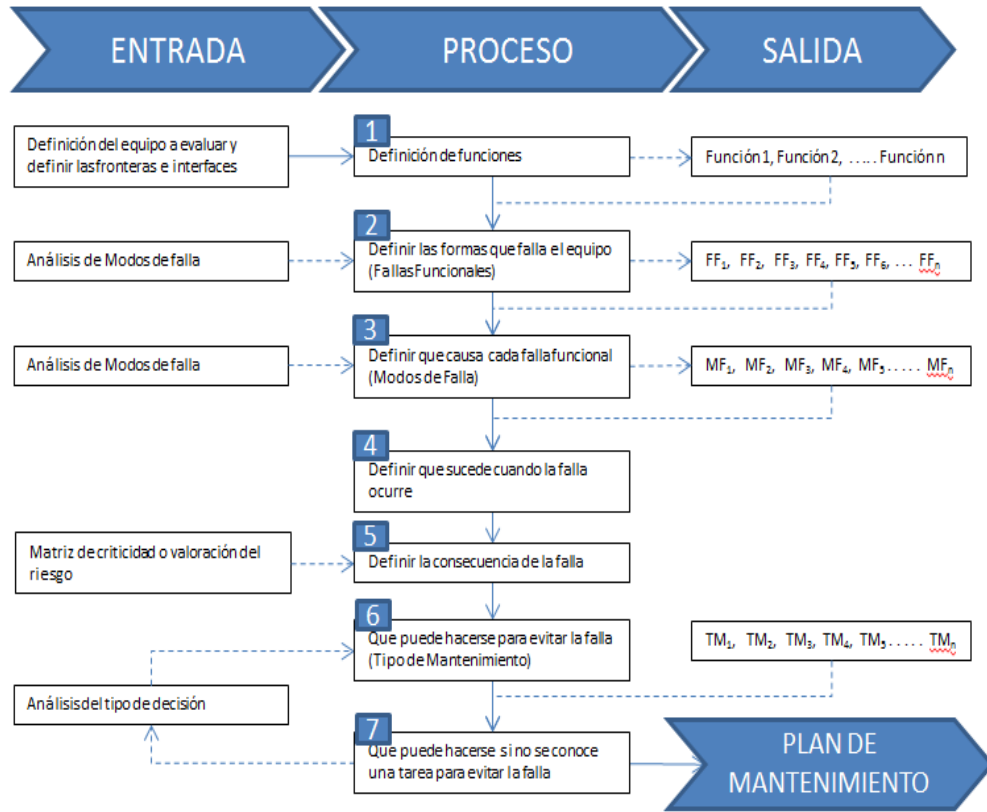
Primero, consiste en dividir la instalación en subsistemas y partes de componentes, posteriormente se individualizan los elementos funcionales más significativos, elementos cuya falla es más crítica para el funcionamiento de los equipos, luego se procede a determinar los requerimientos de mantenimiento para cada elemento funcional definiendo la óptima política a adoptar en cada uno de ellos. Por último, se debe determinar las responsabilidades organizativas (cuando, como y quien deberá implementar la política de mantenimiento).

En el diagrama anexo se explica el flujograma implementado en la propuesta, se especifican cuáles son los métodos establecidos que, bajo una lógica selectiva logran definir las acciones a implementar para satisfacer las funciones requeridas por el usuario del equipo.

---

<sup>13</sup> Mantenimiento centrado en confiabilidad - Tenaris University

**Figura 28. Flujoograma RCM**



**Fuente: Diseño propio (autores)**

La entrada inicial según el flujoograma define el equipo (o equipos) a evaluar y las fronteras e interfaces que cortan a este equipo.

Definir las fronteras del equipo a evaluar no es una tarea fácil, se requiere de un gran estudio y de los datos históricos del equipo para determinar qué elementos críticos del sistema nos afectan la confiabilidad operativa del equipo, si las fronteras se definen de manera apropiada el resultado de la estrategia es óptimo, una mala selección de las fronteras resulta en soluciones superficiales que no llevan al objetivo principal de nuestra estrategia de mantenimiento y será un fracaso.

Las fronteras es un perímetro imaginario donde se cortan los diferentes componentes que hacen parte del equipo y solo se evalúa lo que se encuentra dentro de dicha frontera.

De acuerdo al análisis de costo (capítulo 3) se evidencia que la cámara de empuje (que hace parte de la Bomba de inyección) es el principal elemento de falla en el proceso de inyección de agua, con base en esto, se determina como frontera todos los elementos que incluyen la cámara de empuje mostrados en la tabla 22

**Tabla 22. Fronteras RCM**

ELEMENTO DE ESTUDIO	FRONTERAS
CAMARA DE EMPUJE	ACOPLE CAMARA MOTOR
	COUPLING CAMARA BOMBA
	BORNERA SWICHT VIBRACION
	BORNERA SWICHT TEMPERATURA
	INCLUYE SISTEMA DE REFRIGERACION ACEITE

**Fuente: Diseño Propio (autores)**

Es importante tener en cuenta todas las variables operacionales que cada componente nos indica, por lo tanto se definen las características técnicas de la cámara de empuje.

**Tabla 23. Características técnicas**

<b>ELEMENTO DE ESTUDIO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ELEMENTO</b>
CAMARA DE EMPUJE	VELOCIDAD 3600 RPM
	PRESION 22 PSI SISTEMA DE PRELUBRICACION
	70 GRADOS CENTIGRADOS ACEITE LUBRICACION
	AJUSTE RUN OUT +/- 0,002" EN EJE
	AJUSTE KILSBURY 0,0018 "
	PLAN SELLO 11
	POTENCIA 1500 HP
	ACEITE CL4

**Fuente: Diseño Propio (autores)**

Las características operacionales de la cámara de empuje son:

**Tabla 24. Condiciones operacionales**

<b>ELEMENTO DE ESTUDIO</b>	<b>CONDICIONES OPERACIONALES</b>
CAMARA DE EMPUJE	ALTA PRESION 26
	ALTA TEMPERATURA 95 C
	BAJA HUMEDAD
	BAJA VISCOSIDAD
	24 HORAS AL DIA
	VIBRACION 0,11 IPS

**Fuente los autores**

Las interfaces para nuestra frontera definida son

**Tabla 25. Interfaces**

ELEMENTO DE ESTUDIO	INTERFASES
CAMARA DE EMPUJE	POTENCIA 1500 HP
	PRESION 22 PSI SISTEMA DE PRELUBRICACION
	PLAN SELLO 11
	AJUSTE RUN OUT +- 0,002" EN EJE
	SEÑAL 24 VOLTIOS SWICHT
	VIBRACION
	SEÑAL 24 VOLTIOS SWICHT
TEMPERATURA	
POTENCIA 1 HP MPTOR BOMBA	
LUBRICACION	
POTENCIA 1/4 HP MOTOR	
VENTILADOR REFRIGERACION	

**Fuente: Diseño Propio (autores)**

#### 4.1 DEFINICION DE FUNCIONES

Existen varias definiciones de función, ya sean principales o secundarias, tendremos en cuenta la definición de una función como “acción normal característica de un ítem,<sup>14</sup>” en nuestro caso en particular se definieron las siguientes funciones:

1. Suministrar potencia a bomba lubricación
2. Transferir aceite hacia la cámara de empuje con 20 psi de presión
3. Disminuir la temperatura del aceite con un delta de 10 grados centígrados
4. Transmitir la potencia de 1500 hp del motor al eje de la cámara de empuje.

<sup>14</sup> NORMA IEC 60300

5. Absorber las cargas generadas por el empuje axial de la bomba.
6. Monitorear la temperatura de la cámara de empuje
7. Contener el fluido del proceso.
8. Monitorear la temperatura de la cámara de empuje.
9. Monitorear la vibración de la cámara de empuje

#### **4.2 DEFINIR LAS FALLAS FUNCIONALES**

La falla es el “cese de la aptitud de una entidad (equipo o componente) para cumplir con la función requerida,<sup>15</sup>” estas fallas funcionales se deben determinar por medio de los históricos de falla, la información entregada por el fabricante y por la experiencia en campo.

Las principales fallas funcionales de la cámara de empuje son:

1. No suministrar potencia a bomba lubricación.
2. No transferir aceite hacia la cámara de empuje.
3. No disminuir la temperatura del aceite.
4. No transmitir la potencia del motor al eje de la cámara de empuje.
5. No absorber las cargas generadas por el empuje axial de la bomba.
6. Fuga del fluido del proceso.
7. Fuga de aceite.
8. Pérdida parcial del monitoreo de temperatura de la cámara de empuje.
9. No monitorea la temperatura de la cámara de empuje.
10. Pérdida parcial del monitoreo de vibración de la cámara de empuje.
11. No monitorea la vibración de la cámara de empuje.

---

<sup>15</sup> Norma UNI 13306:2003 TERMINOLOGIA DEL MANTENIMIENTO

### **4.3. DEFINIR LOS MODOS DE FALLA**

El modo de falla es la manifestación que puede tener una falla funcional, es importante indicar que una falla puede manifestarse en más de un modo de falla observable, por ejemplo, cuando una Bomba centrífuga no transmite fluido (falla funcional) genera varios modos de falla a saber: daño en impulsor (primer modo de falla), rotura de eje (segundo modo de falla), fuga de fluido (tercer modo de falla) etc.

La principal falla funcional del sistema se encuentra en la cámara de empuje (no trasmite potencia del motor al eje de la cámara de empuje), los siguientes modos de falla son:

1. Rotura de eje por falta de lubricante
2. Daños en acoples (lado motor y lado bomba)
3. Daño de rodamientos por contaminación de aceite

El desarrollo de los anteriores pasos para cada modo de falla se detalla en el Anexo A.

### **4.4. DEFINIR EL EFECTO DE LA FALLA Y LA CONSECUENCIA DE LA FALLA**


El deterioro en el funcionamiento de un equipo puede causar daños o eventos indeseados en el entorno, en las personas, en los activos y hasta en la imagen de la empresa, por lo tanto se debe definir la(s) consecuencia(s) para medir el grado de criticidad de la falla funcional y si se requiere, medir cuantitativamente la falla funcional en términos económicos o de riesgo. Cuando hacemos referencia al “efecto de la falla” lo relacionamos a lo que sucede cuando la falla ocurre y posteriormente a la consecuencia de la falla.

Para analizar las consecuencias de la falla, se requiere utilizar la matriz de criticidad o valoración del riesgo, la cual es una matriz previamente establecida donde la consecuencia se analiza matemáticamente con la probabilidad de que la falla se presente y se obtiene el riesgo, siendo este el criterio para determinar qué tan crítico es el modo de falla analizado.

Para el caso en particular se utiliza la matriz de riesgos dada por Ecopetrol, donde se evalúan diferentes aspectos de impacto a las personas, impacto económico, ambiental, a clientes y la imagen de la empresa Figura (matriz).

**Figura 29 Matriz de valoración de riesgos RAM**

**ANEXO 1 – Formato ECP-DRI-F-045 Matriz de Valoración de Riesgos – RAM**

 DIRECCIÓN DE RESPONSABILIDAD INTEGRAL MATRIZ DE VALORACIÓN DE RIESGOS - RAM					ECP-DRI-F-045					
					ACT: 2	1/1	31 de Marzo de 2008			
Para mayor información sobre el uso y manejo de este formato consulte instructivo ECP-DRI-I-007										
CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD					
Personas	Económica	Ambiental	Clientes	Imagen de la Empresa		A No ha ocurrido en la Industria	B Ha ocurrido en la Industria	C Ha ocurrido en la Empresa	D Sucede varias veces al año en la Empresa	E Sucede varias veces al año en la Unidad, Superintendencia o Departamento
Una o mas fatalidades	Catastrófica > \$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L	M	M	H	H
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Regional	3	N	L	M	M	H
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N	N	L	L	M
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	N	N	N	L	L
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	N	N	N	N	N

**Fuente Ecopetrol**

Se toma como ejemplo la rotura de ejes por falta de lubricante, cuando esto ocurre, se genera alta vibración, ruido excesivo, alta temperatura y se produce colapso, el mayor riesgo es económico ya que el equipo queda fuera de servicio

durante 3 días (el costo por no tener el equipo en servicio es \$US75000), se requiere instalar una cámara de empuje nueva (el costo del equipo asciende a \$US48000) y requiere cambio de aceite (el costo es US\$1000 incluyendo la mano de obra); bajo la matriz de criticidad de la Figura 29 se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 26. Ejemplo rotura ejes**

R. Ambiental	R. Humano	R. Económico	R. Imagen	Valor del riesgo económico
E0	E0	E2	E1	US \$ 124 000

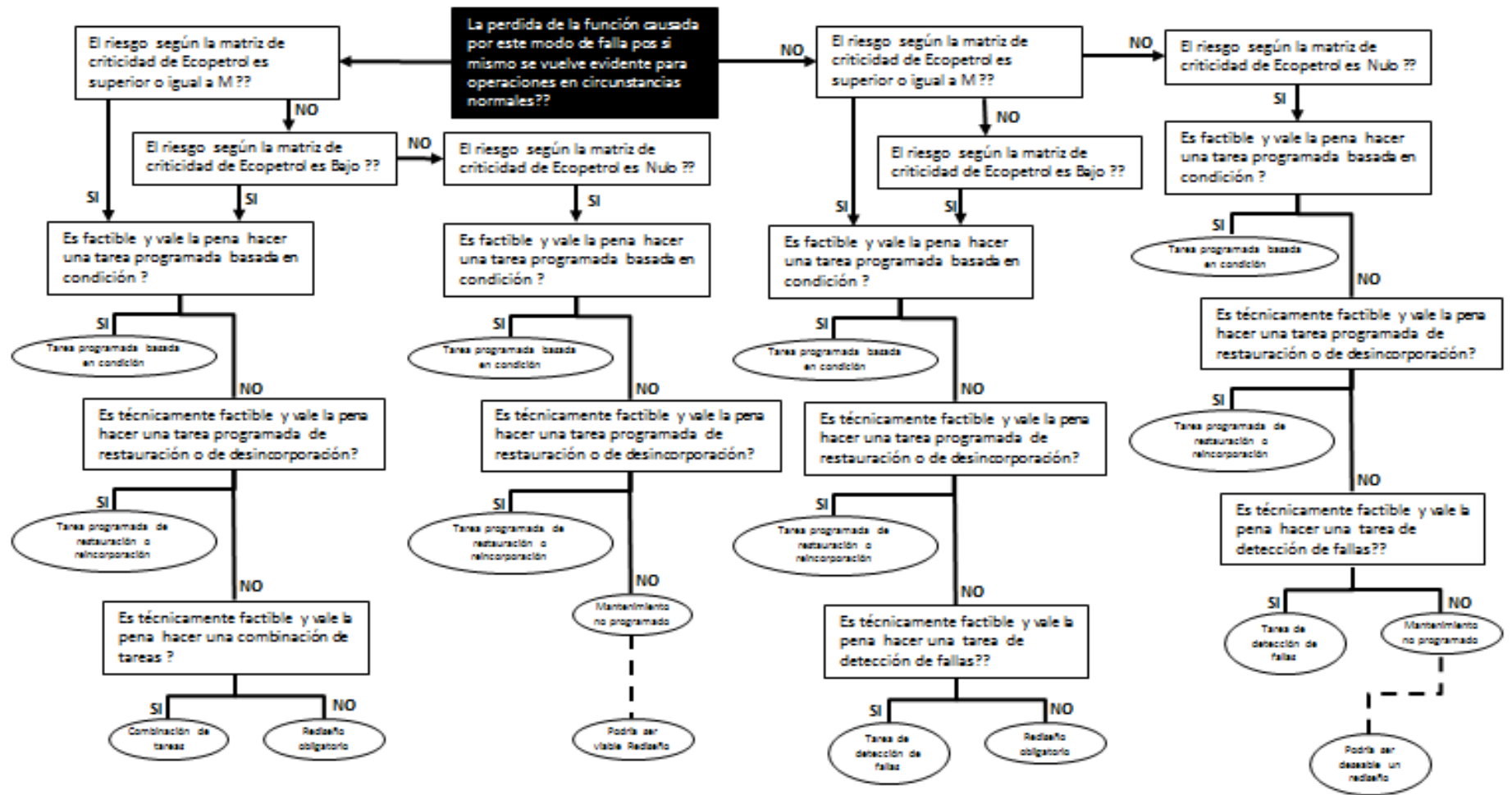
**Fuente: Diseño propio (autores)**

En este caso se escogería el criterio más crítico que es el impacto económico catalogado en la matriz RAM como E2, falla valorada en \$US 124 000.

#### **4.5 DEFINIR QUE PUEDE HACERSE PARA EVITAR LA FALLA**

Posterior al análisis de criticidad debemos recurrir a crear un árbol lógico de decisión, esta herramienta nos permite orientarnos hacia el tipo de mantenimiento que debemos emplear en cada modo de falla. Para nuestro caso, se diseñó un árbol de decisión acorde con las necesidades de nuestro proyecto y aterrizado en la estrategia de riesgo de Ecopetrol que es la matriz de criticidad RAM con la cual la empresa se apoya para el estudio de todos sus proyectos.

Figura 30. Árbol lógico de decisión



Fuente los autores

El árbol de decisión establece las diferentes tareas de mantenimiento a ejecutar y se realiza en el siguiente orden: tareas de mantenimiento proactivo (programadas en base a condición y de restauración o reincorporación) y el mantenimiento correctivo (rediseño o actividades de mantenimiento no programado), el criterio para determinar cuál es el más apropiado depende de un análisis costo beneficio, método que se explica en el capítulo 5 (Pág 106).

Las tareas programadas en base a condición que se incluyeron en el proyecto van orientadas a detectar, bajo algún método de detección, los modos de falla que bajo condiciones normales de operación se evidencian, estas tareas son el monitoreo de vibraciones en la cámara de empuje, rutinas de inspección realizadas por los operadores, análisis de termografía y análisis de aceites.

Las tareas programadas de restauración van encaminadas a reducir de manera significativa las consecuencias de las fallas con la restitución o cambio de algún componente del equipo para volver a su condición original, por ejemplo: cuando se realiza cambio de aceite a las cámaras de empuje semestralmente con el fin de restaurar las condiciones operacionales óptimas del equipo; adicionalmente a esta actividad programada se incluyeron reemplazo de radiadores, cambio periódico de filtros de humedad, cambio periódico de bomba de lubricación.

Dentro de la estrategia se combinaron tareas con el fin de disminuir la probabilidad de falla como los son el análisis de aceite y el cambio de aceite por condición.

Cuando ninguna de las actividades proactivas es costo efectiva o no reduce la probabilidad de falla al cual está expuesto, el paso a seguir de acuerdo al árbol de decisión es realizar un rediseño que reduzca o mitigue las consecuencias de la falla. De acuerdo a los análisis de falla que se desarrollaron en el capítulo 2 se catalogó como causa básica el deterioro de las propiedades del aceite y del filtro de silica, por lo anterior se recomienda un rediseño en aceite y filtro de silica

actual, con el objetivo de disminuir la consecuencia de la falla y por lo tanto el riesgo. El rediseño consiste en cambiar de fabricante del aceite y del filtro, mejorando la calidad del producto y evitando su degradación prematura, se espera que con esta propuesta se aumente el tiempo medio entre fallas y por lo tanto disminuya el lucro cesante del equipo.

#### **4.6 DEFINIR QUE PUEDE HACERSE SI NO SE CONOCE LA FALLA**

En los modos de falla que no son evidentes para el operador en condiciones normales de operación se deben implementar actividades para la detección de fallas como pruebas funcionales periódicas en los equipos, en esta propuesta se incluyó la calibración de protecciones, tanto en los sensores de temperatura como de vibración con el fin de garantizar que estos componentes de control actúen cuando el equipo lo requiera, evitar una falla múltiple y posterior daño catastrófico en el equipo.

El desarrollo completo de la Hoja de decisión del RCM propuesto se detalla en el anexo B.

## **5. ANÁLISIS DE COSTO BENEFICIO RESPECTO A LA PROPUESTA DE MEJORA**

### **5.1 COSTO BENEFICIO PARA DETERMINAR LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO DE ACUERDO AL ARBOL LOGICO DE DECISIÓN**

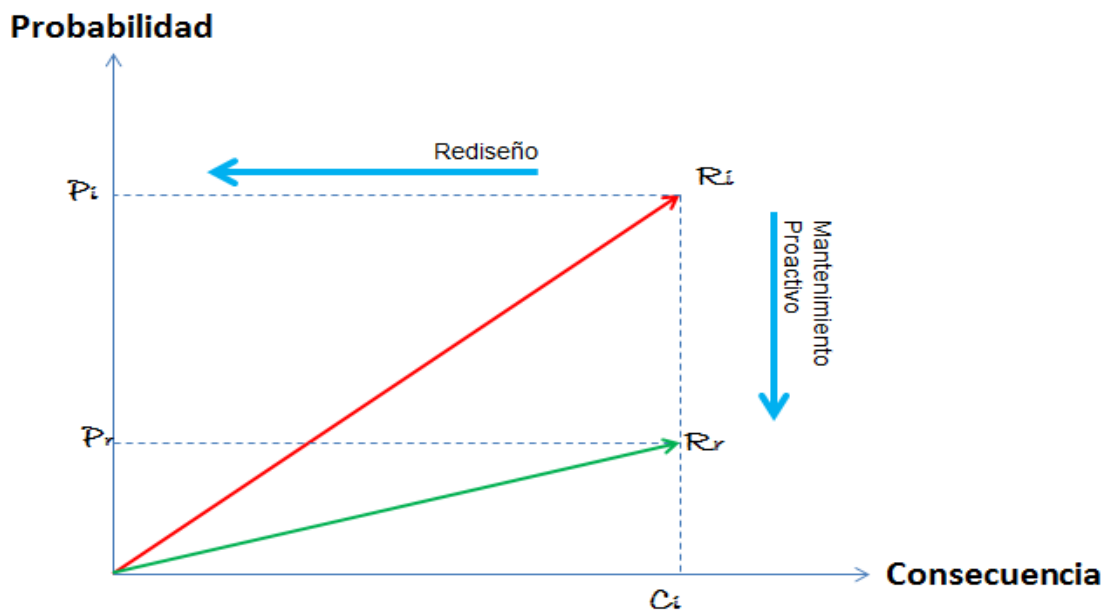
En el capítulo anterior se explicaron los tipos de mantenimiento a emplear y las actividades de mantenimiento, pero no se incluye con qué criterio económico podemos tomar decisiones para definir si la mejor opción es un mantenimiento basado en condición, un mantenimiento de restauración, un rediseño o simplemente dejar que el componente analizado corra a falla, en este capítulo se explicará este criterio y como se analizaron todas y cada uno de los modos de falla desarrollados en este RCM por medio de un ejemplo.

Antes de hablar de Costo Beneficio, debemos analizar qué criterios se van a tener en cuenta: el riesgo depende y es proporcional a la suma de las probabilidades de falla y de consecuencias de falla, lo que indica que, si disminuimos estos factores podremos disminuir el riesgo, ahora bien, debemos evaluar que tan rentable resulta la disminución de algún factor (o los dos) comparado con el costo de su implementación ya que para que sea “viable” el beneficio debe ser mayor que el costo, de lo contrario, y de acuerdo a nuestro árbol lógico de decisión estipulado en el capítulo 4 si la actividad no es viable ni por mantenimiento proactivo o rediseño la solución es llevar el componente a falla.

En la figura 31(pág 107) se muestra un esquema del riesgo en un equipo cualquiera donde antes del análisis existe un riesgo inicial ( $R_r$ ), este riesgo puede ser mitigado con la adición de una o varias tareas de mantenimiento proactivo en el cual se disminuye la probabilidad de falla que de acuerdo a la figura se denomina riesgo remanente ( $R_r$ ); si por el contrario, no es viable disminuir la probabilidad de falla se debe realizar un rediseño para poder mitigar la

consecuencia de la falla inicial y si definitivamente no existe ninguna tarea “viable” para mitigar los riesgos el componente analizado se debe correr a falla (run to fail); es importante resaltar que si analizamos el procedimiento de esta grafica podemos ver que es congruente con nuestro árbol lógico de decisión. Cuando se habla de consecuencias en el análisis costo-beneficio se entiende que no solo se habla de costos económicos por pérdida o daño en equipos sino también de costos a la integridad a las personas, a la seguridad, al medio ambiente o la imagen de la empresa y este criterio depende exclusivamente de la matriz de criticidad definida anteriormente.

Figura 31. **Esquema del riesgo**



**Fuente: Diseño propio (autores)**

Una vez se determinaron los criterios para el análisis de un costo beneficio (**CB**) podemos definir lo siguiente: el costo beneficio es una proyección económica en un tiempo establecido que permite evaluar si es posible disminuir el riesgo de una falla por medio de actividades de mantenimiento y contrastarla con el costo de

dicha implementación, en todo caso, el análisis debe ser mayor a 1 para que la propuesta sea viable; este método se cuantifica en la siguiente ecuación:

$$\text{CostoBeneficio} = \frac{\frac{\$ Ri}{Pi} - \frac{\$ Ri}{Pr}}{\$ \text{Costo Mantenimiento}} > 1$$

Donde:

Ri = Riesgo inicial

Pi= Tiempo estimado entre fallas del riesgo inicial

Pr=Tiempo estimado entre fallas del riesgo remanente

Tanto los costos del riesgo inicial y del riesgo remanente corresponden a cada uno de los costos generados a partir de la consecuencia de la falla; estos costos incluyen la mano de obra, los materiales y el lucro cesante por no tener el equipo en servicio, igualmente se realiza el mismo análisis para calcular los costos de mantenimiento en el cual se debe incluir el lucro cesante en caso de que la actividad requiera parar el equipo, mano de obra y repuestos.

Para explicar el modelo de costo-beneficio propuesto se presenta el siguiente ejemplo, el cual sigue a cabalidad el árbol lógico de decisión propuesto y se analiza una por una cada si las actividades de mantenimiento que se propusieron son costo efectivas:

El ejemplo corresponde al modo de falla presentado en el capítulo 4, que es la rotura del eje por falta de lubricante y para el cual se proponen las siguientes actividades de mantenimiento:

- Análisis de Vibraciones y Temperatura: Esta tarea de mantenimiento la realiza un técnico CBM con un costo de US \$100, actividad que realiza sin parar el equipo con una periodicidad de 3 meses.
- Análisis de Aceite: Esta tarea de mantenimiento la realiza un técnico CBM con un costo de US\$100 (el costo del análisis en laboratorio lo asume el fabricante y no se incluye), no se requiere parar el equipo y se realiza con una periodicidad de 3 meses.
- Cambio de Aceite: Esta tarea preventiva la realizan 2 técnicos mecánicos con un costo de US\$40/hora, se requiere parar el equipo por 4 horas y los repuestos que ascienden a aproximadamente US\$ 750 incluyen: 5 galones de aceite CL4 (US\$500), 1 filtro de aceite (US\$150) y un filtro de silica (US\$100). Este mantenimiento se realiza con una periodicidad de 3 meses.

Antes de continuar debemos calcular el lucro cesante del equipo, este lo define la real academia de la lengua como “ganancia dejada de obtener como consecuencia del incumplimiento de una obligación”, en este caso la obligación sería la función para la cual fue instalada y depende de los cálculos operativos de cuanto dejó de producir el equipo, lo que corresponde en términos coloquiales a la “diferida de producción”, esta diferida en términos económicos es fluctuante debido a la variación del precio del barril, para lo cual se analizará de la siguiente manera: cada día de parada de una cámara de empuje en una bomba de inyección la empresa deja de inyectar 30000BPDW (barriles de agua) lo que corresponde a 1800 BPDW (barriles de crudo), si estandarizamos el costo de levantamiento del barril en US\$13.8 se concluye que el lucro cesante de una cámara de empuje es aproximadamente US\$25000 por día.

El riesgo inicial se define como el costo o daño producido por la consecuencia de la falla analizada, en el caso concreto, cuando una cámara de empuje falla por

daño en el eje, el equipo prácticamente no es recuperable por lo que se requiere una cámara de empuje nueva (costo aproximado de US\$48.000), adicionalmente el equipo queda fuera de servicio como mínimo tres días hasta que se retire la cámara de bodega y se instale nuevamente y se requieren los mismo costos descritos anteriormente para el cambio del aceite; aproximadamente el riesgo inicial se calcula en US\$124 000.

$$Ri = US\$48000 + 3 \text{ dias} * US\$25000 + 24HH$$

$$* \frac{US\$40}{HH} + US\$750$$

$$Ri = US\$124 710$$

El tiempo estimado entre fallas del riesgo inicial, es decir el tiempo que se estima que dure el eje de la cámara de empuje sin ningún mantenimiento es 2 años, y el tiempo estimado entre fallas del riesgo remanente, es decir, el tiempo que se espera que dure el eje de la cámara de empuje con la implementación de las rutinas es 6 años, entonces:

$$Pi = 2 \text{ años}$$

$$Pr = 6 \text{ años}$$

De acuerdo a las 3 tareas del nuevo plan de mantenimiento el costo del mantenimiento incluyendo el lucro cesante del equipo por las intervenciones (por cada día de parada el equipo deja de producir US\$25000) y los repuestos es aproximadamente US\$11 000 así:

$$\begin{aligned} \$\text{Análisis Vibraciones} &= 4 \text{ veces} * US\$100 \\ &= US\$400/\text{año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \$\text{Análisis Aceites} &= 4 \text{ veces} * US\$100 \\ &= US\$400/\text{año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \$\text{Cambio de Aceite} &= 2 \text{ veces} \\ &* \left( 4HH * US\$40/HH + \frac{4h * US\$25000}{24h} \right. \\ &\left. + \$US750 \right) = US\$10\,153/\text{año} \end{aligned}$$

$$\text{Plan de mtto} = US\$10953/\text{año}$$

Ahora, aplicando la fórmula de costo beneficio para el modo de falla del ejemplo se evidencia que el beneficio es superior al costo en una relación de 4:1, por lo tanto la propuesta es viable.

$$\begin{aligned} \rightarrow \text{CostoBeneficio} &= \frac{US\$124\,710}{2 \text{ años}} - \frac{US\$124\,710}{6 \text{ años}} \\ &= \frac{US\$10153}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\text{CostoBeneficio} = 4,1$$

El resultado del análisis costo beneficio para cada uno de los modos de falla expuestos se detalla en el anexo 2.

## 5.2 COSTO BENEFICIO GLOBAL

De acuerdo al análisis de los múltiples modos de falla en el RCM propuesto, se ha demostrado que la falla general en estos equipos es la contaminación del lubricante lo que ocasiona el daño interno de la cámara de empuje y posteriormente la parada del equipo, este lucro cesante por paro del equipo, ha sido el factor más influyente en la pérdida de productividad en el proceso, por lo tanto se debe demostrar que el mantenimiento propuesto, aunque es más costoso que el actual tiene como finalidad mantener la cámara de empuje disponible salvo los tiempo de parada por mantenimientos programados a un costo global que debe ser rentable para la empresa.

Para demostrar lo anterior se realiza un análisis de costo beneficio donde se especifique los costos de mantenimiento globales en un periodo de un año y se contrasta con los costos de mantenimiento antes de la implementación así:

### ANTES

DESCRIPCION	COSTO /AÑO
1. Análisis de Vibraciones (Trimestral)	
Lucro Cesante	US\$0
Mano de Obra	US\$400
2. Cambio de aceite (trimestral)	
Lucro Cesante (4 horas/intervención)	US\$16.666
Mano de Obra (4 horas/intervención)	US\$640
Repuestos (Aceite, filtros)	US\$3000
Consecuencia económica del fallo: se estima que con el mantenimiento actual, la cámara de empuje debe ser reparada como mínimo una vez por año.	

Lucro Cesante (3 días/intervención)	US\$75000
Mano de Obra (24 horas hábiles/intervención)	US\$960
Repuestos(Rodamientos, Kit sello Mecánico, Sellos Laberinto)	US\$1600
<b>COSTO TOTAL POR AÑO</b>	<b>US\$98266</b>

## NUEVO

DESCRIPCION	COSTO /AÑO
1. Inspección visual (semanal)	
Lucro Cesante	US\$0
Mano de Obra (1h/inspección)	US\$2080
2. Análisis de Vibraciones (Trimestral)	
Lucro Cesante	US\$0
Mano de Obra	US\$400
3. Análisis de Aceite (Mensual)	
Lucro Cesante	US\$400
Mano de Obra (incluye el equipo toma muestras)	US\$500
4. Cambio de aceite (por condición, se estima 2 veces/año)	US\$1500
Lucro Cesante (4 horas/intervención)	US\$8.333
Mano de Obra (4 horas/intervención)	US\$320
Repuestos (Aceite, filtros)	US\$1500
5. Reemplazo de Bomba de Lubricación (se realiza por mantenimiento programado una vez/año)	
Lucro Cesante (se realiza en paralelo con el cambio de aceite)	US\$0
Mano de Obra (Eléctricos y Mecánicos, 2h/intervención)	US\$160
Repuestos(Bomba Motor)	US\$2000
6. Reemplazo de Filtro de Silica (por condición, se estima 1 elemento/mes)	
Lucro Cesante	US\$0

Mano de Obra (se incluye en la inspección semanal)	US\$0
Repuesto(Filtro)	US\$1200
7. Reemplazo de Radiador y mangueras (1 vez por año )	
Lucro Cesante (se realiza en paralelo con el cambio de aceite)	US\$0
Mano de Obra(Eléctricos y Mecánicos, 2h/intervención)	US\$160
Repuesto (Radiador, mangueras)	US\$3000
Consecuencia: se estima que con la implementación del nuevo plan de mantenimiento la cámara de empuje no sufrirá daño catastrófico.	US\$0
<b>TOTAL COSTOS NUEVO PLAN DE MANTENIMIENTO</b>	<b>US\$ 21.553</b>

<b>AHORRO DEL NUEVO PLAN DE MANTENIMIENTO</b>	<b>US\$ 76.713</b>
-----------------------------------------------	--------------------

Como se deduce en el anterior análisis de costos, si se logra evitar que la cámara de empuje presente parada del equipo por contaminación del aceite se obtiene un ahorro de aproximado de US\$76.000 por año y por equipo.

Este ahorro se debe multiplicar por el número de equipos que actualmente operan en la planta de inyección 5A (5 Bombas de Inyección), por lo que se obtiene un ahorro neto de US\$380 000, y más aún, si la propuesta se extrapola a las dos plantas de inyección adicionales a PIA 5A que existen en La Cira Infantas (PIA 3 con 6 equipos y PIA 6 con 9 equipos) el ahorro sería de US\$1 292 000 por año.

## 6 ANALISIS DE REPUESTOS

En el año 2008 cuando se inició con la operación de las plantas de inyección de agua en el proyecto La Cira Infantas se presentaron inconvenientes con el mantenimiento de las bombas centrifugas multi-etapas, ya que los insumos y repuestos no eran de fácil consecución y solo los comercializaba el fabricante (Baker Huges), otro inconveniente tenía que ver con la catalogación de los repuestos.

A lo largo del desarrollo del proyecto se ha recomendado la inclusión de repuestos en el sistema de información de Ecopetrol que incluye su catalogación y los parámetros de reposición, algunos de ellos se han homologado por repuestos de fácil consecución en el país como lo son los filtros de silica y el aceite Mobil RARUS 102.

En la tabla 27 se demuestra que parte de los repuestos que se requieren para el mantenimiento programado aún no se encuentran disponibles en bodega. En el desarrollo del proyecto se han evidenciado componentes adicionales que se requieren para evitar fallas en la cámara de empuje, estos repuestos han sido implementados progresivamente en los mantenimientos preventivos y han aumentado el tiempo medio entre fallas, tal como se proyectó.

**Tabla 27. Repuestos en bodega.**

<b>ITEM</b>	<b>COMPONENTE</b>	<b>STOCK ACTUAL/EQUIPO</b>
1	GRASA DE ACOPLA DE MALLA (5 LB)	1
2	ACOPLE DE MALLA (UNID)	0
3	EMPAQUE DEL ACOPLA (UNID)	0
4	ACEITE PARA CAMARA EMPUJE (GALON)	15
5	FILTRO DE SILICA PARA CAMARA DE EMPUJE (UNIDAD)	1
6	FILTRO DEL SISTEMA DE LUBRICACION CAMARA DE EMPUJE (UNIDAD)	1
7	SISTEMA DE LUBRICACION CAMARA EMPUJE (UNIDAD)	NO CATALOGADO
8	CAMARA DE EMPUJE (UNIDAD)	NO CATALOGADO
9	SELLOS DE CARTUCHO (UNIDAD)	1
10	ORINGS DE ADMISION (UNIDAD)	NO CATALOGADO
11	ORINGS DE DESCARGA (UNIDAD)	NO CATALOGADO
12	ORINGS DE CAMARA DE EMPUJE (UNIDAD)	NO CATALOGADO

**Fuente: Diseño propio (autores)**

Dentro de la estrategia RCM planteada se debe cumplir con un stock mínimo de repuestos relacionados en la tabla 28 que garantice el desarrollo de cada una de las actividades de mantenimiento a ejecutar en una cámara de empuje.

**Tabla 28. Stock mínimo de repuestos para una cámara de empuje**

ITEM	COMPONENTE	STOCK MINIMO SUGERIDO A UN AÑO	STOCK MINIMO SUGERIDO A DOS AÑOS	STOCK MINIMO SUGERIDO A TRES AÑOS
1	GRASA DE ACOPLA DE MALLA (5 LB)	3	6	9
2	ACOPLE DE MALLA (UNID)	0	0	1
3	EMPAQUE DEL ACOPLA (UNID)	1	2	3
4	ACEITE PARA CAMARA EMPUJE (GALON)	10	20	30
5	FILTRO DE SILICA PARA CAMARA DE EMPUJE (UNIDAD)	4	8	12
6	FILTRO DEL SISTEMA DE LUBRICACION CAMARA DE EMPUJE (UNIDAD)	2	4	8
7	RADIADOR SISTEMA DE LUBRICACION CAMARA EMPUJE (UNIDAD)	1	2	3
8	BOMBA DE LUBRICACION	1	2	3
9	MANGUERAS SISTEMA DE LUBRICACION (KIT)	1	2	3
10	CAMARA DE EMPUJE (UNIDAD)	0	0	1
11	SELLOS DE CARTUCHO (UNIDAD)	1	2	3
12	ORINGS DE ADMISION (UNIDAD)	4	8	12
13	ORINGS DE DESCARGA (UNIDAD)	4	8	12
14	ORINGS DE CAMARA DE EMPUJE (UNIDAD)	4	8	12

**Fuente Los Autores**

## 7 CONCLUSIONES

La estrategia de RCM es un método práctico - con resultados a mediano y largo plazo - para la implementación de un plan de mantenimiento en el cual podemos optimizar los costos operativos, lograr altos estándares de disponibilidad y alcanzar objetivos clase mundo en aspectos de seguridad y medio ambiente.

En el transcurso del proyecto se demostró bajo un análisis de costos que el componente crítico es la cámara de empuje ya que consume el 21% de los costos totales de mantenimiento (aproximadamente US\$800.000), posteriormente y acorde con la metodología RCM se propuso un plan de mantenimiento en el cual Ecopetrol ya ha iniciado su implementación en algunas de las recomendaciones propuestas por los autores como lo son:

- Cambio preventivo de filtro silica.
- Análisis de aceite.
- Stock mínimo de mangueras hidráulicas, coolers y bombas de lubricación.

Estas recomendaciones específicas han tenido resultados positivos y se espera que con la implementación completa del proyecto la disponibilidad operativa de cada Bomba de Inyección alcance el 99%, logrando ubicar los indicadores de gestión de mantenimiento en lugares privilegiados a nivel corporativo y ser pioneros en reparaciones de cámaras de empuje a nivel nacional.

## BIBLIOGRAFÍA

- **ARDILA, PÉREZ. Gabriel y MANTILLA, GONZÁLEZ. José Julián.** Proyecto de grado Diseño de la estrategia basada en RCM para bombas centrífugas y reciprocantes, compresores y bombas de combustión interna de la planta de inyección de agua Casabe planta de reinyección de agua residual Cantagallo y estación 2 de recolección y tratamiento de crudo Casabe de la superintendencia del rio de Ecopetrol. Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga. 2008  
[http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/131/1/digital\\_15507.pdf](http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/131/1/digital_15507.pdf)
- **ECOPETROL.** Temas especiales, crónica.  
[http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta\\_petrolera119/rev\\_cronica.ht](http://www.ecopetrol.com.co/especiales/carta_petrolera119/rev_cronica.ht)
- **ECOPETROL.** El petróleo y su mundo. Petróleo en Colombia.  
<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/petroleoencolombia2.htm>.
- **Elipse – ECP – PRD 6.3.3.** Programa de inventario usado como sistema de información en Ecopetrol.
- **ENSAYO. DATOS,** ´Diego Camilo Pérez, 17 de Febrero 2014.  
<http://clubensayos.com/Informes-De-Libros/Datos/1454695.html>
- **ISO 14224.** Petroleum and natural gas industries — Collection and Exchange of Reliability and Maintenance data for equipment.
- **La Comunidad Petrolera.** Inyección de agua. <http://industria-petrolera.lacomunidadpetrolera.com/2009/01/inyeccion-de-agua.html>.
- **Mantenimiento centrado en confiabilidad** - Tenaris University.
- **Manual IOM.** Fabricante Baker Centralift

- **MOUBRAY, John.** Mantenimiento Centrado en confiabilidad, 2004. ISBN 09539603-2-3
- **MORA, Alberto.** Mantenimiento Planeación, Ejecución y control.2009
- **NORMA IEC 60300**
- **NORMA UNI 13306:2003** TERMINOLOGIA DEL MANTENIMIENTO.
- **PARRA, Carlos.** Reliability Centered Maintenance, 2009
- **SAE JA 1012.** A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard. 2002.
- **TENARIS, University.** Introducción a la Gestión del Mantenimiento. 2008
- **Textos científicos.com.** Recuperación asistida de petróleo. 16/06/2005. <http://www.textoscientificos.com/petroleo/recuperacion>
- **PARRA, Márquez. Carlos Alberto y CRESPO, Márquez. Adolfo.** Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos, Desarrollo y aplicación práctica de un modelo de gestión de mantenimiento.   
[http://books.google.com.co/books?id=8xsnQ1aMq2gC&pg=PA136&lpg=PA136&dq=Si+la+evidencia+de+este+tipo+de+modo+de+fallo+puede+ser+detectada+bajo+condiciones+normales+de+operaci%C3%B3n,+es+posible+que+se+puedan+tomar+acciones+programadas+en+base+a+la+condici%C3%B3n+del+activo,+que+ayud+en+a+prevenir+estos+modos+de+fallo+y+eliminar+sus+consecuencias.++Las+tar+eas+a+condici%C3%B3n+se+llaman+as%C3%AD+porque+los+elementos+que+s+e+inspeccionan+se+dejan+en+servicio+a+condici%C3%B3n+de+que+contin%C3%BAen+cumpliendo+con+los+par%C3%A1metros+de+funcionamiento+especificados,+esto+tambi%C3%A9n+se+conoce+como+mantenimiento&source=bl&ots=IYQZoeY150&sig=gpY\\_hMZajutoAgPZVOROwwCGorc&hl=es&sa=X&ei=Uf43VJz3LM2MNtSkgoAP&ved=0CBsQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.co/books?id=8xsnQ1aMq2gC&pg=PA136&lpg=PA136&dq=Si+la+evidencia+de+este+tipo+de+modo+de+fallo+puede+ser+detectada+bajo+condiciones+normales+de+operaci%C3%B3n,+es+posible+que+se+puedan+tomar+acciones+programadas+en+base+a+la+condici%C3%B3n+del+activo,+que+ayud+en+a+prevenir+estos+modos+de+fallo+y+eliminar+sus+consecuencias.++Las+tar+eas+a+condici%C3%B3n+se+llaman+as%C3%AD+porque+los+elementos+que+s+e+inspeccionan+se+dejan+en+servicio+a+condici%C3%B3n+de+que+contin%C3%BAen+cumpliendo+con+los+par%C3%A1metros+de+funcionamiento+especificados,+esto+tambi%C3%A9n+se+conoce+como+mantenimiento&source=bl&ots=IYQZoeY150&sig=gpY_hMZajutoAgPZVOROwwCGorc&hl=es&sa=X&ei=Uf43VJz3LM2MNtSkgoAP&ved=0CBsQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false)

## ANEXOS

### ANEXO A. HOJA FMEA PARA LOS MODOS DE FALLA DEFINIDOS

COD EQUIPO	EQUIPO	Función	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos
EM - AC - OH	MOTOR ELECTRICO BOMBA LUBRICACION	SUMINISTRAR POTENCIA A BOMBA DE LUBRICACION	NO SUMINISTRAR POTENCIA A BOMBA DE LUBRICACION	NOI - VIB	ROTURA DE RODAMIENTOS POR DESGASTE MOTOR BOMBA LUBRICACION	El daño en los rodamientos se puede evidenciar por el aumento en el ruido del motor y/o aumento en la vibración del motor produce shut down en bomba inyección. Tiempo de parada de la bomba un día por cambio de motor
				BRD	BAJO AISLAMIENTO DE BOBINAS MOTOR	La pérdida de aislamiento en las bobinas produce disminución en la potencia y causa daños graves como bobinas aterrizadas, roturas o explosión del motor produce shut down en la bomba de inyección. Tiempo de parada de la bomba un día por cambio de motor

COD EQUIPO	EQUIPO	Función	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos
				BRD	PERDIDA AISLAMIENTO CABLE POTENCIA	La pérdida de aislamiento en el cable de potencia causa corto circuito lo que genera daño crítico en su integridad produce shut down de la bomba de inyección tiempo de parada un día por cambio de cables de potencia
				STP	DAÑO EN PROTECCIONES TERMICAS Y DE CORTO CIRCUITO	la falla en las protecciones causa parada del motor por corto circuito o sobrecalentamiento produce shut down de la bomba de inyección tiempo de parada un día por cambio de protecciones
				OHE	CONTACTOS DE CONEXIONES FLOJOS	Los contactos flojos producen temperatura excesiva pérdida de potencia corto circuitos en los cableados. Produce shut down de la bomba de inyección tiempo de parada un día por revisión completa de contactos.

COD EQUIPO	EQUIPO	Función	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos
PU - RO - UT	BOMBA DE LUBRICACION	TRANSFERIR ACEITE HACIA LA CAMARA DE EMPUJE CON 20 PSI DE PRESION	NO TRANSFERIR ACEITE HACIA LA CAMARA DE EMPUJE	VIB - NOI - OHE - BRD	DAÑO DE BUJES O PIÑONES DE BOMBA LUBRICACION	Cuando se produce daño en los bujes o piñones se presenta: alta vibración, ruido excesivo, alta temperatura y puede producir agarrotamiento de las partes internas produce shut down en la bomba de inyección tiempo de parada un día por cambio de internos.
				ELU	DAÑO EN SELLOS O ORINGS	El daño en los sellos o orings produce fugas de aceite hacia el ambiente y disminuye la presión hacia la cámara de empuje es visible por la disminución del nivel de aceite en la cámara de empuje. Produce shut down en la bomba de inyección tiempo de parada un día por cambio de sellos orings.

COD EQUIPO	EQUIPO	Función	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos
HE - AC - CW	ENFRIADOR DE ACEITE	DISMINUIR LA TEMPERATURA DEL ACEITE CON UN MINIMO DELTA DE 10 GRADOS CENTIGRADOS	NO DISMINUIR LA TEMPERATURA DEL ACEITE	NO I - VIB - BRD	PERDIDA AISLAMIENTO O DAÑO DE RODAMIENTOS MOTOR VENTILADOR	El daño en el motor ventilador se puede evidenciar por el aumento en el ruido del motor, aumento en la vibración del motor, aumento de la temperatura de la cámara de empuje y la pérdida de aislamiento en las bobinas la cual causa daños graves como agarrotamiento, roturas o explosión del motor. Se produce shut down en la bomba de inyección tiempo de parada un día por cambio de motor ventilador.
				IHT - SER	SATURACION DEL SERPENTIN POR CONTAMINACION DEL ACEITE	La transferencia de calor es insuficiente, existe contaminación del aceite a refrigerar por suciedad, alta humedad, impurezas. Aumenta la temperatura en la cámara de empuje y la presión del aceite aumenta. Se produce shut down en la bomba de inyección tiempo de parada tres días para cambio de aceite, limpieza interna de cámara, cambio de filtros.

COD EQUIPO	EQUIPO	Función	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos
				ELP	ROTURA DE SERPENTIN	El aceite fuga a través de los serpentines y se produce contaminación al medio ambiente, aumenta la temperatura de la cámara de empuje, disminuye el nivel de la cámara de aceite de la cámara de empuje. Se produce shut down en la bomba de inyección tiempo de parada un día por cambio de serpentín.

COD EQUIPO	EQUIPO	Función	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos
	CAMARA DE EMPUJE	TRANSMITIR LA POTENCIA DE 1500 HP DEL MOTOR AL EJE DE LA CAMARA DE EMPUJE	NO TRANSMITE LA POTENCIA DEL MOTOR AL EJE DE LA CAMARA	VIB - NO I - OH E - BR D	ROTURA DE EJE POR FALTA DE LUBRICANTE	Se detiene la bomba de inyección Se produce shut down en la bomba de inyección tiempo de parada dos días por cambio de cámara de empuje.

			DE EMPUJE			
				FT S - SE R	DAÑOS EN ACOPLES (LADO MOTOR Y LADO BOMBA)	Se evidencian ruidos excesivos, alta vibración, disminución de caudal en bomba inyecciones produce shut down en la bomba de inyección tiempo de parada un día por cambio de acoples.
				SE R	DAÑO DE RODAMIE NTOS POR CONTAMI NACION ACEITE	Cuando se produce contaminación del aceite (humedad excesiva) por falla en filtro de silica se presenta daño en rodamientos, aumenta la temperatura en la cámara de empuje, el aceite presenta degradación lo cual genera oxidación en la canastilla de rodamientos se evidencia con alta vibración, alta presión de lubricación y ruido excesivo. Se produce shut down en la bomba de inyección tiempo de parada un día por cambio de rodamientos.

COD EQUIPO	EQUIPO	Función	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos
		ABSORBER LAS CARGAS GENERADAS POR EL EMPUJE AXIAL DE LA BOMBA	NO ABSORBER LAS CARGAS GENERADA POR EL EMPUJE AXIAL DE LA BOMBA	NOI - VIB	Daño DE RODAMIENTOS POR FATIGA DE MATERIAL	El daño en los rodamientos se puede evidenciar por el aumento en el ruido de la cámara y/o aumento en la vibración de la cámara de empuje. Se produce shut down en la bomba de inyección tiempo de parada un día por cambio de rodamientos.
		CONTENER EL FLUIDO DEL PROCESO	FUGA DEL FLUIDO DEL PROCESO	ELU	DAÑO EN SELLO PROCESO	Se puede evidenciar visualmente por la fuga de agua de inyección hacia el ambiente, disminución de la presión del fluido de proceso, para corregir esta falla se requiere desmontar la cámara de empuje y reemplazar el sello cartucho, tiempo de parada un día.
			FUGA DE ACEITE	ELU	DAÑO EN SELLO LABERINTO	Cuando el sello laberinto falla se produce fuga de aceite hacia el medio ambiente, disminuye el nivel de aceite de la cámara. Tiempo de reparación un día.

COD EQUIPO	EQUIPO	Función	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos
PS - TS - WI	SENSOR DE TEMPERATURA	MONITOREAR LA TEMPERATURA DE LA CAMARA DE EMPUJE	PERDIDA PARCIAL DEL MONITOR DE TEMPERATURA DE LA CAMARA DE EMPUJE	ERO	DESCALIBRACION	Cuando el sensor se encuentra descalibrado se presenta una lectura errónea de temperatura y puede ocasionar falla múltiple, esta falla no es visible, para corregir esta falla se debe realizar calibración con patrón de medida, tiempo de parada 2 horas.
			NO MONITOREA LA TEMPERATURA DE LA CAMARA DE EMPUJE	FTF	PERDIDA DE AISLAMIENTO O CABLE	Cuando el cable de comunicación pierde aislamiento no funciona al momento de monitorear el equipo, esta falla no es visible, para corregir esta falla se requiere reemplazar el cable.

CO D E Q U I P O	EQUIPO	Función	Descripción Falla Funcional	Cód. MF	Modo de Falla	Descripción Efectos
PS - VI - WI	SENSO R DE VIBRACI ON	MONITOR EAR LA VIBRACI ON DE LA CAMARA DE EMPUJE	PERDIDA PARCIAL DEL MONITOR EO DE VIBRACIO NES DE LA CAMARA DE EMPUJE	ERO	DESCALIBRA CION	Cuando el sensor se encuentra descalibrado se presenta una lectura errónea de vibración y puede ocasionar falla múltiple, esta falla no es visible, para corregir esta falla se debe realizar calibración con patrón de medida, tiempo de parada 2 horas.
				FTF	PERDIDA DE AISLAMIENT O CABLE	Cuando el cable de comunicación pierde aislamiento no funciona al momento de monitorear el equipo, esta falla no es visible, para corregir esta falla se requiere reemplazar el cable.

Función	Descripción Falla Funcional	Modo de Falla	ES EVIDE NTE	R. Ambient al	R. Humano	R. Económ m	R. Imagen	Valor del riesgo económ ico	TIPO DE DECISIÓN
SUMINI STRAR POTEN CIA A BOMBA DE LUBRIC ACION	NO SUMINISTRA R POTENCIA A BOMBA DE LUBRICACIO N	ROTURA DE RODAMIEN TOS POR DESGASTE MOTOR BOMBA LUBRICACIO N	SI	D0	D0	D2	D0 (BAJO)	27.320	MC
		BAJO AISLAMIEN TO DE BOBINAS MOTOR	NO	C0	C0	C2 (BAJO )	C1	27.320	PM
		PERDIDA AISLAMIEN TO CABLE POTENCIA	SI	B0	B0	B2 (NULO)	B1	25.820	RTF
		DAÑO EN PROTECCIO NES TERMICAS Y DE CORTO CIRCUITO	SI	C0	C3 (MEDIO )	C2	C1	25.620	PM
		CONTACTO S DE CONEXIONE S FLOJOS	NO	D0	D3 (MEDIO )	D1	D0	26.000	MC

Función	Descripción Falla Funcional	Modo de Falla	ES EVI DENTE	R. Ambiental	R. Humano	R. Económ	R. Imagen	Valor del riesgo económico	TIPO DE DECISIÓN
TRANSFERIR ACEITE HACIA LA CAMARA DE EMPUJE CON 20 PSI DE PRESION	NO TRANSFERIR ACEITE HACIA LA CAMARA DE EMPUJE	DAÑO DE BUJES O PIÑONES DE BOMBA LUBRICACION	SI	E0	E0	E2 (MEDIO)	E0	27.320	MC
		DAÑO EN SELLOS O ORINGS	SI	D2	D0	D2 (BAJO)	D1	25.420	BEC
DISMINUIR LA TEMPERATURA DEL ACEITE CON UN MINIMO DELTA DE 10 GRADOS CENTIGRADOS	NO DISMINUIR LA TEMPERATURA DEL ACEITE	PERDIDA AISLAMIENTO O DAÑO DE RODAMIENTOS MOTOR VENTILADOR	SI	D0	D0	D2 (BAJO)	D1	27.320	PM
		SATURACION DEL SERPENTIN POR CONTAMINACION DEL ACEITE	SI	D1	D0	E2 (MEDIO)	D1	76.960	BEC - PM - PM

Función	Descripción Falla Funcional	Modo de Falla	ES EVIDENTE	R. Ambiental	R. Humano	R. Económico	R. Imagen	Valor del riesgo económico	TIPO DE DECISIÓN
		ROTURA DE SERPENTIN	SI	B1	B0	B2 (NULO)	B1	26.320	BEC - PM - PM
TRANSMITIR LA POTENCIA DE 1500 HP DEL MOTOR AL EJE DE LA CAMARA DE EMPUJE	NO TRANSMITE LA POTENCIA DEL MOTOR AL EJE DE LA CAMARA DE EMPUJE	ROTURA DE EJE POR FALTA DE LUBRICANTE	SI	E0	E0	E2 (MEDIO)	E1	124.000	MC - MC - PM
		DAÑOS EN ACOPLERES (LADO MOTOR Y LADO BOMBA)	SI	C0	C0	C2 (BAJO)	C2 (BAJO)	30.000	PM
		DAÑO DE RODAMIENTOS POR CONTAMINACION ACEITE	SI	E0	E0	E2 (MEDIO)	E2 (MEDIO)	27.000	BEC - MC - PM

Función	Descripción Falla Funcional	Modo de Falla	ES EVIDENTE	R. Ambiental	R. Humano	R. Económico	R. Imagen	Valor del riesgo económico	TIPO DE DECISIÓN
ABSORBER LAS CARGAS GENERADAS POR EL EMPUJE AXIAL DE LA BOMBA	NO ABSORBE LAS CARGAS GENERADAS POR EL EMPUJE AXIAL DE LA BOMBA	DAÑO DE RODAMIENTOS POR FATIGA DE MATERIAL	SI	E0	E0	E2 (MEDIO)	E1	27.500	MC
CONTENER EL FLUIDO DEL PROCESO	FUGA DEL FLUIDO DEL PROCESO	DAÑO EN SELLO PROCESO	SI	E1	E0	E2 (MEDIO)	E1	30.000	BEC – PM
	FUGA DE ACEITE	DAÑO EN SELLO LABERINTO	SI	E1	E0	E2 (MEDIO)	E1	25.500	BEC

Función	Descripción Falla Funcional	Modo de Falla	ES EVIDENTE	R. Ambiental	R. Humano	R. Económico	R. Imagen	Valor del riesgo económico	TIPO DE DECISIÓN
MONITOREAR LA TEMPERATURA DE LA CAMARA DE EMPUJE	PERDIDA PARCIAL DEL MONITOREO DE TEMPERATURA DE LA CAMARA DE EMPUJE	DESCALIBRACION	NO	E0	E0	E1 (BAJO)	E1 (BAJO)	2.083	PFO
	NO MONITOREA LA TEMPERATURA DE LA CAMARA DE EMPUJE	PERDIDA DE AISLAMIENTO CABLE	NO	E0	E0	C1 (NULO)	C1 (NULO)	3.500	PM
MONITOREAR LA VIBRACION DE LA CAMARA DE EMPUJE	PERDIDA PARCIAL DEL MONITOREO DE VIBRACIONES DE LA CAMARA DE EMPUJE	DESCALIBRACION	NO	E0	E0	E1 (BAJO)	E1 (BAJO)	2.083	PFO
		PERDIDA DE AISLAMIENTO CABLE	NO	E0	E0	C1 (NULO)	C1 (NULO)	3.500	PM

**ANEXO B. LISTADO DE TAREAS DE MANTENIMIENTO.**

Modo de Falla	TIPO DE DECISIÓN	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA (mes)	RECURSOS	COSTO BENEFICIO
ROTURA DE RODAMIENTOS POR DESGASTE MOTOR BOMBA LUBRICACION	MC	MEDICION DE VIBRACIONES Y TEMPERATURA	3M	TECNICOS DE VIBRACIONES	3,955121245
BAJO AISLAMIENTO DE BOBINAS MOTOR	PM	MEDICION DE AISLAMIENTO	6M	TECNICO ELECTRICISTA	4,059435364
PERDIDA AISLAMIENTO CABLE POTENCIA	RTF	RUN TO FAIL			0,575482912
DAÑO EN PROTECCIONES TERMICAS Y DE CORTO CIRCUITO	PM	CALIBRACION DE PROTECCIONES	6M	TECNICO ELECTRICISTA	2,8551263
CONTACTOS DE CONEXIONES FLOJOS	MC	ANALISIS DE TERMOGRAFIA	6M	TECNICO ELECTRICISTA	6,770833333

Modo de Falla	TIPO DE DECISIÓN	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA (mes)	RECURSOS	COSTO BENEFICIO
DAÑO DE BUJES O PIÑONES DE BOMBA LUBRICACION	MC	MEDICION DE VIBRACIONES Y TEMPERATURA	3M	TECNICO DE VIBRACIONES	2,17689243
DAÑO EN SELLOS O ORINGS	BEC	1.INSPECCION VISUAL DE FUGAS	SEMANAL	OPERADOR	3,254801536
PERDIDA AISLAMIENTO O DAÑO DE RODAMIENTOS MOTOR VENTILADOR	PM	MEDICION DE AISLAMIENTO	6M	TECNICO ELECTRICISTA	4,059435364
SATURACION DEL SERPENTIN POR CONTAMINACION DEL ACEITE	BEC - PM - PM	1. VERIFICACION DE FUGAS DE ACEITE. 2. LIMPIEZA RADIADOR 3. REEMPLAZO DEL ENFRIADOR	SEMANAL - ANUAL - 3 AÑOS	OPERADOR - TECNICOS MECANICOS	2,623636364

Modo de Falla	TIPO DE DECISIÓN	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA (mes)	RECURSOS	COSTO BENEFICIO
ROTURA DE SERPENTIN	BEC - PM - PM	1. INSPECCION SEMANAL. 2. LIMPIEZA RADIADOR 3. REEMPLAZO DEL ENFRIADOR	SEMANAL - ANUAL - 3 AÑOS	OPERADOR - TECNICOS MECANICOS	3,205846 529
ROTURA DE EJE POR FALTA DE LUBRICANTE	MC - MC - PM	1, ANALISIS DE VIBRACIONES Y TEMPERATURA 2. ANALISIS DE ACEITES 3. CAMBIO DE ACEITE	3M - 3M - 6M	TECNICO DE VIBRACIONES 2. CONTRATO DE FABRICANTE 3. TECNICO MECANICO	4,070912 672
DAÑOS EN ACOPLS (LADO MOTOR Y LADO BOMBA)	PM	RUTINA DE INSPECCION	3M	TECNICO MECANICO	11,71875
DAÑO DE RODAMIENTOS POR CONTAMINACION ACEITE	BEC - MC - PM	1. INSPECCION VISUAL ACEITE Y FILTRO DE HUMEDAD. 2. ANALISIS TRIBOLOGIA ACEITE 3. CAMBIO DE ACEITE	SEMANAL - 3M - 6M	OPERADOR - CONTRATO DE FABRICANTE ACEITE - TECNICOS MECANICOS	6,243576 567

Modo de Falla	TIPO DE DECISIÓN	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA (mes)	RECURSOS	COSTO BENEFICIO
DAÑO DE RODAMIENTOS POR FATIGA DE MATERIAL	MC	ANALISIS DE VIBRACIONES Y TEMPERATURA	3M	TECNICO DE VIBRACIONES	28,64583333
DAÑO EN SELLO PROCESO	BEC - PM	1. INSPECCION VSUAL FUGAS 2. LIMPIEZA PLAN 11 API	SEMANAL - 3M	OPERADOR - TECNICOS MECANICOS	18,72399445
DAÑO EN SELLO LABERINTO	BEC	INSPECCION VISUAL FUGAS	SEMANAL	OPERADOR	6,129807692

Modo de Falla	TIPO DE DECISIÓN	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA (mes)	RECURSOS	COSTO BENEFICIO
DESCALIBRACION	PFO	1. CALIBRACION DE PROTECCIONES	6M	TECNICO INSTRUMENTISTA	1,717032967
PERDIDA DE AISLAMIENTO CABLE	PM	RUN TO FAIL			0,841346154
DESCALIBRACION	PFO	1. CALIBRACION DE PROTECCIONES	6M	TECNICO INSTRUMENTISTA	1,717032967
PERDIDA DE AISLAMIENTO CABLE	PM	RUN TO FAIL			0,841346154