

DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA GERENCIAL DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO PARA COMPRESORES RECIPROCANTES DE HIDRÓGENO DE  
LA REFINERIA DE BARRANCABERMEJA

OSCAR URIEL SUAREZ GARCIA  
ESTEBAN ALBERTO GONZALEZ PACHECO

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

2011

DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA GERENCIAL DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO PARA COMPRESORES RECIPROCANTES DE HIDRÓGENO DE  
LA REFINERIA DE BARRANCABERMEJA.

OSCAR URIEL SUAREZ GARCIA  
ESTEBAN ALBERTO GONZALEZ PACHECO

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

Director: Andrea del Pilar Vergara Agamez  
Ingeniero Mecánico

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

2011

## **AGRADECIMIENTOS**

Durante esta especialización expreso mis agradecimientos a:

ECOPETROL S.A., y sus directivos por el apoyo incondicional durante el desarrollo del programa siempre atentos alcanzar mis metas y desarrollo profesional y personal.

La Universidad Industrial de Santander y sus docentes, por el conocimiento brindado incondicional, su apoyo en las dudas y mejoramiento continuo para ECOPETROL S.A., y el país.

A mi mamá y mi hermana por la motivación día a día por mi desarrollo, y a mi tía Stella por su cariño y comprensión.

A la Ingeniera Dayan Paola Bohórquez Alfonso por su apoyo en el desarrollo de actividades del programa, fuente de motivación de un gran logro en la vida.

OSCAR URIEL SUAREZ GARCIA

## **AGRADECIMIENTOS**

Durante esta especialización expreso mis agradecimientos a:

A dios que me fortalece.

A mi hijo, Esteban Andres que es el regalo más preciado que he recibido.

A mi esposa que ha sido fuente de inspiración para ser mejor cada día.

A mis padres que con su apoyo me han ayudado a sacar este proyecto adelante.

A ECOPETROL S.A., y sus directivos por el apoyo brindado durante la especialización para alcanzar mi desarrollo profesional y personal.

A la Universidad Industrial de Santander y sus docentes, por la transferencia de conocimiento a través de las diferentes asignaturas.

ESTEBAN ALBERTO GONZALEZ PACHECO

## **CONTENIDO**

<b>INTRODUCCION</b>	<b>15</b>
<b>1. COMPRESORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO</b>	<b>17</b>
1.1 Estructura de los compresores de desplazamiento positivo	18
1.2 Clasificación de los compresores	19
1.3 Compresores recíprocos para manejo de hidrógeno	20
<b>2. MANTENIMIENTO PREDICTIVO</b>	<b>20</b>
<b>3. TECNICAS APLICADAS AL MANTENIMIENTO PREDICTIVO</b>	<b>22</b>
3.1 Monitoreo de la unidad recíproca	25
3.2 Análisis de variables definición causa raíz	27
3.3 Detección de fallas tempranas	30
3.4 Monitoreo desgaste de partes	33
3.5 Análisis de datos de proceso	36
3.6 Monitoreo sistema de lubricación	37
3.7 Sistema de optimización del desempeño	39
3.8 Sistema de seguimiento planificación del mantenimiento	41
<b>4. INDICADORES DE MANTENIMIENTO</b>	<b>43</b>
<b>5. DEFINICIONES DE TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS</b>	<b>44</b>
<b>6. CONFIABILIDAD</b>	<b>45</b>
<b>7. TASA DE FALLA</b>	<b>46</b>
<b>8. DISPONIBILIDAD</b>	<b>47</b>
<b>9. MANTENIBILIDAD</b>	<b>49</b>
<b>10. RUTINAS Y PROGRAMAS ACTUALES DE MANTENIMIENTO</b>	<b>51</b>

<b>10.1</b>	<b>Mantenimiento Diario</b>	<b>51</b>
<b>10.2</b>	<b>Mantenimiento Mensual</b>	<b>53</b>
<b>10.3</b>	<b>Mantenimiento Semestral 4.000 horas</b>	<b>53</b>
<b>10.4</b>	<b>Mantenimiento Annual 8.000 horas</b>	<b>54</b>
<b>10.5</b>	<b>Mantenimiento Cada 2 años 16.000 Horas</b>	<b>55</b>
<b>10.6</b>	<b>Mantenimiento Cada 4 años 32.000 Horas</b>	<b>55</b>
<b>10.7</b>	<b>Mantenimiento cada 6 años 48.000 Horas</b>	<b>56</b>
<b>11.</b>	<b>ANALISIS DE LA ESTRATEGIA ACTUAL</b>	<b>56</b>
<b>11.1</b>	<b>Mantenimiento general o de cada 3 años</b>	<b>60</b>
<b>11.2</b>	<b>Mantenimiento general anual</b>	<b>61</b>
<b>11.3</b>	<b>Mantenimiento preventivo cada 4000 horas</b>	<b>63</b>
<b>12.</b>	<b>GESTION DE MANTENIMIENTO</b>	<b>66</b>
<b>13.</b>	<b>DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>68</b>
<b>14.</b>	<b>CALCULOS DE INDICADORES CMD</b>	<b>68</b>
<b>15.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLA</b>	<b>70</b>
<b>16.</b>	<b>ANALISIS DE COSTOS</b>	<b>72</b>
<b>17.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>76</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>80</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Vista general de la refinería de Barrancabermeja GRB .....	16
Figura 2 Elementos de un compresor recíprocante. ....	19
Figura 3 Ciclo de vida de un activo .....	23
Figura 4 Probabilidades de falla de un activo .....	24
Figura 5 Elementos de un compresor recíprocante .....	26
Figura 6 Datos históricos después de eventos .....	28
Figura 7 Análisis de pico a pico .....	29
Figura 8 Línea de tendencia de los valores RMS .....	31
Figura 9 Vibración del cilindro.....	32
Figura 10 Desarrollo del desgaste de los anillos de pistón .....	34
Figura 11 Rata de desgaste de anillos de compresión .....	35
Figura 12 Variable de procesos .....	36
Figura 13. Tendencia de los índices de flujo.....	37
Figura 14 Señales de vibración medidas y curvas de carga del vástago.....	40
Figura 15 Diagrama p-V.....	40
Figura 16 Captura de pantalla del registro de componentes .....	42
Figura 17 Mantenimiento por condición .....	57
Figura 18 Costo promedio anual de compresores .....	59
Figura 19 Costos estrategia TBT .....	60
Figura 20 Distribución de recursos mantenimiento cada 3 años .....	61
Figura 21 Distribución de recursos HH preventivo anual .....	62
Figura 22 Distribución recurso HH preventivo semestral .....	63
Figura 23 Costo de la estrategia .....	65
Figura 24 Diagrama de la planeación de una OT .....	67
Figura 25 Eventos por modo de falla .....	72
Figura 26 Proyección de la estrategia de TBT .....	73
Figura 27 Análisis Incremental.....	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Distribución de tiempos de operación de un activo .....	45
Tabla 2 Recurso programado mantenimiento cada 3 años .....	61
Tabla 3 Recurso programado mantenimiento preventivo anual .....	62
Tabla 4 Recurso programado mantenimiento preventivo semestral .....	63
Tabla 5 Indicadores de Confiabilidad .....	69
Tabla 6 Indicadores de Mantenibilidad .....	69
Tabla 7 Costo proyectado 2020 .....	74

## LISTA DE ANEXOS

Anexos 1 Tareas basadas en la condición metalista .....	80
Anexos 2 Tareas basadas en la condición electricidad .....	80
Anexos 3 RUN TO FAILURE RTF .....	81
Anexos 4 Tareas del operador .....	82

## RESUMEN

### TÍTULO:

DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA GERENCIAL DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA COMPRESORES RECIPROCANTES DE HIDRÓGENO DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA\*

### AUTOR:

OSCAR URIEL SUAREZ GARCIA\*

ESTEBAN ALBERTO GONZALEZ PACHECO\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Compresor recíprocante, normas API, normas ISO, rutina, programación, confiabilidad, mantenimiento predictivo.

### DESCRIPCIÓN:

La globalización del mercado, estrictas normas de calidad y presión competitiva han obligado a las empresas a la generación de estrategias de optimización de costos por mantenimiento. Estos cambios suponen pasar de ser un departamento que realiza reparaciones y cambia piezas o máquinas completas, a una unidad con un alto valor en la productividad total de la empresa, mediante la aplicación de nuevas técnicas y prácticas. En la situación actual es imprescindible, tanto en las grandes como en las medianas empresas, la implantación de una estrategia de mantenimiento predictivo para aumentar la vida de sus componentes, mejorando así la disponibilidad de sus equipos y su confiabilidad.

El documento diseña la estrategia para realizar una estrategia encaminada a optimizar los costos de reparaciones por mantenimiento preventivo a mantenimiento predictivo en compresores recíprocentes, de tal forma que se permita dar un mayor uso a las partes de los compresores de hidrógeno de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja. Con el conocimiento de la condición de cada equipo podemos hacer "el mantenimiento adecuado en el momento adecuado" anticipándonos a los problemas.

El documento lleva al lector a conocer las herramientas disponibles en el mercado para el mantenimiento predictivo en compresores recíprocentes, bajo la óptica de las condiciones de diseño de los fabricantes, analizando variables en componentes críticos bajo una operación confiable del activo.

De esta forma se plantea de acuerdo al estado actual de los equipos y las normas internacionales, cual es la mejor forma de optimizar la estrategia de mantenimiento que la empresa actualmente tiene definida para estos equipos, el planteamiento es basado en diferentes enfoques, la seguridad de las personas, seguridad de procesos, costos, imagen y medio ambiente.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Andrea del Pilar Vergara Agamez.

## SUMARY

### **TÍTULO:**

DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE MAINTENANCE MANAGEMENT STRATEGY FOR HYDROGEN reciprocating compressors at the Barrancabermeja refinery.

### **AUTOR:**

OSCAR URIEL SUAREZ GARCIA\*  
ESTEBAN ALBERTO GONZALEZ PACHECO\*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

Reliability centered maintenance (RCM), Steam turbine, Standard API, Standard ISO, maintenance task, reliability.

### **DESCRIPTION:**

In a global framework demanding marked by the competition for the best yields at lower cost, within the overall vision of the companies they begins to be evaluated in greater detail the maintenance process, because this is intended largely to the budgets. This is where the maintenance engineers should been focusing their efforts in the search for new trends and strategies to maximize revenues of the company.

In this monograph is designed the strategy to make the best maintenance in general purpose turbines of the crude oil refining department in the Barrancabermeja´s refinery of Ecopetrol S.A.

This monograph takes the reader trough an analysis of the type of turbines since the international standards view like API and ISO. But the analysis is not only from the standards but also it takes a count the historical maintenance data from the equipment to interpret by means of reliability centered analysis which are the critical components and to define the best strategy to assurance a continuous an reliable operation of the assets, by the implementation of task done by the people that interact with the maintenance of the asset, like operators, mechanics and engineers.

Thus arises according the actual condition of the assets which is the best way to improve the maintenance strategy that the company already has, the approach is based in different points of view, the people safety, the process safety, cost, company image and environment

---

\* Monograph

\*\* Faculty of Physics and Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization, Director: Ing. Andrea del Pilar Vergara Agamez.

## **INTRODUCCION**

Ecopetrol S.A. es una Sociedad de Economía Mixta, de carácter comercial, organizada bajo la forma de sociedad anónima, del orden nacional, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, es la empresa más grande del país y la principal compañía petrolera en Colombia. Por su tamaño, Ecopetrol S.A. pertenece al grupo de las 35 petroleras más grandes del mundo y es una de las cuatro principales de Latinoamérica.

Propietario mayoritario de la infraestructura de transporte y refinación del país, posee el mayor conocimiento geológico de las diferentes cuencas, cuenta con una respetada política de buena vecindad entre las comunidades donde se realizan actividades de exploración y producción de hidrocarburos, reconocido por la gestión ambiental y, tanto en el upstream como en el downstream, ha establecido negocios con las más importantes petroleras del mundo.

Cuenta con campos de extracción de hidrocarburos en el centro, el sur, el oriente y el norte de Colombia, dos refinerías, puertos para exportación e importación de combustibles y crudos en ambas costas y una red de transporte de 8.124 kilómetros de oleoductos y poliductos a lo largo de toda la geografía nacional, que intercomunican los sistemas de producción con los grandes centros de consumo y los terminales marítimos.

Tiene a disposición de los socios el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), considerado el más completo centro de investigación y laboratorio científico de su género en el país, donde reposa el acervo geológico de un siglo de historia petrolera de Colombia.

Desde 1997 ha marcado récords al obtener las más altas utilidades de una compañía colombiana en toda la historia. En 2003 se convirtió en una sociedad pública por acciones y emprendió una transformación que garantiza mayor

autonomía financiera y competitividad dentro de la nueva organización del sector de hidrocarburos de Colombia, con la posibilidad de establecer alianzas comerciales fuera del país.

En 2007, Ecopetrol consolidó grandes transformaciones. Por un lado renovó su marca y asumió a una iguana verde como su nuevo logo símbolo. Por el otro, desarrolló el proceso de capitalización más grande de Colombia con el que vinculó a cerca de 450 mil colombianos de todos los niveles y regiones del país como accionistas.

Para garantizar la transparencia de las operaciones y fluidez e integridad en la información, ha adoptado un código de Buen Gobierno. Gracias a sus fortalezas y competencias, Ecopetrol S.A. es líder en Colombia y el socio preferido para explorar y producir hidrocarburos.

**Figura 1 Vista general de la refinería de Barrancabermeja GRB**



Fuente: De los autores

Se encuentra dividida en dos vicepresidencias, upstream, se encarga de administrar los recursos derivados de la exploración y producción, llamada vicepresidencia del y la otra se encarga de administrar los recursos derivados del

transporte, la refinación y la comercialización de los derivados del petróleo llamada vicepresidencia del downstream.

Dentro de la vicepresidencia de downstream se encuentra la vicepresidencia de refinación que se encarga de refinar el crudo que llega a las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja.

La vicepresidencia de refinación está dividida en dos gerencias; la gerencia refinería de Cartagena GRC y la gerencia refinería de Barrancabermeja GRB.

La Gerencia Refinería de Barrancabermeja tiene 42 plantas de proceso, 5 de las cuales son las encargadas de recibir el crudo y realizar la destilación donde se obtienen los derivados primarios del crudo procesado.

Dentro de las 42 plantas de proceso, se encuentra el departamento de Parafinas y fenoles, planta donde se lleva a cabo la producción de ceras y bases lubricantes, y lugar donde se lleva a cabo la hidrogena los productos para la eliminación de impurezas.

## **1. COMPRESORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO**

Un compresor es una máquina que eleva la presión de un gas, un vapor o una mezcla de gases y vapores. La presión del fluido se eleva reduciendo el volumen específico del mismo durante su paso a través del compresor. Comparados con turbo soplantes y ventiladores centrífugos o de circulación axial, en cuanto a la presión de salida, los compresores se clasifican generalmente como máquinas de alta presión, mientras que los ventiladores y soplantes se consideran de baja presión.

Los compresores se emplean para aumentar la presión de una gran variedad de gases y vapores para un gran número de aplicaciones. Un caso común es el compresor de aire, que suministra aire a elevada presión para transporte, pintura pistola, inflamiento de neumáticos, limpieza, herramientas neumáticas y perforadoras. Otro es el compresor de refrigeración, empleado para comprimir el gas del vaporizador. Otras aplicaciones abarcan procesos químicos, conducción de gases, turbinas de gas y construcción.

### **1.1 Estructura de los compresores de desplazamiento positivo**

La transmisión de energía en un compresores recíprocante se consigue mediante un cigüeñal el cual se aloja en un Carter y recibe la energía de un equipo motriz para transmitirlo a las bielas y luego a los pistones los cuales se mueven de forma lineal a través de los cilindros.

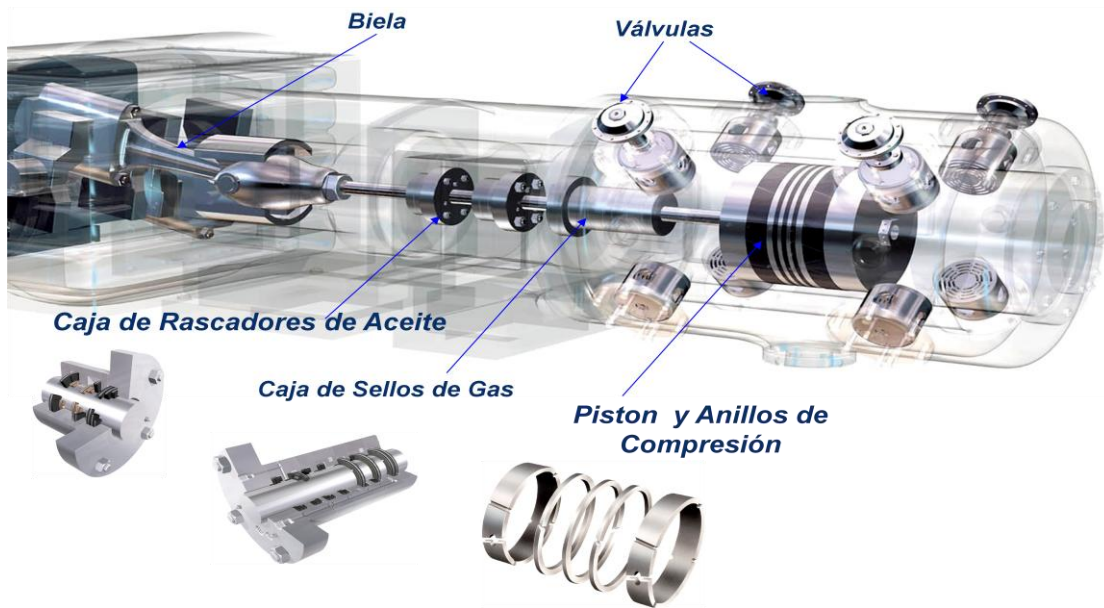
Los compresores tienen unos componentes importantes como lo son sellos de gas, las válvulas y rascadores de aceite.

Los sellos de gas minimizan hasta valores tolerables la fuga de gas hacia el exterior mediante un juego de anillos y sellos estáticos O ring.

Las válvulas de succión y descarga permiten la entrada y salida de gas de acuerdo a la presión interna que se logra en el cilindro. Los rascadores de aceite permiten que el aceite que se encuentre en el Carter del compresor no se pierda hacia la pieza distanciadora del compresor.

En la siguiente figura se observa un cilindro de un compresor recíprocante donde se muestran la biela, el pistón, las válvulas, los rascadores de aceite, los sellos de gas, y el pistón con sus anillos de compresión.

**Figura 2 Elementos de un compresor reciprocante.**



Fuente: <http://www.hoerbiger.com/Control-systems.10845.0.html>

## 1.2 Clasificación de los compresores

Al clasificarse según el indicio constructivo los compresores volumétricos se subdividen en los de émbolo y de motor y los de paletas en centrífugos y axiales. Es posible la división de los compresores en grupos de acuerdo con el género de gas que se desplaza, del tipo de transmisión y de la destinación del compresor. Estos al igual que las bombas mencionadas anteriormente pueden clasificarse en dos grupos:

- Compresores de desplazamiento positivo
- Compresores de desplazamiento no positivo

### **1.3 Compresores recíprocos para manejo de hidrógeno**

Los compresores recíprocos para el manejo del hidrógeno en las refinerías de petróleo se utilizan con el fin de hidrogenar corrientes de productos tales como gasolina, keroseno, diesel, e intermedios tales como gasóleo; Un hidrotratamiento utiliza el hidrógeno para saturar los compuestos aromáticos y las olefinas así como para quitar compuestos indeseables de elementos tales como sulfuro y nitrógeno con el fin de disminuirles el grado de impurezas de las mismas y lograr productos más limpios.

Los elementos importantes comunes de una unidad hidrotradora son un calentador, un reactor catalítico de lecho fijo y un compresor de hidrógeno. Para nuestro estudio se escogió los compresores de hidrógeno de la Gerencia de la refinería de Barranca debido a la criticidad al ser sistemas de gran impacto económico cuando fallan o se ve disminuida su disponibilidad por causa de mantenimientos o reparaciones generales "Overhaul". Al utilizar como fluido de proceso el hidrógeno estos compresores requieren especial atención a cualquier pérdida de contención que se presente al ambiente debido a las altas presiones que manejan y a que producen fuego o explosión debido a que el hidrógeno es extremadamente inflamable en presencia de aire.

## **2. MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

El mantenimiento predictivo es una técnica con la cual se pronostica el punto futuro de falla de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle.

De esta forma el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza. Se trata de conseguir adelantarse a la falla o al

momento en que el equipo ó elemento deja de trabajar en sus condiciones óptimas. Para conseguir esto se utilizan herramientas y técnicas de monitorización de parámetros físicos y requiriendo personal cualificado para el análisis de la información.

El mantenimiento predictivo empieza su andadura durante los años 60 por medio de técnicas de verificación mecánica a través del análisis de vibraciones y ruidos. Sin dudas, el desarrollo de nuevas tecnologías ha marcado sensiblemente la actualidad industrial mundial. En los últimos años, la industria mecánica se ha visto bajo la influencia determinante de la electrónica, la automática y las telecomunicaciones, exigiendo mayor preparación en el personal, no sólo desde el punto de vista de la operación de la maquinaria, sino desde el punto de vista del mantenimiento industrial.

La realidad industrial, matizada por la enorme necesidad de explotar eficaz y eficientemente la maquinaria instalada y elevar a niveles superiores la actividad del mantenimiento. No remediamos nada con grandes soluciones que presuponen diseños, innovaciones y tecnologías de recuperación si no conseguimos con ello una alta disponibilidad de nuestra industria.

La Industria tiene que distinguirse por una correcta explotación y un mantenimiento eficaz. En otras palabras, la operación correcta y el mantenimiento oportuno constituyen vías decisivas para cuidar lo que se tiene.

### **Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo**

#### **Ventajas:**

- La intervención en el equipo o cambio de un elemento se minimiza.
- Nos obliga a dominar el proceso y a tener unos datos técnicos, que nos comprometerá con un método científico de trabajo riguroso y objetivo.

- Reduce los tiempos de parada.
- los operadores y personal de mantenimiento pueden tener mayor tiempo para establecer metas y resolver los problemas antes que puedan causar daños serios y presentar situaciones potencialmente peligrosas.

**Desventajas:**

- Se requiere de personal entrenado en la tecnología empleada
- Se requiere una inversión inicial alta en equipos en el inicio de la implementación.

**3. TECNICAS APLICADAS AL MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

Detectar problemas tempranamente en los componentes y parámetros críticos de los compresores, como:

- Válvulas.
- Anillos de soporte.
- Anillos de pistones.
- Empaques.
- Bielas.
- Conexiones de crucetas de cabezales y pistones.
- Sistemas de control de capacidad.
- Parámetros de procesos los operadores y personal de mantenimiento pueden tener tiempo suficiente para establecer metas y resolver los problemas antes que puedan causar daños serios y presentar situaciones potencialmente peligrosas.

Permite monitorear continuamente todos los componentes críticos de un compresor, y tiene las siguientes ventajas decisivas sobre un compresor que se opera sin monitoreo continuo:

- Mayor confiabilidad.
- Mayor seguridad.
- Reducción de costos operativos.
- Mejora de la productividad.
- Toma de decisiones eficientes.

### Ventajas de la monitorización

- Aumenta el tiempo útil de la maquinaria a pesar de la inversión constante en mantenimiento a través de la utilización optimizada de la vida útil de los componentes para ampliar el tiempo medio entre cada mantenimiento.

**Figura 3 Ciclo de vida de un activo**



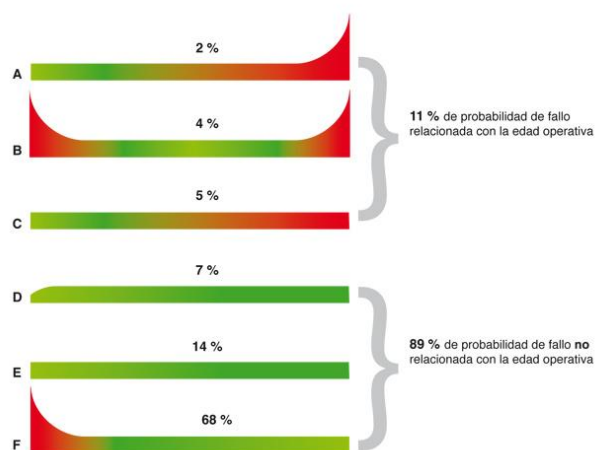
Fuente: MORA GUTIERREZ, Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios. 2009.

Esta ilustración se basa en la suposición de que la mayoría de artículos o componentes funcionan con fiabilidad durante un período “X” y luego se deterioran. El pensamiento clásico sugiere que los amplios registros sobre fallos nos permitirán determinar esta “vida útil” y así confeccionar planes para tomar medidas preventivas a corto plazo antes de que el componente vaya a fallar en el futuro.

Este modelo es cierto para determinados tipos de equipos sencillos (p. ej., arandelas de desplazamiento) y para algunos artículos más complejos con modos dominantes de fallo.

En particular, las características de desgaste suelen aparecer donde el equipo entra en contacto directo con el producto. Los fallos asociados a la edad también suelen relacionarse con la fatiga, la corrosión, la abrasión y la evaporación. El período de “mortalidad infantil” al comienzo de la vida útil de los artículos suele deberse sobre todo a errores humanos durante las rutinas de arranque inicial o la instalación del artículo.

**Figura 4 Probabilidades de falla de un activo**



Fuente: MORA GUTIERREZ, Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios. 2009.

11% de probabilidad de fallo relacionada con la edad operativa. 89% de probabilidad de fallo no relacionada con la edad operativa

La llamada “3ª generación” de examen de fallos reveló que nada menos que seis patrones de fallo se dan realmente en la práctica. Una de las conclusiones más importantes que se derivan de esta investigación es una mejor comprensión de que, aunque se pueden llevar a cabo tal como estaba previsto, las tareas de mantenimiento más tradicionales no logran nada, e incluso algunas son contraproducentes. Esto es cierto especialmente para muchas tareas realizadas como mantenimiento preventivo.

La ilustración muestra que la mayoría de componentes no fallan debido a la edad. Este descubrimiento es esencial para los responsables del mantenimiento y/o el funcionamiento de maquinaria compleja: otra razón de peso a favor de la supervisión de las máquinas.

### **3.1 Monitoreo de la unidad recíprocante**

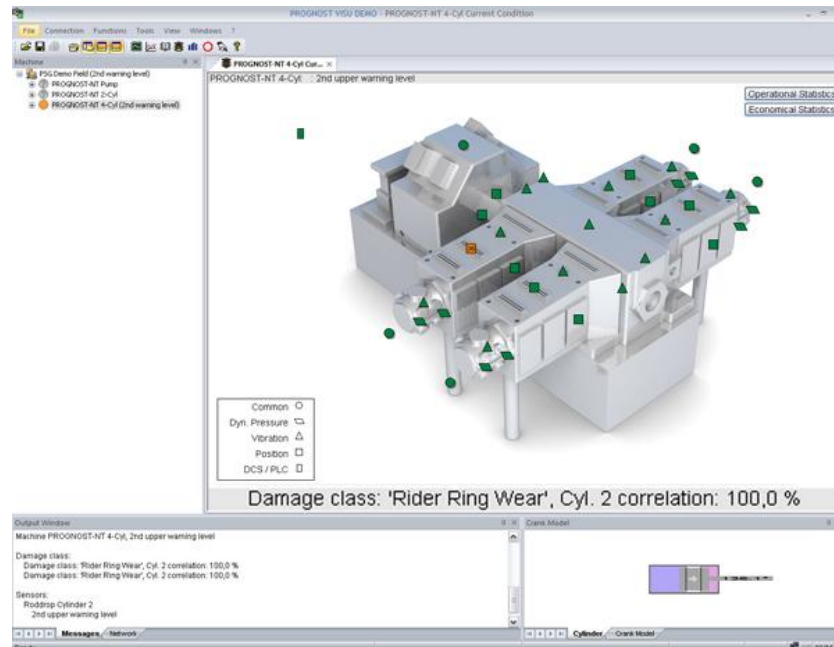
Analiza, compila y almacena todos los datos que se procesan. Dispone de una base de datos de patrón de daños para la generación automática de mensajes de diagnóstico, con lo que se clasifican los errores que se producen. Un libro de registro integrado facilita una visión general de todos los eventos y mensajes detectados por el sistema.

La adquisición de los datos del sensor de campo tiene lugar de forma directa en el área de riesgo o en el equipo de supervisión. Si se instala la unidad base en el área de riesgo, los costes de cableado se reducen drásticamente. Con hasta 68 canales, (para un máximo de ocho máquinas), la unidad de adquisición de datos está diseñada para supervisar de manera eficaz varias líneas de compresores.

Todos los datos adquiridos por el sensor se utilizan sincronizadamente para la gestión del rendimiento de activos y la protección de la máquina. Gracias a diversos análisis de señales, la gestión de rendimiento de activos ofrece diagnósticos inteligentes y exclusivos de los patrones reales de errores. Estos patrones están sincronizados con una base de datos integrada de diagnósticos basada en la experiencia que permite la transmisión de mensajes de texto de diagnóstico con información detallada (clase y probabilidad del daño) relacionada con el daño detectado.

En el caso de daños, el sistema de informes y notificaciones de la unidad base transmite seguidamente un mensaje de texto de diagnóstico. Inmediatamente, se informa a los grupos o al personal pertinente por correo electrónico, fax, buscapersonas, SMS, etc. Asimismo, todos los mensajes y alarmas se graban en un libro de registros que proporciona una grabación detallada de todas las advertencias, alarmas y acciones del usuario.

**Figura 5 Elementos de un compresor recíprocente**



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/base-unit.php>

La base de datos del historial integrada guarda todas las señales en línea una vez al día. Asimismo, el resultado de todos los análisis se guarda como valores de tendencia de 60 segundos durante un periodo de 12 meses antes de que los datos se compriman en valores medios de 1 hora. Estos están disponibles durante toda la vida útil de la máquina.

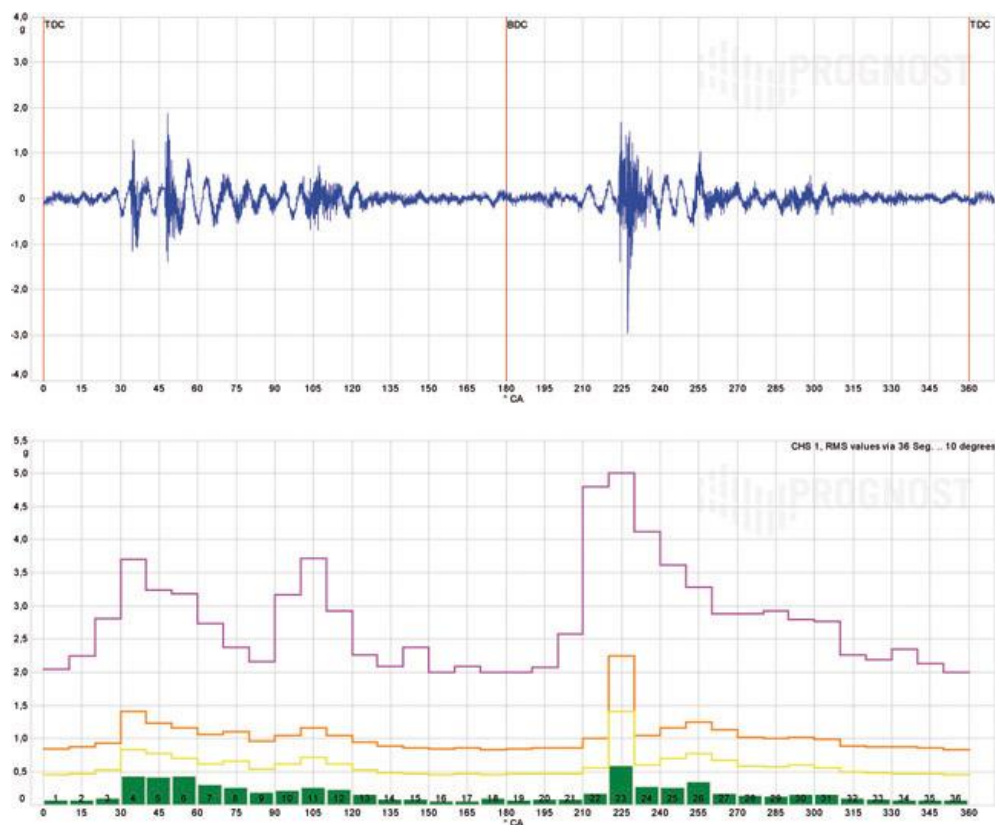
## **VENTAJAS**

- La base de datos de patrón de daños basada en la experiencia ofrece identificación fiable de la falla del componente.
- El intercambio de nuevos patrones de daños en el grupo de usuarios de optimiza la base de datos con nuevos indicadores reales de daños.
- Los claros mensajes de texto con información de diagnóstico detallada informan a todas las personas o grupos pertinentes.
- La transmisión automática de alarmas mediante todos los canales de comunicación establecidos como correo electrónico, SMS o fax.
- El libro de registros detallado con indicación horaria de todas las alarmas, advertencias y acciones del usuario ofrece información detallada sobre el historial del estado de la máquina.

### **3.2 Análisis de variables definición causa raíz**

Este módulo muestra señales en línea, datos históricos que proporcionan respuestas a todas las preguntas que aparecen después de eventos pertinentes de seguridad.

**Figura 6 Datos históricos después de eventos**



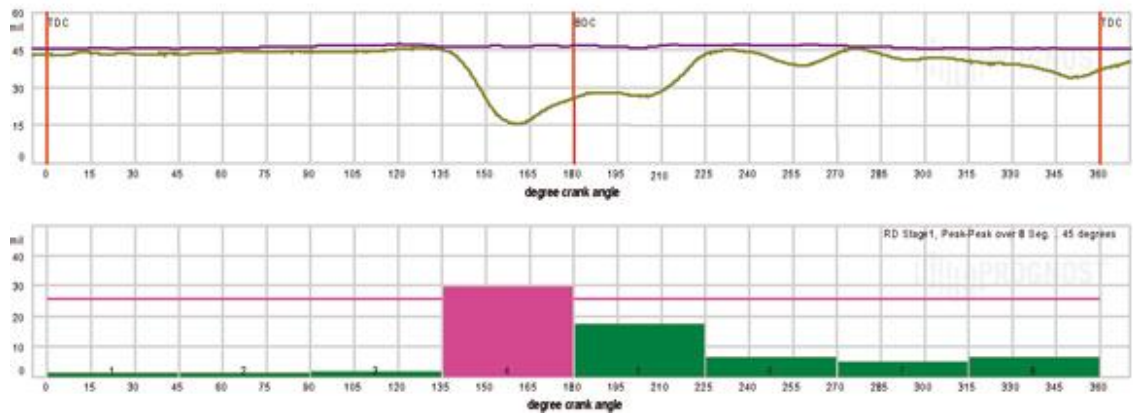
Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/base-unit.php>

Izquierda: señal de vibración en línea para una revolución del cigüeñal. Debajo: posición del vástago segmentada con el límite de seguridad ajustable individualmente por segmento.

El hardware de protección de seguridad fiable es sólo una parte de la historia. Las respuestas a "por qué" se ha producido un incidente de seguridad es el siguiente paso. El módulo comprueba y guarda datos de tendencias y en línea para ofrecer toda la información necesaria para el análisis preciso de la causa raíz. Una herramienta de memoria de anillo ofrece la posibilidad de análisis posteriores. Un lapso de tiempo de siete minutos antes y tres minutos después de la alarma de

seguridad permite evaluar de cerca todas las señales en línea grabadas de todos los sensores dinámicos y los valores de procesos en el sistema.

**Figura 7 Análisis de pico a pico**



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/safety-analyses.php>

Las señales de desplazamiento que proporcionan la posición del vástago se dividen en 8 segmentos, cada uno con un ángulo de 45° para cada revolución, a fin de detectar posibles situaciones mecánicas críticas del vástago. La ilustración muestra dos señales de posición del vástago: violeta = posición normal, ("buen estado") y verde = gran desplazamiento cercano al punto muerto inferior (BDC, por sus siglas en inglés), debido a remanente líquido en el interior de la cámara de compresión.

## VENTAJAS

- La herramienta de memoria de anillo integrada para los análisis detallados de la causa raíz
- De este modo se ofrece información de diagnóstico distintiva (marcha/paro), local (cilindro) y funcional (componente) para identificar claramente la falla .

- Visualización de los análisis de protección de seguridad realizados por el hardware, ej.: señales en línea y tendencias - violaciones del límite de seguridad de los análisis de señales de vibración segmentada.

### **3.3 Detección de fallas tempranas**

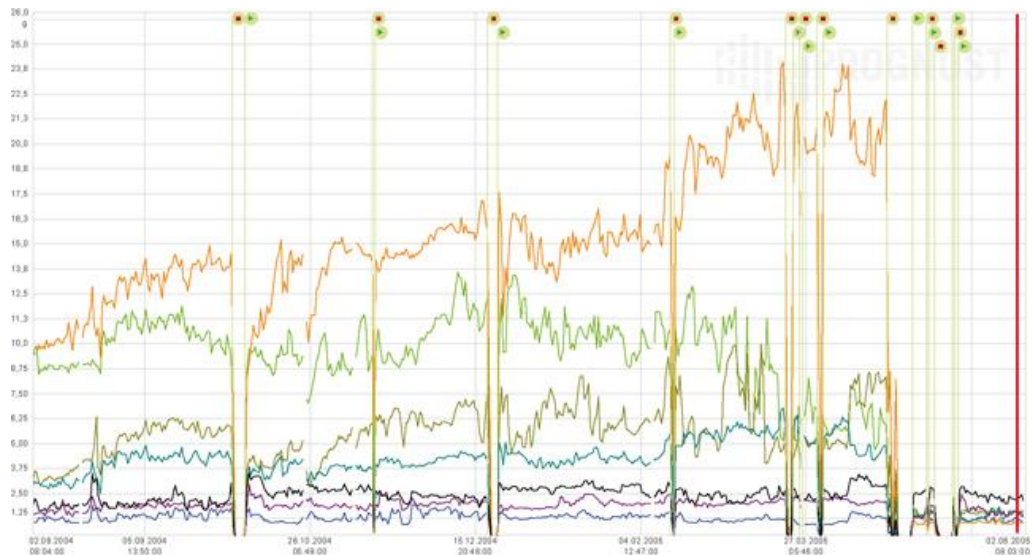
La detección temprana de los (daños) en desarrollo es una preocupación principal para los operadores de maquinaria. El módulo mantiene informados a los operarios sobre el estado real de la maquinaria.

La correlación general respecto a la relación entre las horas de funcionamiento de los componentes y la probabilidad de fallas no siempre es verdadera. Las encuestas del sector revelan que se producen diferentes "patrones" de errores en la maquinaria compleja; sin embargo, la mayoría de éstos no dependen del tiempo de funcionamiento de los componentes. Las piezas de la maquinaria fallarán, tarde o temprano. No obstante, la idea de que los componentes recién instalados o las revisiones regulares evitarán los errores no siempre es viable.

De acuerdo con este importante conocimiento, la detección temprana de fallas es importante para toda la maquinaria de procesos críticos.

La detección temprana de fallas en desarrollo permite la intervención proactiva antes de que se puedan producir averías graves y reduce los apagados de maquinaria no planificados.

**Figura 8 Línea de tendencia de los valores RMS**



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/early-failure-detection.php>

Los indicadores verdes indican los arranques y paradas de la máquina. Esta gráfica de vibración informa al operario sobre los errores en desarrollo en las partes en movimiento del compresor.

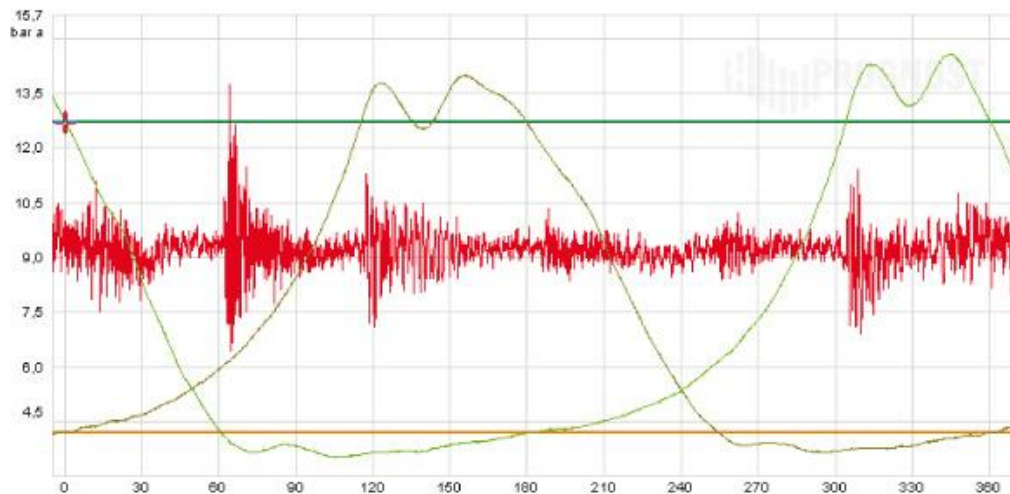
El módulo ofrece la máxima fiabilidad en la detección de daños. Esta fiabilidad se basa en la adquisición de señales de vibración de alta frecuencia seguida de rutinas de análisis probadas en el campo. El concepto de segmentación permite una detección precisa de los errores de todas las válvulas y componentes de trabajo de movimiento.

Este concepto divide la señal en línea en 36 segmentos, cada una con un ángulo de  $10^{\circ}$  del cigüeñal. La ventaja para el cliente es que se pueden supervisar varios componentes con un sensor, por ejemplo el sensor de vibración en el cilindro supervisa el funcionamiento de las válvulas de succión y descarga. Esto lleva a un conjunto de umbrales que se optimiza para el

comportamiento de funcionamiento individual de la máquina y, en consecuencia, para la detección temprana y fiable de errores.

Las diferentes condiciones de funcionamiento o pasos de carga provocan, con frecuencia, cambios dinámicos del comportamiento de la máquina. Mientras otros sistemas aplican normalmente sólo un conjunto de niveles de advertencia en todas las condiciones de funcionamiento, los sistemas de monitoreo reconocen estos cambios de carga y aplica distintos conjuntos de niveles para cada condición diferente.

**Figura 9 Vibración del cilindro**



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/early-failure-detection.php>

Esta característica de producto incomparable ofrece la capacidad extremadamente eficaz de detección temprana de fallas.

## **VENTAJAS**

- La capacidad de evitar daños costosos mediante la identificación de defectos mecánicos en una fase temprana.
- Información en lugar de datos: mensajes de texto claros con precisión funcional y local.
- Identificación definitiva de daños basada en la comparación de una base de datos de patrón de daños derivada de manera empírica.
- Determinación de un valor de condición de máquina general.
- Supervisión con umbral adaptable según la condición de operación de la máquina, por ejemplo para pasos de carga parciales.

### **3.4 Monitoreo desgaste de partes**

Ciertos componentes de compresores de pistones están sujetos a un gran desgaste. La supervisión permanente puede ayudar a detectar los daños y generar actividades de mantenimiento antes de la falla de la maquinaria. El módulo es la herramienta fiable para la toma de decisiones.

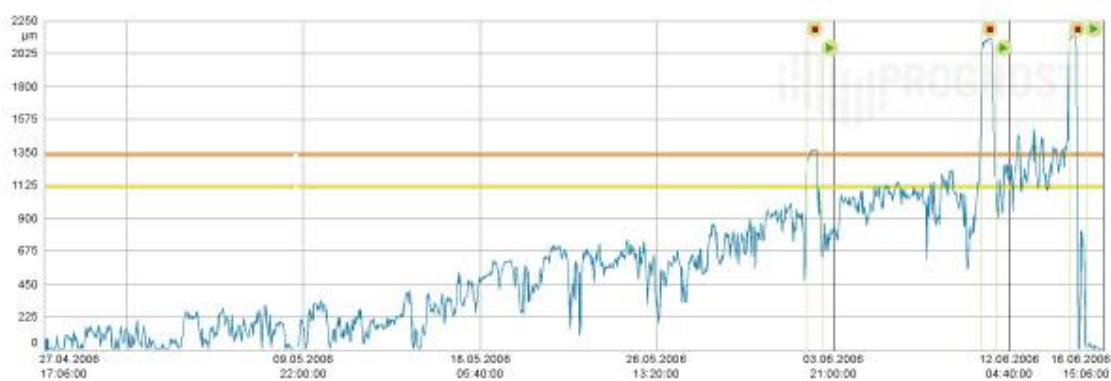
El sistema de monitoreo de partes de desgaste proporciona continuas líneas de tendencia de desgaste mecánico de componentes vitales en la maquinaria reciprocante. Se vuelve reconocible el desarrollo de desgaste normal a daños amenazantes. Se avisa al operario de violaciones del umbral y, por ello, los daños por desgaste se hacen predecibles y evitables. El conocimiento del estado de las piezas que se desgastan permite la adopción de una estrategia de mantenimiento de predicción eficaz.

En consecuencia, la programación de las revisiones se puede basar en el estado real de los componentes y no en las horas de funcionamiento o los días de calendario. Como resultado, el número de paradas de las máquinas se reducirá, así como el número de componentes sustituidos, porque los componentes pueden

utilizarse más allá de su posible desgaste bajo la concepción de mantenimiento preventivo. El apagado de las máquinas para llevar a cabo inspecciones manuales periódicas puede evitarse si se dispone de manera continua de un medio preciso para cuantificar la cantidad remanente del anillo rider o de desgaste.

Esta rutina permite al usuario concentrarse en sus tareas diarias y satisfacer las cuotas de producción.

**Figura 10 Desarrollo del desgaste de los anillos de pistón**



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/wear-monitoring.php>

Después de la violación del segundo umbral de advertencia (naranja), la banda de desgaste gastada se ha sustituido; los datos de la derecha de la figura 10 muestran el comportamiento normal restablecido de las nuevas bandas de desgaste.

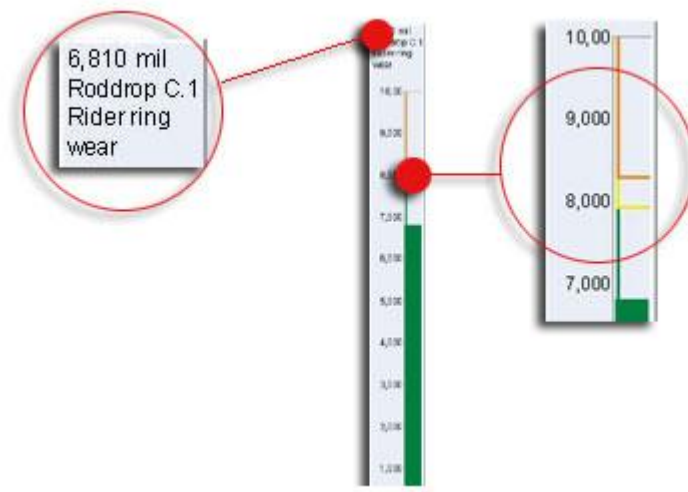
El módulo detecta los modos de falla claves que provocan costosos periodos de inactividad de las máquinas no planificados.

Con el fin de disponer de una imagen completa del desarrollo del desgaste, se supervisan los indicadores siguientes:

Valores de desgaste para anillos de desgaste y de pistón (posiciones del vástago/émbolo).

El concepto también se aplica a los datos de vibración del vástago que se pueden usar para detectar tanto el material líquido como el sólido en la cámara de compresión.

**Figura 11 Rata de desgaste de anillos de compresión**



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/wear-monitoring.php>

## VENTAJAS

- Visualización cuantificada del desarrollo del desgaste.
- Se admite y se rebaja la planificación precisa de las actividades de mantenimiento.
- Reducción de las paradas de las máquinas y sustituciones de componentes.
- Umbrales de advertencia con alarmas de violación

### 3.5 Análisis de datos de proceso

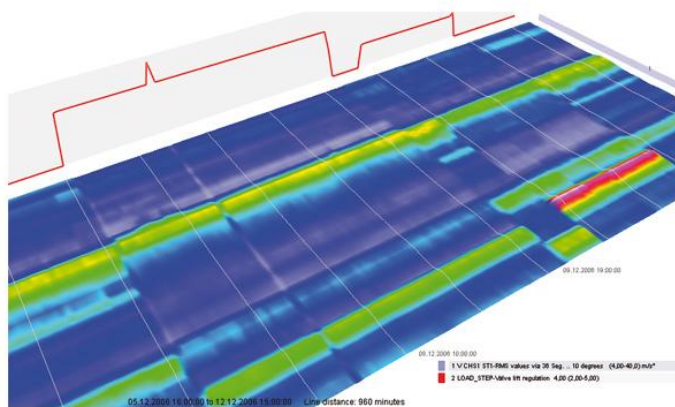
Hoy en día, la constante interacción de los sistemas de control de procesos y los sistemas de supervisión resulta fundamental para la supervisión centralizada de las máquinas y la gestión eficaz de los datos.

La supervisión y el control (recorrido) de los compresores de pistones mediante dos sistemas independientes precisan un intercambio de datos continuo para asegurar el funcionamiento fiable de la maquinaria.

El módulo de análisis de datos de procesos establece una comunicación directa entre el DCS y el sistema. Por ejemplo, si el DCS ha cambiado las condiciones de funcionamiento del compresor, como la velocidad de las revoluciones, las presiones de las etapas etc., estos cambios se sincronizarán con el sistema para evitar falsas advertencias. Este intercambio de información se lleva a cabo con interfaces estándar como Modbus RTU, OPC o Profibus.

El módulo también ofrece la posibilidad de mostrar datos de DCS como tendencias en gráficas, además de comparar continuamente estas tendencias con los valores del umbral de advertencia.

**Figura 12 Variable de procesos**



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/process-data-analyses.php>

Esta línea muestra una variable de procesos (regulación de la elevación del paso de carga) como una línea roja y los valores RMS de vibración resultante en un diagrama 3D, como lo muestra la figura 12.

## VENTAJAS

- Comunicación sin interrupciones mediante el uso de interfaces estándar para el intercambio de datos de DCS / SISTEMA (es decir, OPC, Modbus).
- Visualización y supervisión del umbral de valores de DCS definidos como tendencias.
- Definición de las condiciones de funcionamiento con los parámetros de DCS que evitan las falsas advertencias

### 3.6 Monitoreo sistema de lubricación

El módulo para la supervisión continua y fiable y el análisis de los índices de flujo de lubricantes.

**Figura 13. Tendencia de los índices de flujo**



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/base-unit.php>

La figura 13 muestra Mientras que el cilindro "1" (verde) recibe una lubricación óptima, el cilindro "2" (azul) está lubricado en exceso.

Los métodos convencionales para evaluar las cantidades de lubricante incluyen la supervisión de la presión del aceite como referencia o el "flujo de lubricante" mediante el recuento del número de gotas. Los inconvenientes de estos métodos son obvios, ya que las pérdidas o las obstrucciones de líneas no se pueden detectar de forma automática. Un problema que surge con frecuencia es el bloqueo de las líneas de aceite de lubricación, con la contrapresión resultante distribuida de manera uniforme en los demás ductos de aceite. Esto sólo provoca un ligero aumento de la presión en el circuito general de recirculación de aceite, lo que no suele ser suficiente para generar una alarma.

El resultado es que la máquina puede funcionar durante periodos prolongados con poca o sin ninguna lubricación en los componentes móviles.

Para esta aplicación se puede equipar cualquier cantidad de líneas de lubricación con los sensores de supervisión de lubricación para supervisar el índice de flujo, ajustado a los requisitos de los clientes. La mejor ubicación de estos sensores es cerca de los inyectores para obtener información sobre las cantidades de lubricación inyectadas. El índice de flujo de cada uno de los puntos de lubricación se supervisa mediante análisis de tendencias y los cambios se hacen visibles muy temprano.

Se pueden identificar las obstrucciones o las fugas antes de que provoquen un error en los componentes, con lo que se ayuda a impedir daños costosos y evitables en la maquinaria.

## VENTAJAS

- Medición continuada del volumen del lubricante, de acuerdo con el índice de flujo.
- Alarmas en el caso de una lubricación excesiva o defectuosa.
- Análisis de tendencias a largo y corto plazo de puntos de medición individuales.
- Supervisión y acceso remotos.
- Sensores de medición pasiva, utilizables en áreas de riesgo

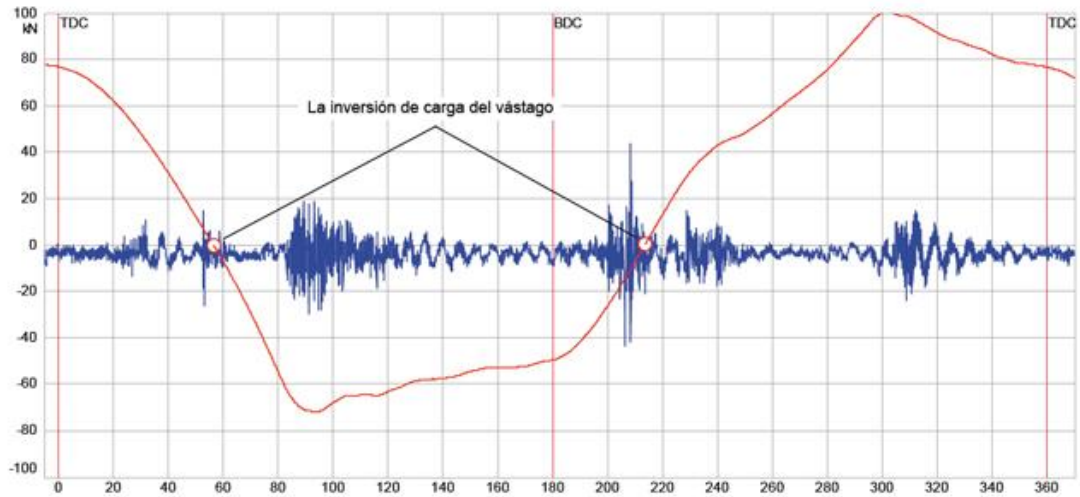
### 3.7 Sistema de optimización del desempeño

Una pérdida en la eficacia puede pasar con frecuencia desapercibida para los métodos de supervisión ordinarios. El sistema comprueba continuamente la eficacia de las máquinas recíprocas y ofrece análisis exhaustivos para restaurar la eficacia y aumentar la productividad.

La eficiencia de una máquina recíproca se define por su consumo de energía (del motor) y la potencia de compresión utilizable (flujo de descarga en la presión necesaria). La presión dinámica se muestra normalmente en un diagrama de presión ( $p$ ) y volumen ( $V$ ). Si la presión dinámica cambia durante el funcionamiento de la máquina, el análisis  $p$ - $V$  especializado puede detectar qué componentes han causado la reducción de la eficacia.

El análisis conseguirá una eficiencia óptima restablecida de la máquina supervisada, por ejemplo mediante el intercambio o la sustitución de componentes específicos.

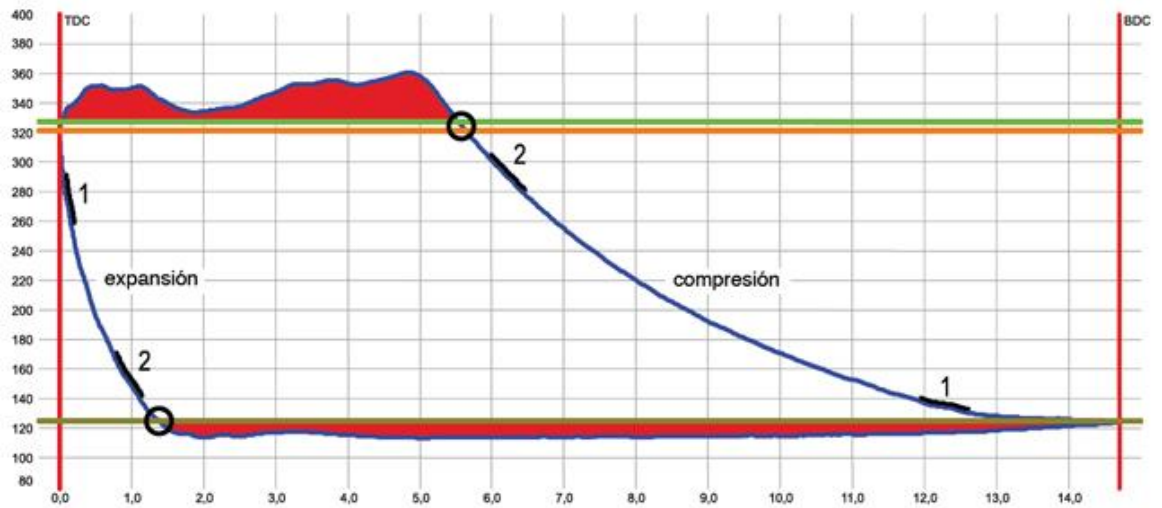
**Figura 14** Señales de vibración medidas y curvas de carga del vástago



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/performance-optimization.php>

La combinación de señales de vibración medidas y curvas de carga del vástago dinámicas y calculadas en el módulo de optimización de rendimiento asegura que se puedan identificar los componentes defectuosos.

**Figura 15** Diagrama p-V



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/performance-optimization.php>

Las áreas coloreadas muestran la pérdida de succión (abajo) y la pérdida de descarga (arriba). Este diagrama también muestra los exponentes politrópicos (expansión/compresión) que ayudan a detectar las fugas de componentes de sellado como válvulas, empaquetaduras y anillos de pistón en fases tempranas.

Aparte de los análisis de diagramas p-V, los valores clave adicionales, se calculan, supervisan y guardan en un libro de registros. Esto incluye análisis del ciclo de compresión, la carga de la barra y la inversión de la carga del vástago. Los análisis de estos datos proporcionan a los operarios y al personal de mantenimiento toda la información que sea necesaria para un funcionamiento optimizado de la maquinaria recíproca.

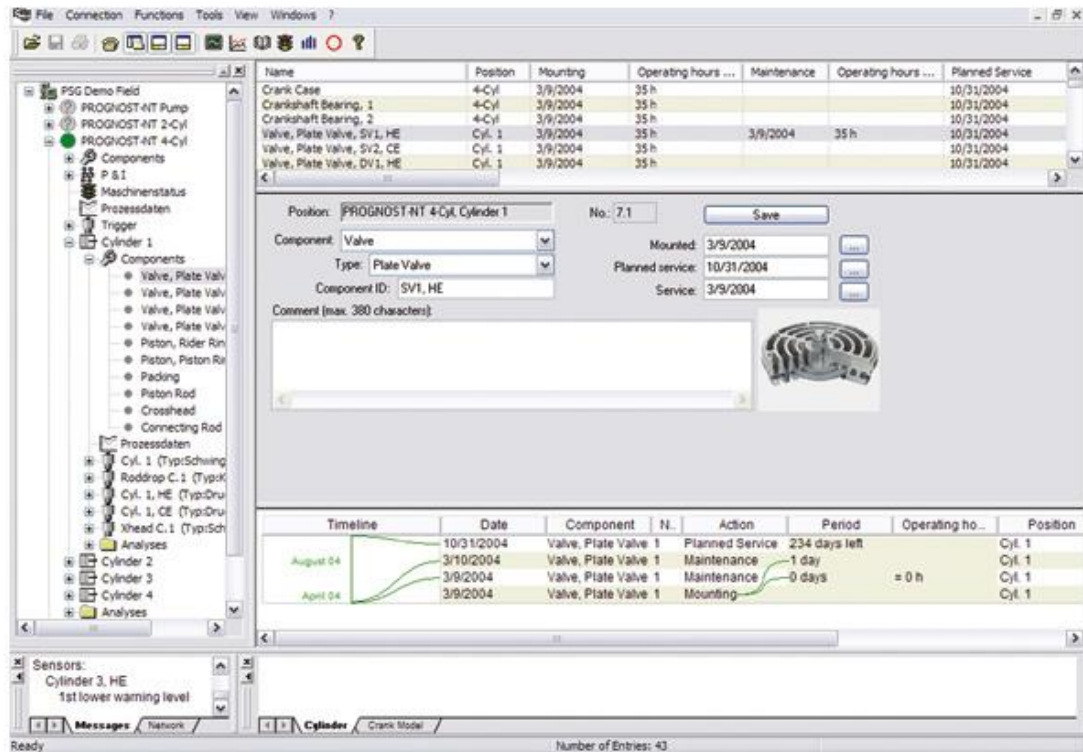
## **VENTAJAS**

- Mejora de la eficacia operativa y reducción en el consumo de energía.
- Aumento de la productividad mediante el funcionamiento optimizado de la maquinaria.
- Advertencia temprana de los daños inminentes mediante el cambio de los valores de las características

### **3.8 Sistema de seguimiento planificación del mantenimiento**

Crea una estrategia de mantenimiento de predicción con una herramienta eficaz para la planificación y el seguimiento de las actividades de mantenimiento a lo largo de la vida útil de los componentes en tiempo real.

**Figura 16 Captura de pantalla del registro de componentes**



Fuente: <http://www.prognost.com/es/products/nt/component-tracking.php>

Las estrategias de mantenimiento son esenciales pero costosas. Un análisis de demanda detallado y la planificación subsiguiente son la base vital para reducir los costos de almacenaje de las piezas de recambio, las horas de trabajo en mantenimiento y la sustitución de componentes sin defectos.

El módulo es ajustado a la medida para el personal de mantenimiento de maquinaria reciprocante. Sencillamente, los usuarios reciben toda la información necesaria para una estrategia de mantenimiento eficaz: tiempo de ejecución de cada uno de los componentes (basado en el tiempo de ejecución de la máquina real, no en la fecha de instalación) y una cronología que refleje todas las actividades de mantenimiento ejecutadas y planificadas para el futuro.

Asimismo, se pueden configurar las fechas previstas para la sustitución de las piezas desgastadas.

La grabación de los tiempos de ejecución de los componentes (supervisión del ciclo de vida) permite la identificación del ciclo de vida más largo y más corto del componente para la máquina supervisada.

En conexión con los módulos de gestión de rendimiento de activos de, hay disponible una evaluación de los cambios en la eficacia o el desgaste de cada uno de los componentes.

## **VENTAJAS**

- Planificación basada en la demanda y seguimiento de todas las actividades de mantenimiento.
- Registro de las horas de ejecución en tiempo real de los componentes para llevar a cabo una comparación directa de la vida útil de las piezas de recambio.
- Ahorro de recursos mediante la gestión eficaz de las existencias y actividades centradas en el mantenimiento de las máquinas.
- Evaluación de la mejora de la eficacia y rendimiento de desgaste respecto a los resultados de los módulos de gestión del rendimiento de activos.

## **4. INDICADORES DE MANTENIMIENTO**

Los indicadores básicos de mantenimiento son cuatro, mantenibilidad, disponibilidad, confiabilidad y costo. Los tres primeros ligados entre sí por ser indicadores netamente técnicos basados en tiempos de operación y tiempos de no disponibilidad de los activos evaluados en horas. El costo es un indicador administrativo de cuánto cuesta el servicio de ejecutar el mantenimiento requerido por los activos de la empresa, ya sea costo interno si lo realiza directamente la

organización o costo de contratar el servicio si se realiza a través de una firma especializada de mantenimiento.

Los indicadores técnicos de mantenimiento dependen de los tiempos que la organización cuenta con el activo para producir, la definición de cada uno de ellos es variada desde el punto de vista del autor sin alejarse del núcleo de la definición que realiza la norma ISO 14224<sup>1</sup>, que se describe a continuación.

## 5. DEFINICIONES DE TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS

Los tiempos en un activo se dividen en dos grandes grupos, tiempos en servicio y tiempos fuera de servicio, ver tabla 1, las siguientes son definiciones desarrolladas a raíz del estudio de estos tiempos.

- **Tiempo medio fuera de servicio (MDT):** Tiempo medio en el que el ítem está en estado fuera de servicio. Es una característica extrínseca del mantenimiento, pues tiene en cuenta las demoras administrativas.
- **Tiempo medio entre fallas (MTBF) (TMEF):** Tiempo medio entre dos fallas consecutivas.
- **Tiempo disponible para operar (UT):** Tiempo en que el equipo está disponible para operar
- **Tiempo no disponible para operar (DT):** Tiempo en que el equipo no está disponible para operar
- **Tiempo medio en disponible (MUT):** Tiempo medio del equipo disponible para operar.

---

<sup>1</sup> ISO, ISO/DIS 14224, 1ª edición, Octubre 2004

- **Tiempo medio para presentarse una falla de un ítem (MTTF):** Este parámetro concierne solo a la primera falla de un ítem nuevo antes de ejecutar cualquier tarea de mantenimiento.
- **Tiempo medio para reparar un ítem (MTTR):** Tiempo medio hasta que el ítem es reparado.
- **Tiempo medio entre mantenimientos (MTBM) (TMEM):** Tiempo medio entre dos mantenimientos consecutivos.

**Tabla 1 Distribución de tiempos de operación de un activo**

Tiempo Total													
Tiempo fuera de servicio					Tiempo en servicio								
Mantenimiento preventivo		Otros mantenimientos planeados			Mantenimiento correctivo		Otros mantenimientos no planeados		Tiempos de operación			Tiempo de no operación	
Preparaciones y demoras	Mantenimiento preventivo activo (Trabajando sobre el ítem)	Reserva	Stand by en frío	Modificación	Preparación y/o demora	Mantenimiento correctivo activo (Ítem sobre el que se trabaja)	Disparos operacionales, problemas, restricciones, ETC.		Apagadas	Arranques	operación	Stand by en caliente	En espera a ser puesto en servicio

Fuente: De los autores

## 6. CONFIABILIDAD

Es la probabilidad que tener un activo operando, cumpliendo una función específica, bajo unas condiciones requeridas en un tiempo determinado.

La definición normalizada por ISO es: la habilidad de un ítem de desempeñar una función requerida bajo unas condiciones dadas durante un intervalo de tiempo. (ISO 14224, 2004, 16)

El análisis de los datos usados para confiabilidad es amplio, entre ellos está la optimización de los tiempos de overhaul e inspección, en los procedimientos de mantenimiento, el costeo del ciclo de vida, reducción de las fallas catastróficas y de los impactos ambientales, permite realizar un mejor benchmarking y aumenta la disponibilidad de los equipos en planta. (ISO 14224, 2004, 21)

El gerenciamiento de la confiabilidad es el proceso de administrar los intervalos entre fallas, la confiabilidad puede ser asumida como una medición de la frecuencia de los tiempos fuera de servicio. (Reliability Handbook, 1999, 5)

La confiabilidad depende del número de fallas del activo en un tiempo determinado, por lo tanto es basada en una tasa de falla del componente que se mide.

## **7. TASA DE FALLA**

Es un promedio de la frecuencia de falla (ISO 14224, 2004, 177). Se define como el inverso del tiempo medio de falla de un componente.

---

Donde:

Cuando la tasa de falla se evalúa en función del tiempo se convierte en la probabilidad de que el ítem falle entre  $t$  y  $t+dt$  con el ítem operando durante este periodo de tiempo. Por lo tanto define la distribución del periodo de vida del componente. Se convierte en una distribución estadística del tiempo en presentarse la primera falla. Esta distribución se convierte en la probabilidad que un componente sobreviva un periodo de tiempo  $t$  generando así la ecuación de no confiabilidad - la cual es la probabilidad de que un componente falle antes de cumplir un periodo de tiempo  $t$ .

Por lo tanto la ecuación de confiabilidad se define como:

Donde:

## **8. DISPONIBILIDAD**

Porcentaje o tiempo en el que el sistema está útil disponible para cumplir su función. El tiempo que está fuera de servicio debe contemplar toda la paralización por mantenimiento preventivo o correctivo desde el momento en que queda fuera de servicio hasta que se vuelve a entregar operativo a producción.

Según la norma de confiabilidad: Es la probabilidad que un activo opere en un instante determinado. (ISO 14224, 2004, 174)

Esta definición puede mal interpretarse y creer que es igual a la de confiabilidad, sin embargo, se debe tener en cuenta que la confiabilidad se mide en un periodo de tiempo, mientras que la disponibilidad se mide en un instante determinado.

Medición de los tiempos en servicio de un activo. (Reliability Handbook, 1999, 5)

---

Para analizar disponibilidad se utilizan dos tipos de disponibilidad media:

La disponibilidad operacional tiene en cuenta los tiempos medios de operación y de fuera de servicio.

---

Donde;

La disponibilidad intrínseca tiene en cuenta los tiempos medios de fallas y el tiempo medio para reparar el activo.

---

Donde;

Las dos disponibilidades tienen diferentes intereses, dependiendo de lo que se quiere medir.

La disponibilidad operacional le interesa a los ingenieros de confiabilidad por que suma todos los tiempos que el activo estuvo fuera de servicio, como demoras por entrega de repuestos, demoras por consecución de personal, demoras por programación de recursos, etc. Demoras que son administrativas que generalmente ocurren en una organización, el ingeniero de confiabilidad analiza lo que realmente ve la planta.

La disponibilidad intrínseca le interesa a los ingenieros de mantenimiento pues pueden medir la efectividad del trabajo de sus mecánicos, debido que esta no tiene en cuenta las demoras administrativas, sino el tiempo del mecánico reparando la máquina con todos los recursos disponibles para la ejecución del mantenimiento. El ingeniero de mantenimiento analiza la efectividad y habilidad del recurso de mantenimiento.

## **9. MANTENIBILIDAD**

Es la probabilidad de reparar un activo en un tiempo determinado.

La definición normalizada por ISO es: la habilidad bajo unas condiciones dadas, de un ítem de ser mantenido o restaurado en un periodo de tiempo a una condición en la que puede cumplir su función, cuando el mantenimiento es realizado bajo unas condiciones descritas, bajo procedimientos y formas estándar. (ISO 14224, 2004, 181)

Existen dos tipos de mantenibilidad, la intrínseca y la extrínseca.

La mantenibilidad intrínseca considera únicamente las características de diseño propias del activo para ser reparado.

La mantenibilidad extrínseca considera todo lo que es dependiente del contexto que interviene en la reparación de un equipo, como la logística, el soporte, la ubicación y la organización de la empresa.

Similar al concepto de confiabilidad existe una versión probabilística de mantenibilidad. La cual puede ser expresada de la siguiente forma:

Su resultado es una función creciente que varía de 0 a 1 en un intervalo de tiempo, lo que quiere decir que un ítem será reparado en un tiempo si esperamos lo suficiente.

Tasa de reparación : Es una medida de confiabilidad de la tasa de peligrosidad, la cual evalúa la probabilidad de que un ítem sea reparado en un tiempo determinado luego de fallar. Su estimación es dada por la formula:

\_\_\_\_\_

Cuando se ha determinado la constante de la tasa de reparación se obtiene la ecuación de mantenibilidad exponencial.

- - )

## **10. RUTINAS Y PROGRAMAS ACTUALES DE MANTENIMIENTO**

Al igual que cualquier equipo, los compresores requieren mantenimiento. La frecuencia del mantenimiento está determinada por el ambiente donde se encuentra el compresor, las cargas impuestas por el usuario y la pureza del gas.

Lo primero y más importante en la lista de mantenimiento preventivo son la conformidad con el Estándar y el cumplimiento de la Lista de Verificación de Puesta en Marcha del Compresor. Se deberán cumplir todos los ítems, tanto antes como después de la puesta en marcha.

Los intervalos comienzan a contarse a partir de la fecha de puesta en marcha del equipo. Si su proveedor de aceite recomienda cambios de aceite más frecuentes, se deberán seguir los intervalos del proveedor.

Se recomienda la realización de análisis de aceite regulares. Si surge algún problema, se debe cambiar inmediatamente el aceite, determinar la causa y corregirla. Se debe mantener un libro de registros para cada equipo. Cada ítem de mantenimiento se debe registrar en detalle, con el objetivo de que haya registros disponibles para la realización del seguimiento del costo de mantenimiento por equipo y también para la resolución de problemas.

Los registros del operador deben ser analizados por personal calificado, para que se determinen tendencias en el desempeño y/ o mantenimiento del compresor.

### **10.1 Mantenimiento Diario**

1. Verifique la presión del aceite del bastidor. Debe variar entre 50 y 60 PSIG (350 a 420 kPa) mientras está a temperatura de operación. La temperatura máxima de entrada de aceite al compresor es 190° F (88° C).

2. Verifique el nivel de aceite del bastidor. El aceite debe estar aproximadamente a la mitad del visor de nivel mientras el compresor está en marcha. Si no lo está, determine el problema y corríjalo. No lo sobrellene.
3. Verifique si hay suficiente suministro de aceite en el tanque de soporte. Verifique el indicador de tiempo de ciclo del bloque lubricador. Consulte el tiempo correcto en la placa de información ubicada en la parte superior de la caja del lubricador. Un gas muy sucio o húmedo puede requerir un tiempo de ciclo más frecuente que lo normal.
4. Verifique si hay fugas en los venteos de la empaquetadura principal y secundaria. Si hay fugas, determine la causa y, caso sea necesario, reemplace las partes internas de la empaquetadura.
5. Verifique si hay alguna fuga de gas y corríjala.
6. Verifique si hay alguna pérdida de aceite y corríjala.
7. Verifique las presiones y temperaturas de operación. Si no son normales, determine la causa de la anomalía. Se recomienda la realización de un registro diario de las temperaturas y presiones de operación como referencia.
8. Verifique los ajustes de los interruptores de paradas.
9. El valor mínimo de parada debido a baja presión de aceite es 35 psi (240 kPa).
10. La parada debido a alta temperatura debe estar ajustada 25° F (14° C) por arriba de la temperatura real de operación.
11. Las paradas debido a alta/ baja presión se deben ajustar lo más cerca posible. Se debe considerar la capacidad de carga del vástago del equipo.
12. Verifique el nivel de aceite en la caja del lubricador.
13. Verifique si hay ruidos o vibraciones anormales.
14. Si se usan válvulas compensadoras en el sistema de lubricación forzada, reajústelas según sea necesario para que la presión de cada sistema de bomba se mantenga equilibrada.

## **10.2 Mantenimiento Mensual**

1. Verifique y confirme el funcionamiento de los interruptores de las paradas de seguridad.
2. En los cilindros con presión nominal por arriba de 3.500 psi (24.000 kPa), quite sus cabezales y verifique la presencia de aceite en el cilindro, para garantizar que haya lubricación adecuada.

## **10.3 Mantenimiento Semestral 4.000 horas (Además del Diario/Mensual)**

1. Drene y reemplace el aceite de la caja del lubricador.
2. Cambie el filtro de aceite en este momento, o cuando el diferencial de presión exceda 10 psi (70 kPa).
3. Cambie el aceite. Puede que cambios de aceite más frecuentes sean necesarios si el ambiente es extremadamente sucio, si el proveedor de aceite lo recomienda, o si el análisis de aceite lo determina. Se pueden permitir cambios de aceite menos frecuentes si se completa regularmente el aceite debido al uso del conjunto lubricación forzada.
4. Limpie el elemento sinterizado del pequeño filtro de aceite suministrado en el sistema de lubricación forzada. Tal filtro también se debe limpiar cada vez que se cambia el filtro de aceite principal.
5. Limpie el filtro Y cuando cambie el aceite.
6. Abra el bastidor cuando cambie el aceite e inspeccione visualmente si hay materiales extraños. No se recomienda el desmontaje, salvo si se identifica algún motivo.
7. Vuelva a ajustar las tuercas de los espárragos de anclaje con el valor de torque correcto e inspeccione si hay alguna pata floja. Una diferencia superior a 0,002" (0.05 mm) requiere la colocación de nuevos suplementos. En tal

caso, realinee en caso de que sea necesario para mantener la alineación del acoplamiento con tolerancia de 0,005" (0,13 mm) LTI.

8. En los cilindros con presión nominal por arriba de 3.500 psi (24.000 kPa), inspeccione la luz entre puntas de los aros de pistón y la luz entre puntas y la proyección radial de la banda de desgaste, si la hay. Reemplace los aros de pistón y bandas de desgaste que no cumplan con los límites máximos.

#### **10.4 Mantenimiento Annual 8.000 horas**

1. Verifique el huelgo de los cojinetes principales, el huelgo de los cojinetes de la biela y el huelgo axial del cigüeñal, utilizando una barreta y un indicador de cuadrante reemplace los cojinetes afectados.
2. Verifique el huelgo de la guía de la cruceta con láminas calibradoras. Si no cumple con los límites, reemplace las partes afectadas.
3. Inspeccione si hay discos rotos o pernos centrales flojos en las válvulas. Reemplace las partes rotas y ajuste los pernos centrales con los valores de torque indicados.
4. Inspeccione si las áreas alesadas de los cilindros están dañadas o desgastadas. Si hay estrías, de manera que el área total de su sección transversal supera 0,001 pulg<sup>2</sup>/pulg de circunferencia del cilindro (0,025 mm<sup>2</sup>/mm de circunferencia del cilindro), se debe reemplazar o rectificar el cilindro a un máximo de 0,020" (0,50 mm). También se lo debe reemplazar o rectificar si la ovalización o conicidad del cilindro supera 0,001 pulg/pulg de su diámetro (0,001 m/m del diámetro del cilindro).
5. Inspeccione la luz entre puntas de los aros de pistón. Reemplace los aros que no cumplan con los límites máximos.
6. Inspeccione si los vástagos de los pistones están dañados o excesivamente desgastados. Reemplace el vástago si hay estrías o rayaduras. También reemplácelo si el desgaste supera 0,005" (0,13 mm), si la ovalización supera 0,001" (0,03 mm), o si la conicidad supera 0,002" (0,05 mm).

7. Reacondicione las cajas de empaquetadura de los cilindros.
8. Inspeccione si hay torsiones o flexiones en el bastidor, verificando los suplementos en las patas del compresor.
9. Realinee en caso de que sea necesario para mantener la alineación del acoplamiento con tolerancia de 0,005" (0,13 mm) LTI.
10. Verifique y recalibre todos los indicadores de temperatura y manómetros.
11. Verifique y registre el desgaste del vástago del compresor.
12. Engrase las roscas del eje del VVCP a través del niple, con 2 ó 3 bombeadas de grasa multiuso, utilizando un lubricador manual.
13. Limpie el filtro del respiradero del cárter.
14. Ajuste las cadenas de transmisión.
15. Haga la prueba de presión del bloque o bloques de distribución de lubricación forzada.

#### **10.5 Mantenimiento Cada 2 años 16.000 Horas**

1. Verifique si hay fisuras en los dientes del piñón de la cadena de transmisión del extremo auxiliar y si la cadena está excesivamente elongada.
2. Reacondicione las cajas de los aros raspa-aceite.

#### **10.6 Mantenimiento Cada 4 años 32.000 Horas**

1. Verifique los huelgos de los cojinetes principales y de la biela, utilizando un indicador de cuadrante y una barreta. No se recomienda el desmontaje para la verificación de los huelgos. El desmontaje se debe realizar solamente si la verificación con la barreta indica huelgo excesivo.
2. Verifique con láminas calibradoras los huelgos de las guías de crucetas.
3. Verifique el huelgo entre el pasador de la cruceta y su alojamiento en la cruceta y el buje de la biela, quitando el pasador de la cruceta.

4. Verifique si hay desgaste excesivo en el tensor de la cadena de transmisión del extremo auxiliar.
5. Verifique si hay desgaste excesivo en las ranuras de aros de pistones.

#### **10.7 Mantenimiento cada 6 años 48.000 Horas (Además del Diario/Mensual/Semestral/Anual/Bienal/Cuatrienal)**

1. Reemplace los cojinetes principales y de la biela y los bujes.
2. Reemplace los bloques de distribución del lubricador.
3. Reemplace los bujes de crucetas.
4. Reemplace el DNFT.

### **11. ANALISIS DE LA ESTRATEGIA ACTUAL**

En el programa de optimización de refinerías se implementaron las estrategias y prácticas de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad con base en la metodología RCM (Reliability Centred Maintenance), donde se definieron las actividades de mantenimiento y su frecuencia para aumentar la confiabilidad de los activos de las unidades de la 56refinería, este plan incluyó las tareas de Mantenimiento proactivo, correctivo, monitoreo por condición y las Tareas de Acción para los equipos de la planta.

La estrategia de mantenimiento obtenida por el estudio de RCM se basa en la filosofía de trabajar con un mantenimiento planeado, minimizando el mantenimiento no planeado o correctivo. Sin embargo, se concibe que ciertos componentes de la máquina se dejan correr hasta la falla.

El mantenimiento correctivo incluye el trabajar componentes y equipos a falla, en los casos en que el mantenimiento preventivo posible es más costoso que la

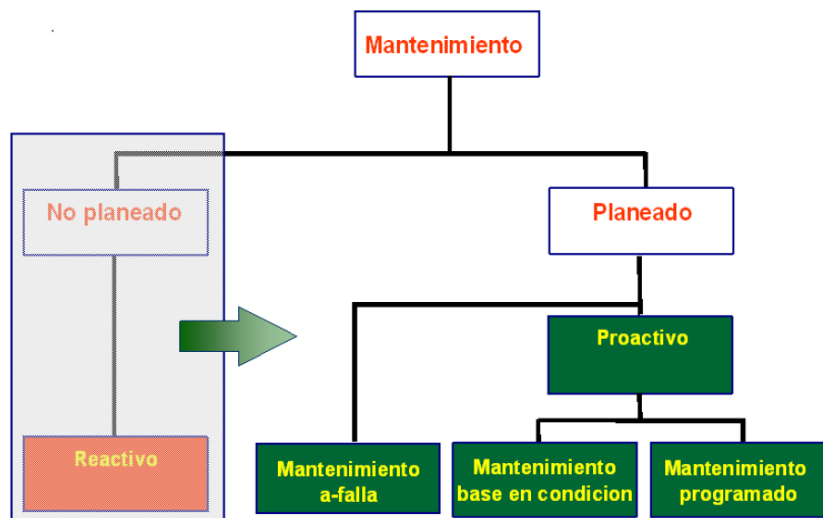
reparación del activo cuando falle y cuando se tengan limitaciones para medir mediante técnicas predictiva una variable de control.

El mantenimiento planeado Proactivo contiene dos grandes grupos:

**Mantenimiento Programado:** Incluye las tareas que se programan para realizarse de acuerdo a una frecuencia de tiempo. En este tipo de tareas también se incluye todas las rutas de monitoreo que obedecen a un programa de seguimiento de la condición de los equipos.

**Mantenimiento por Condición:** Incluye las tareas que se deben ejecutar una vez se ha realizado un análisis de la información de monitoreo de la condición.

**Figura 17 Mantenimiento por condición**



Fuente: De los autores

Actualmente nuestro sistema de información CMMS (computerized maintenance management system) es Ellipse cuya empresa fabricante es Mincom la cual tienen una arquitectura adecuada para la recolección de datos con aplicaciones

totalmente integradas pero modulares, lo que permite una gestión de activos completa a la empresa, con este software se permite:

- Evaluar el rastreo de reparaciones y servicios,
- Rastreo de costos por todo concepto
- Evaluación de la mezcla preventivo – correctivo,
- Evaluación de la efectividad, eficiencia y eficacia, se permite desarrollar informes y la evaluación integral de gestión.

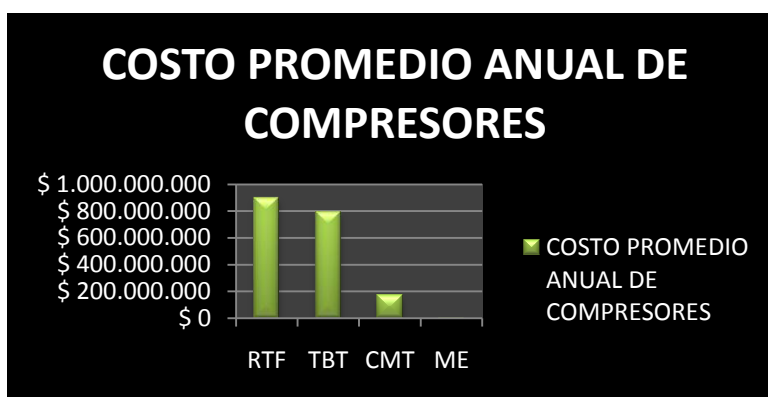
El RCM de los compresores de hidrógeno contempla las siguientes actividades:

- Tareas de monitoreo de condición (Condition Monitoring tasks, CMT)
- Tareas basadas en el tiempo (Time Based Task, TBT)
- Funcionamiento a falla (Run to Failure, RTF)
- Tareas de origen mejorativos (ME)

La siguiente gráfica muestra la distribución de los costos anuales promedios de compresores recíprocos de hidrógeno para los diferentes tipos de mantenimiento, allí se muestra que el mayor volumen de los costos de los compresores está en las actividades de mantenimiento tipo correctivo (RTF) y las tareas de mantenimiento basado en el tiempo (TBT), las cuales tienen un costo actualmente de \$ 1.691 MCOP (0.750 MUSD) y representan el 90.8% de los costos totales de mantenimiento.

En la estrategia de mantenimiento se determinaron los componentes que trabajarán hasta la falla (Run to Failure, RTF), para los casos en que el mantenimiento preventivo posible es más costoso que la reparación de los componentes del equipo cuando falle, entre los componentes se determinaron se aplicaría esta premisa están los sellos de gas, sellos de aceites y válvulas de succión y descarga, la estrategia de funcionamiento a falla tiene un costo actual de \$ 897 MCOP y representa el 48% de los costos actuales de mantenimiento.

**Figura 18 Costo promedio anual de compresores**



Fuente: De los autores

La estrategia de reparar cuando fallen los componentes implica tener el repuesto disponible en bodega con el fin de ser instalado una vez ocurra la falla del componente, esta estrategia de mantenimiento se ejecuta en un escenario donde gobierna la emergencia del momento y donde se pueden cometer errores y no cumplir procedimientos lo que trae consigo reprocesos durante el armado, montaje y arrancada de los equipos, el costos de estos reprocesos ha tenido un sobre costo el último año de \$101.656.930. (101 MCOP).

Cuando un sistema compresor se opera bajo la premisa de operar hasta la falla no se puede disponer del recurso a tiempo para la intervención del equipo lo cual genera demoras de tipo logística que al final le restan al tiempo que el compresor puede estar disponible y operando.

Las tareas de mantenimiento basadas en el tiempo (Time Based Task, TBT) o mantenimiento preventivo que se ejecutan actualmente para los compresores recíprocos tienen frecuencias definidas y recursos de horas de hombres los

cuales tienen un costo promedio anual de \$ 793 MCOP y representa el 42% de los costos totales de mantenimientos de los compresores.

Los costos promedios de mantenimientos basados en el tiempo (TBT) durante los últimos seis años se muestran a continuación.

**Figura 19 Costos estrategia TBT**



Fuente: De los autores

Como se observa en la figura 19 el mantenimiento preventivo de los compresores recíprocos de hidrógeno ha tenido un costo de 4.762 MCOP

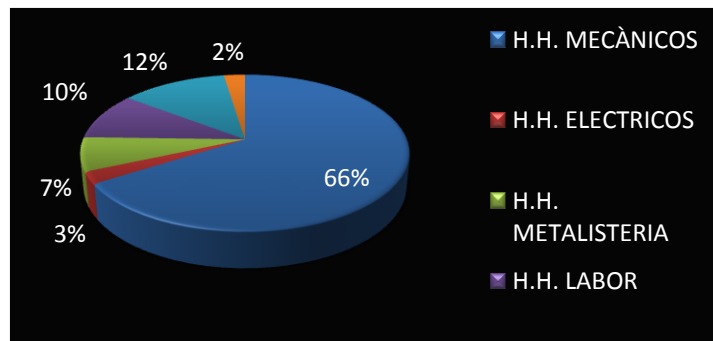
Las siguientes son las frecuencias de mantenimiento preventivo consignadas en la estrategia del RCM:

### **11.1 Mantenimiento general o de cada 3 años**

Cada tres años según la estrategia definida en el RCM contempla la reparación general del compresor la cual tiene la mayoría de actividades del recurso de horas hombre de mecánica con 323 horas lo que corresponde al 66% del recurso total de horas hombre, seguido de la actividad de pintura con 60 horas lo que

corresponde al 12% del recurso total de horas hombre, seguido por personal de labor que corresponde a 10% del recurso total.

**Figura 20 Distribución de recursos mantenimiento cada 3 años**



Fuente: De los autores

**Tabla 2 Recurso programado mantenimiento cada 3 años**

H.H. MECÀNICOS	323
H.H. PINTURA	60
H.H. LABOR	48
H.H. METALISTERIA	34
H.H. TUBERIA	12
H.H. ELECTRICOS	12

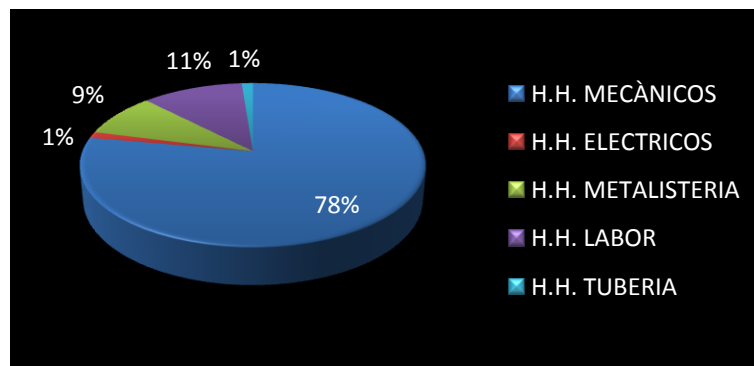
Las actividades que se contemplan en el mantenimiento general se anexan al final del documento.

## 11.2 Mantenimiento general anual

Cada año según la estrategia definida en el RCM de la planta se contempla el mantenimiento anual del compresor la cual tiene la mayoría de actividades del recursos de horas hombre de mecánica con 252 horas lo que corresponde al 78%

del recurso total de horas hombre, seguido de la actividad de labor con 36 horas lo que corresponde al 11% del recurso total de horas hombre, seguido por personal de metalistería que corresponde a 9% del recurso total.

**Figura 21 Distribución de recursos HH preventivo anual**



Fuente: De los autores

**Tabla 3 Recurso programado mantenimiento preventivo anual**

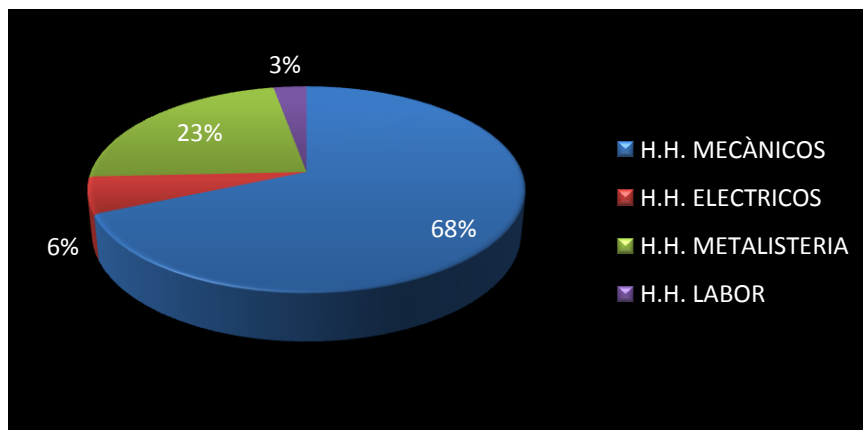
H.H. MECÀNICOS	252
H.H. LABOR	36
H.H. METALISTERIA	28
H.H. TUBERIA	4
H.H. ELECTRICOS	4

Las actividades que se contemplan en el mantenimiento anual se anexan al final del documento.

### 11.3 Mantenimiento preventivo cada 4000 horas

La estrategia definida en el RCM de la planta contempla el mantenimiento semestral del compresor la cual tiene la mayoría de actividades del recursos de horas hombre de mecánica con 48 horas lo que corresponde al 68% del recurso total de horas hombre, seguido de la actividad de metalistería con 16 horas lo que corresponde al 23% del recurso total de horas hombre, seguido por personal de eléctricos que corresponde al 6% del recurso total.

**Figura 22 Distribución recurso HH preventivo semestral**



Fuente: De los autores

**Tabla 4 Recurso programado mantenimiento preventivo semestral**

H.H. MECÀNICOS	48
H.H. METALISTERIA	16
H.H. ELECTRICOS	4
H.H. LABOR	2

Las actividades que se contemplan en el mantenimiento semestral se anexan al final del documento.

Las tareas de monitoreo de condición (Condition Monitoring tasks, CMT) que actualmente se ejecutan para los compresores recíprocos son:

- Toma de temperaturas de válvulas de succión y descarga
- Toma de presiones del compresor , Relaciones de compresión
- Toma de presiones de lubricación de carter y cilindros
- Toma de temperaturas de entrada y salida del gas de proceso.
- Verificación del nivel de aceite del carter.
- Consumo de energético del compresor

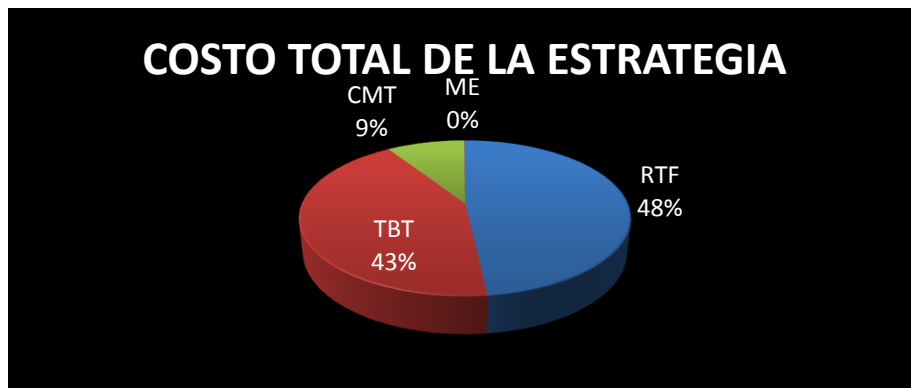
Las anteriores actividades son realizadas por el operador por medio de rondas estructuradas que el realiza como parte de sus funciones diarias, la ventaja de estas tareas radica en que resultan ser las más costo-efectivas, dado que ayudan a mantener la función del equipo y en muchas ocasiones a mitigar la consecuencia de las fallas, El costo de la estrategia de monitoreo de condición CMT tiene un costo de \$168 MCOP lo cual representa el 9% de los costos. Cuando alguna de estas variable se sale de los límites permitidos se realizan un diagnóstico para evaluar si su condición requiere de un ajuste en la operación del equipo o si requiere una intervención por parte de mantenimiento.

La desventaja que presenta la forma actual como se está realizando las tareas de monitoreo de la condición es que no permiten un control continuo de las variables de proceso con el fin de tener una incertidumbre menor de la condición real del equipo, debido a que la toma de datos es de forma periódica y además los datos tomados en la ronda del operador no permite medir variables del tipo mecánico tan importantes como lo son caída del pistón, vibración del crosshead, presión de cámara de compresión lo que permite lograr un mejor diagnóstico del equipo y programar las intervenciones por parte de mantenimiento por condición y no basadas en el tiempo como se realiza actualmente.

Normalmente el monitoreo periódico es insuficiente cuando existen fallas que se desarrollan rápidamente en un periodo de tiempo en que la acción correctiva no se puede planificar normalmente y provocan fallas aun mayores.

El costo de la estrategia de mantenimiento para compresores recíprocos de hidrógeno en los últimos seis años es de \$11.172 MCOP, distribuidos en mantenimiento RTF de \$5.385 MCOP, 48%, mantenimiento preventivo o basado en tiempo de \$4.762 MCOP, 43%, mantenimiento basado en la condición \$1.013 MCOP, 9% y trabajos mejorativos el cual como su nombre lo indica contempla mejoras realizadas a los equipos por orden de \$10 MCOP.

**Figura 23 Costo de la estrategia**



Fuente: De los autores

Con el fin de disminuir los costos actuales de mantenimiento se requiere eliminar los mantenimientos preventivos o estrategia de Tareas basadas en el tiempo (Time Based Task, TBT) e implementar Tareas basadas en la condición (Condition Based Task, CBT) las cuales ayudarían solo a programar una intervención por parte del mantenimiento a el equipo, cuando se detecte una condición anormal en la máquina y no por frecuencia como se realiza actualmente

aprovechando de una manera mejor el recurso disponible de mantenimiento y garantizando la seguridad operativa del activo.

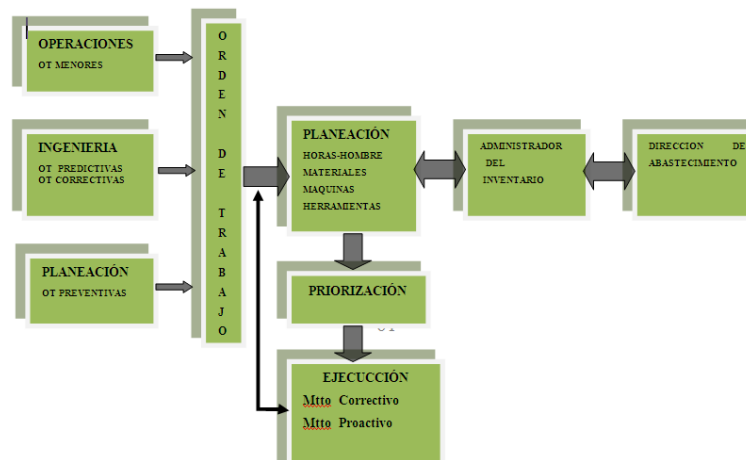
El monitoreo continuo de la condición permitirá de igual forma anticiparse a las fallas disminuyendo el mantenimiento correctivo o Run to failure RTF y sus consecuencias que normalmente implica un mayor costo de las reparaciones, para esto se requiere de la instalación de un sistema de monitoreo continuo para compresores reciprocantes que permita mediante la medición de variables físicas determinar el estado del equipo en todo momento y permita realizar un diagnóstico acertado del estado real de los equipos, actualmente en Colombia se cuenta con varias empresas que ofrecen esta tecnología para realizar el montaje de sistemas de monitoreo en línea tales como son Dresser Rand , Hoerbiger , Prognost Etc..

## **12. GESTION DE MANTENIMIENTO**

Los históricos de mantenimiento permiten obtener datos al evaluar la efectividad de la estrategia actual de mantenimiento que se realiza sobre los compresores de hidrógeno que se tienen en la Gerencia de Refinería de Barrancabermeja GRB de Ecopetrol S.A. Además, permiten determinar los índices de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad y analizar los modos y causas de fallas asociados a las máquinas y tiempo medio entre fallas de los sistemas.

Dependiendo de la naturaleza de los mantenimientos la Órdenes de trabajos se clasifican en órdenes de trabajo proactivas que agrupan las órdenes de trabajo preventivas (MST, Maintenance Schedule Task) y predictivas, otro tipo de ordenes de trabajo son las correctivas que se generan cuando se detecta una falla en la máquina.

**Figura 24 Diagrama de la planeación de una OT**



Fuente: De los autores

Luego de la generación de una orden de trabajo pasan al proceso de planeación del mantenimiento donde se le asignan horas – hombre de ejecución se le asignan los materiales o repuestos necesarios para la ejecución del trabajo, así como también se define si se requiere o no programación de trabajos de máquinas herramientas.

Luego de esto se realiza la priorización de las ordenes de trabajo de acuerdo a las necesidades de la planta y se procede a ejecutarla por los departamentos de mantenimiento correctivo o preventivo, el departamento de planeación del mantenimiento interactúa continuamente con el administrador del inventario y este a su vez con el departamento de abastecimiento con el fin de garantizar la oportuna gestión de los repuestos y lograr la disponibilidad de repuestos cuando se ejecuten las tareas de mantenimiento.

De igual forma se tiene una constante retroalimentación entre los ejecutores del mantenimiento y planeación del mantenimiento ya que esto permite que se ajusten los tiempos de intervención de los equipos, se actualice el inventario debido a posibles actualizaciones o códigos asignados incorrectamente.

### 13. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de la investigación tiene como finalidad la evaluación de la efectividad de la estrategia actual que consiste en ejecutar tareas basadas en el tiempo (Time Based Task, TBT) y tareas de mantenimiento correctivo (Run to Failure, RTF) y la búsqueda de una alternativa de la estrategia de mantenimiento de RCM de las unidades de proceso de la GRB las cuales tienen como finalidad evitar la aparición de modos de falla identificados.

Durante este proceso se identificaron en qué unidades de proceso se encuentran los compresores de hidrógeno, así como también características técnicas similares como son la potencia, velocidad y flujo.

UNIDAD DE NEGOCIO	# DE EQUIPOS
PETROQUIMICA	5
REFINACIÓN	3

Se realizó la revisión de cada orden de trabajo con el fin de identificar cuáles son los modos y causas de falla predominante de los equipos, así como también el tipo de mantenimiento preventivo

Se clasificó por fecha de ejecución, tipo de mantenimiento; preventivo, correctivo en planta o correctivo en taller.

### 14. CALCULOS DE INDICADORES CMD

En la siguiente tabla se muestran los equipos evaluados y se ordenaron del menos confiable al más confiable, siendo el más confiable el compresor SC1702 con tiempo medio entre falla de 272 días, y una confiabilidad del 26.07 %, una Mantenibilidad de 74.51% y una disponibilidad de 49.54% y el menos confiable el

compresor SC2652B con tiempo medio entre falla de 38 días, y una confiabilidad del 0 %, una Mantenibilidad de 0 % y una disponibilidad de 3.47 %.

Como se muestra en la tabla 5 para todos los compresores la Mantenibilidad está cerca al 100% al calcularse para un tiempo de tres años, esto quiere decir que la probabilidad de que un equipo se repare en un tiempo de tres años es 100%

**Tabla 5 Indicadores de Confiabilidad**

ITEM	No EQUIPO	TMEF	C	M	D
1	SC2652B	<b>38</b>	0.00%	0.00%	3.47%
2	SC1101/2A	<b>49</b>	0.06%	100.00%	62.50%
3	SC1102/2B	<b>60</b>	0.24%	99.98%	55.02%
4	SC2652A	<b>82</b>	1.14%	99.96%	59.49%
5	SC1601B	<b>91</b>	1.81%	99.03%	49.82%
6	SC1601A	<b>143</b>	7.76%	99.44%	65.15%
7	SC2652C	<b>192</b>	14.97%	100.00%	87.68%
8	SC1702	<b>272</b>	26.07%	74.51%	49.54%

En la tabla 6 se muestra el tiempo medio entre reparaciones para los compresores de hidrógeno, el tiempo medio para reparar y se calculó la Mantenibilidad para una semana como la probabilidad de que un equipo que sale a Mantenimiento regrese la misma semana, M.

También se muestra el número de fallas que se han tenido los compresores en el último año.

**Tabla 6 Indicadores de Mantenibilidad**

ITEM	No EQUIPO	TMER	TPO	# DE REPARACIONES EN EL PERIODO	TMPR	M
		(días)	(días)		(días)	
1	SC1101/2A	<b>45.8</b>	47.9	16	22.7	26.55%

2	SC1102/2B	<b>63.9</b>	58.4	10	45.7	14.20%
6	SC2652A	<b>87.9</b>	79.1	8	49.1	13.28%
9	SC1601B	<b>102.3</b>	89.3	6	80.3	8.34%
10	SC2652B	<b>118.5</b>	28	2	429.5	1.62%
11	SC1601A	<b>124</b>	139	6	58.7	11.25%
14	SC2652C	<b>160.7</b>	192	6	22	27.25%
21	SC1702	<b>276</b>	267	2	272	2.54%

## 15. ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLA

Los modos de falla identificados en la Gerencia de refinería de Barrancabermeja en los últimos tres años para los compresores recíprocos de hidrógeno son:

1. Daño de válvulas de succión y descarga.
2. Sello mecánico fugando
3. Válvulas de proceso dañadas
4. Acople dañados
5. Pistón dañados
6. Cojinete dañados
7. Válvula de bolsillo defectuosa
8. Filtro de succión obstruido
9. Empaque fugando
10. Bomba de lubricación defectuosa
11. Bobinas dañadas
12. Actuador eléctrico defectuoso

El modo de falla que sobresale es el daño de las válvulas de succión y descarga de los compresores con 11 eventos, el daño de las válvulas causa la pérdida de presión y flujo de los compresores afectando de esta forma la función primaria de los mismos, la estrategia actual no contempla el monitoreo continuo de las válvulas sino se monitorea periódicamente por parte del operador por lo que no se conoce con certeza cuándo cambian las condiciones que inician una falla en las válvulas de succión y descarga.

El daño de las válvulas de succión y descarga está asociado en muchos casos a que el gas viene con trazas de agua que se produce como un subproducto de la generación de hidrógeno y que no se retira completamente en los tambores separadores lo que permiten el paso de agua hacia el compresor y cuando alcanza unas condiciones de presión y temperatura apropiada durante la compresión del gas se precipita en los compresores y como el agua es incompresible busca una salida forzada por la válvulas lo que termina dañándolas, las válvulas también se pueden dañar por la llegada de metal corroído proveniente de la tubería de proceso y que se introducen en las áreas de sellado de la válvula causando que esta pierda eficiencia e incremento de temperatura al no sellar completamente y dejar recirculando el gas.

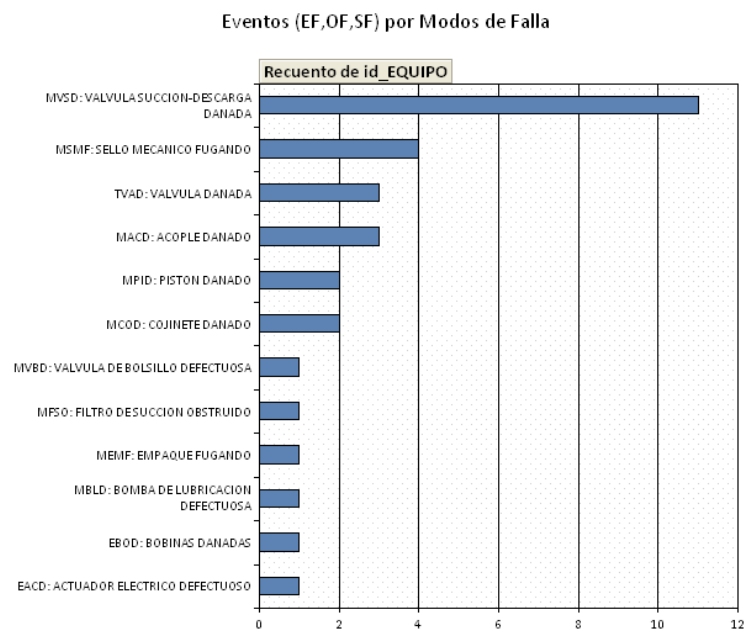
El segundo modo de falla en los compresores reciprocantes en la GRB es sello mecánico fugando el cual se detecta normalmente por un mayor flujo de hidrógeno hacia las teas donde es quemado y arrojado al ambiente lo que causa impacto ambiental, los sellos de los compresores son diseñados para permitir una fuga mínima al ambiente ya que ningún sello logra una hermeticidad completa, los sellos de gas pueden ser afectados en su funcionamiento al llegar el gas de proceso contaminado de otros productos sólidos.

El tercer modo de falla identificado en los compresores reciprocantes de hidrógeno es válvula dañada con 3 eventos lo cual se evidencia por la pérdida de sello de las válvulas que se encuentran en las líneas de proceso asociadas al compresor y las cuales ante un daño de esta se debe en algunos casos para el compresor.

El cuarto modo de falla es pistón dañado el cual ha presentado dos eventos y se puede dar por la falla de la tuerca de fijación del pistón la cual se suelta y permite que el pistón quede suelto en el cilindro.

Los modos de falla: válvula de bolsillo defectuosa, filtro de succión obstruido, empaque fugando, bomba de lubricación defectuosa, bobinas dañadas y actuador son eventos que han ocurrido en los compresores de hidrógeno una sola vez cada uno y son poco frecuentes.

**Figura 25 Eventos por modo de falla**



Fuente: De los autores

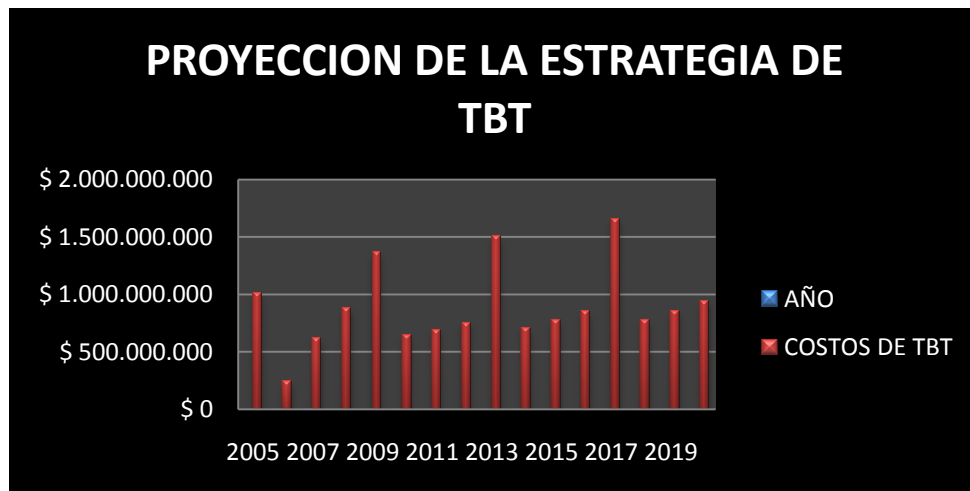
## 16. ANALISIS DE COSTOS

En el siguiente análisis de costo se evalúa la viabilidad económica del proyecto y determinar si la inversión en un sistema de monitoreo continuo cumple con el objetivo básico financiero el cual es maximizar la inversión, esta evaluación se hará calculando el VPN para el proyecto.

La inversión inicial de la adquisición de los equipos y el montaje de los mismos es de \$300 MCOP por equipo. La tasa de descuento se tomará como del 12% anual. El proyecto de instalación de un sistema de monitoreo por condición busca reducir gradualmente los costos asociados al mantenimiento preventivo o tareas basadas en el tiempo de los compresores, por tal razón se realiza la evaluación calculando el riesgo actual sin proyecto Vs el riesgo con el proyecto.

Para los cálculos se utilizó una proyección de los costos del mantenimiento preventivo hasta el año 2020 basado en promedios de años anteriores, teniendo en cuenta que la estrategia de mantenimiento actual contempla mantenimientos de cada tres años, anuales y semestrales como se muestra a continuación:

**Figura 26 Proyección de la estrategia de TBT**



Fuente: De los autores

En la figura 26 se muestra unos picos que sobresalen de la tendencia normal lo cual se debe a mantenimientos preventivos de cada tres años, los cuales consumen una mayor cantidad de recursos de horas hombres de mantenimiento y de repuestos.

En la tabla 7 se muestran los costos de la estrategia TBT proyectada hasta el año 2020.

**Tabla 7 Costo proyectado 2020**

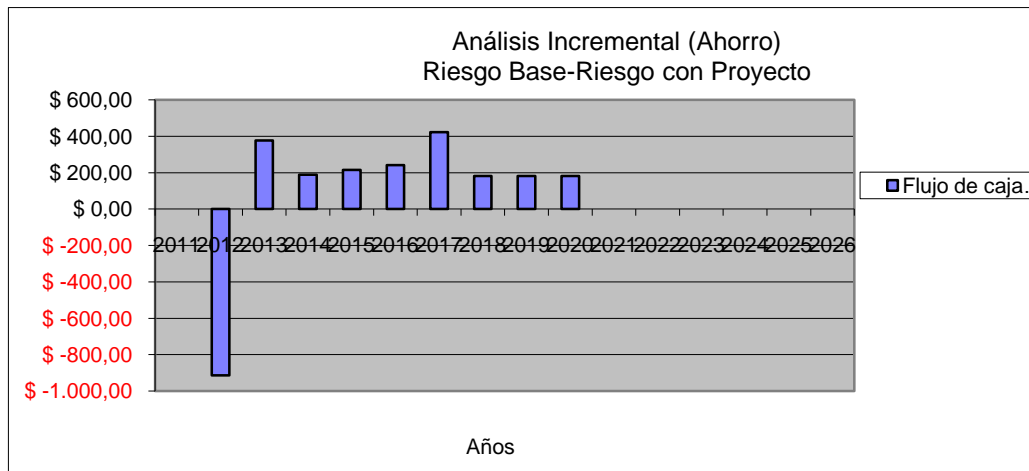
AÑO	COSTOS DE TBT U\$
2005	\$ 506,354
2006	\$ 121,472
2007	\$ 308,049
2008	\$ 440,840
2009	\$ 683,838
2010	\$ 320,779
2011	\$ 343,720
2012	\$ 378,091
2013	\$ 752,222
2014	\$ 352,857
2015	\$ 388,142
2016	\$ 426,956
2017	\$ 827,444
2018	\$ 388,142
2019	\$ 426,956
2020	\$ 469,652

TMR ( Ecopetrol)	10%	EA. USD									
FASE DEL PROYECTO	1										
RIESGO BASE											Benefici
Pérdidas y Costos sin Proyecto	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Perdidas por disponibilidad y confiabilidad											
Perdidas por infraestructura											
Perdidas por energía											
Otras pérdidas											
Perdidas Brutas (por equipo y falla)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Maxima probabilidad de ocurrencia	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%
Perdidas brutas *probabilidad de ocurrencia	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Costos de mantenimiento		\$ 378	\$ 752	\$ 352	\$ 388	\$ 426	\$ 827	\$ 388	\$ 426	\$ 469	
Costos de operación		\$ 6	\$ 6	\$ 6	\$ 6	\$ 6	\$ 6	\$ 6	\$ 6	\$ 6	
Costos de disposición											
Costos de parada											
Costos ambientales											
Otros Costos											
Flujo de caja	\$ 0	\$ 384	\$ 758	\$ 358	\$ 394	\$ 432	\$ 833	\$ 394	\$ 432	\$ 475	
Flujo de caja con declinación	\$ 0	\$ 384	\$ 758	\$ 358	\$ 394	\$ 432	\$ 833	\$ 394	\$ 432	\$ 475	
Declinación Anual de producción (porcentaje)	0%										
<b>VPN Riesgo base</b>		<b>\$ 2,857</b>									

<b>RIESGO CON PROYECTO</b>										
Inversion, Pérdidas y Costos con Proyecto	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Diseño (Consultoría)		\$ 80								
Compras (Global para la actividad)		\$ 1,040								
Montaje (Global para la actividad)		\$ 80								
Interventoría										
AIU										
Bruto (Global para la actividad)	\$ 0	\$ 1,200	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Costo inicial de compra ( Inversión inicial)	\$ 1,200									
Costos de mantenimiento	\$ 0	\$ 189	\$ 301	\$ 106	\$ 78	\$ 43	\$ 83	\$ 39	\$ 43	\$ 47
Costos de operación										
Costos de disposición										
Costos de parada										
Costos ambientales										
Otros Costos										
Pérdidas por disponibilidad y confiabilidad										
Pérdidas por infraestructura										
Pérdidas por energía										
Otras pérdidas										
Pérdidas Brutas (por equipo y falla)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
FLUJO DE CAJA	\$ 0	\$ 1,389	\$ 301	\$ 106	\$ 78	\$ 43	\$ 83	\$ 39	\$ 43	\$ 47
<b>VPN del Riesgo con proyecto</b>	<b>\$ 1,776</b>									

Riesgo base		\$ 349.09	\$ 626.45	\$ 268.97	\$ 269.11	\$ 268.24	\$ 470.21	\$ 202.18	\$ 201.53	\$ 201.45
Riesgo con proyecto	\$ 0.00	\$ 1,262.73	\$ 248.60	\$ 79.34	\$ 53.00	\$ 26.45	\$ 46.68	\$ 19.91	\$ 19.87	\$ 19.89
Análisis incremental	\$ 0.00	\$ -913.64	\$ 377.85	\$ 189.63	\$ 216.11	\$ 241.79	\$ 423.52	\$ 182.27	\$ 181.66	\$ 181.56

**Figura 27 Análisis Incremental**



Valor presente neto del análisis

KU\$ 1,080.75

Este cálculo del VPN demuestra que el proyecto tiene una ganancia de KU\$ 1,080.75. Por lo que es factible realizarlo.

## 17. CONCLUSIONES

En el programa de optimización de refinerías se implementaron las estrategias y prácticas de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad con base en la metodología RCM (Reliability Centred Maintenance), donde se definieron las actividades de mantenimiento y su frecuencia para aumentar la confiabilidad de los activos de las unidades de la refinería, este plan incluyó las tareas de Mantenimiento proactivo, correctivo, monitoreo por condición y las Tareas de Acción para los equipos de la planta.

La distribución de los costos anuales promedios de compresores recíprocos de hidrógeno para los diferentes tipos de mantenimiento, allí se muestra que el mayor volumen de los costos de los compresores está en las actividades de mantenimiento tipo correctivo (RTF) con un costo actual de \$ 897 MCOP y representa el 48% de los costos actuales de mantenimiento y las tareas de mantenimiento basado en el tiempo (TBT) con un costo de \$ 793 MCOP y representa el 42% de los costos totales de mantenimientos de los compresores.

El costo de la estrategia de monitoreo de condición CMT tiene un costo de \$168 MCOP lo cual representa el 9% de los costos

La desventaja que presenta la forma actual como se está realizando las tareas de monitoreo de la condición es que no permiten un control continuo de las variables de proceso con el fin de tener una incertidumbre menor de la condición real del equipo, debido a que la toma de datos es de forma periódica y además los datos tomados en la ronda del operador no permite medir variables de tipo mecánico tan importantes como lo son caída del pistón, vibración del crosshead, presión de cámara de compresión lo que permite lograr un mejor diagnóstico del equipo y programar las intervenciones por parte de mantenimiento por condición y no basadas en el tiempo como se realiza actualmente.

Con el fin de disminuir los costos actuales de mantenimiento se requiere eliminar los mantenimientos preventivos o estrategia de Tareas basadas en el tiempo (Time Based Task, TBT) e implementar Tareas basadas en la condición (Condition Based Task, CBT) las cuales ayudarían a programar una intervención por parte de mantenimiento, cuando se detecte una condición anormal en la máquina y no por frecuencia como se realiza actualmente aprovechando de una manera mejor el recurso disponible de mantenimiento y garantizando la seguridad operativa del activo.

El costo de la estrategia de mantenimiento para compresores recíprocos de hidrógeno en los últimos seis años es de \$11.172 MCOP, distribuidos en mantenimiento RTF de \$5.385 MCOP, 48%, mantenimiento preventivo o basado en tiempo de \$4.762 MCOP, 43%, mantenimiento basado en la condición \$1.013 MCOP, 9% y trabajos mejorativos el cual como su nombre lo indica contempla mejoras realizadas a los equipos por orden de \$10 MCOP.

El monitoreo continuo de la condición permitirá de igual forma anticiparse a las fallas disminuyendo el mantenimiento correctivo o Run to failure RTF y sus consecuencias que normalmente implica un mayor costo de las reparaciones, para esto se requiere de la instalación de un sistema de monitoreo continuo para compresores recíprocos que permita mediante la medición de variables físicas determinar el estado del equipo en todo momento y permita realizar un diagnóstico acertado del estado real de los equipos, Actualmente en Colombia se cuenta con varias empresas que ofrecen esta tecnología para realizar el montaje de sistemas de monitoreo en línea tales como son Dresser Rand , Hoerbiger , Prognost Etc..

El modo de falla que sobresale es daño de las válvulas de succión y descarga de los compresores con 11 fallas.

El segundo modo de falla en los compresores reciprocantes en la GRB es sello mecánico fugando

El tercer modo de falla identificado en los compresores reciprocantes de hidrógeno es válvula dañada.

## BIBLIOGRAFIA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API, API STANDARD 618, 4ª edición, Junio 1995.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API, API STANDARD 670, 4ª edición, Diciembre 2000.

BLOCK HEINZ P, Reciprocating Compressors, Operation and Maintenance. Butterworth-Heinemann. 1996

CAMBELL, John, Reliability Handbook, Price waterhouse Coopers LLP. 1997.

MORA GUTIERREZ, Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios. 2009.

MOUBRAY, John. Reliability Centered Maintenance. London: Butterworth-Heinemann, 1992.

MANUAL TÉCNICO ARIEL, MODELOS JG Y JGA, Compresores reciprocantes de cilindros opuestos balanceados para trabajo pesado, 2005.

HOERBIGER, HydroCOM 2.0, Control inteligente y sistema de monitoreo para desempeño máximo en compresores, 2009.

[http://books.google.com.co/books?id=VreR8GlfCCIC&printsec=frontcover&dq=HEINZ+BLOCH&hl=es&ei=OQnjTPGRMIH-8Abq3lXODA&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=5&ved=0CDMQ6AEwBA#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.co/books?id=VreR8GlfCCIC&printsec=frontcover&dq=HEINZ+BLOCH&hl=es&ei=OQnjTPGRMIH-8Abq3lXODA&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=5&ved=0CDMQ6AEwBA#v=onepage&q&f=false)  
<http://www.prognost.com/cnt/es/sistemas.php>

## ANEXOS

### Anexos 1 Tareas basadas en la condición metalista

TIPO DE EQUIPO	MODO DE FALLA	CLASIF. RAM	TIPO DE TAREA	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	DISCIPLINA
Compresor reciprocante	falla enfriamiento cilindro	L	CBT	Limpiar segun condición	METALISTA
Compresor reciprocante	falla enfriamiento cilindro	L	CBT	Limpiar segun condición	METALISTA
Compresor reciprocante	falla anillos compresion/piston	L	CBT	Limpiar segun condición	MECANICA
Compresor reciprocante	falla lubricador	N	CBT	Limpiar segun condición	MECANICA
Compresor reciprocante	falla anillos compresion/piston	L	CBT	Limpiar segun condición	MECANICA
Compresor reciprocante	falla lubricador	N	CBT	Limpiar segun condición	MECANICA

### Anexos 2 Tareas basadas en la condición electricidad

TIPO DE EQUIPO	MODO DE FALLA	CLASIF. RAM	TIPO DE TAREA	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	DISCIPLINA
Motor sincrónico	falla de cojinete	L	CMT	Chequear nivel de aceite y completar	ELECTRICIDAD
Motor sincrónico	falla circuito de control	N	CMT	Ensayo funcional	ELECTRICIDAD
Motor sincrónico	falla de protecciones	L	CMT	Ensayo funcional	ELECTRICIDAD
Motor sincrónico	falla de protecciones	N	CMT	Ensayo funcional	ELECTRICIDAD
Motor sincrónico	falla de contactos	N	CMT	ENSAYO TERMOGRAFIA SEGUN PROGRAMA	ELECTRICIDAD
Motor sincrónico	falla de cojinete	L	CMT	ANALIZAR ACEITE SEGUN PROGRAMA	ELECTRICIDAD
Motor de inducción	falla de rodamientos	L	CMT	MEDICION VIBRACIONES, TEMPERATURAS Y SPM	ELECTRICIDAD
Motor de inducción	falla de rodamientos	L	CMT	MEDICION VIBRACIONES, TEMPERATURAS Y SPM	ELECTRICIDAD
Motor de inducción	falla de rodamientos	L	CMT	ANALIZAR TENDENCIAS (VIBRACION - TEMPERATURA - SPM)	INSPECTOR ELECTRICO
Motor de inducción	falla de rodamientos	L	CMT	ANALIZAR TENDENCIAS (VIBRACION - TEMPERATURA - SPM)	INSPECTOR ELECTRICO

TIPO DE EQUIPO	MODO DE FALLA	CLASIF. RAM	ESPECIALIDAD	TIPO DE TAREA	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	DISCIPLINA
MOTOR-IND	falla aislación de bobinado y/o cable	L	E	TBT	ENSAYO DE MEGADO SEGUN PROGRAMA	ELECTRICIDAD
MOTOR-SYN	falla aislación de bobinado y/o cable	M	E	TBT	ENSAYO DE MEGADO SEGUN PROGRAMA	ELECTRICIDAD
MOTOR-SYN	falla aislacion bobinado	L	E	TBT	MANTENIMIENTO SEGUN PROGRAMA	ELECTRICIDAD
MOTOR-SYN	falla del interruptor	L	E	TBT	MANTENIMIENTO SEGUN PROGRAMA	ELECTRICIDAD
MOTOR-IND	falla de protecciones	N	E	TBT	ENSAYO/CALIBRACION DE PROTECCIONES SEGUN PROGRAMA	ELECTRICIDAD
MOTOR-IND	falla de protecciones	N	E	TBT	ENSAYO/CALIBRACION DE PROTECCIONES SEGUN PROGRAMA	ELECTRICIDAD

### Anexos 3 RUN TO FAILURE RTF

TIPO DE EQUIPO	MODO DE FALLA	CLASIF. RAM	ESPECIALIDAD	TIPO DE TAREA	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	DISCIPLINA
CMPR-RECIP	falla valvula	L	R	RTF	REPARAR ANTE FALLA	MECANICA
CMPR-RECIP	falla de sellos	L	R	RTF	REPARAR ANTE FALLA	MECANICA
CMPR-RECIP	falla de lubricación	N	R	RTF	REPARAR ANTE FALLA	MECANICA
CMPR-RECIP	falla valvulas	L	R	RTF	REPARAR ANTE FALLA	MECANICA
CMPR-RECIP	falla de sellos	L	R	RTF	REPARAR ANTE FALLA	MECANICA
CMPR-RECIP	falla de lubricacion	N	R	RTF	REPARAR ANTE FALLA	MECANICA

## Anexos 4 Tareas del operador

TIPO DE EQUIPO	MODO DE FALLA	CLASIF. RAM	ESPECIALIDAD	TIPO DE TAREA	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	DISCIPLINA
CMPR-RECIP	falla valvulas	L	R	CMT	CHEQUEOS DEL OPERADOR SEGUN RUTINA	OPERADOR
CMPR-RECIP	falla anillos compresion/piston	L	R	CMT	MONITOREO RELACION DE COMPRESION	OPERADOR
CMPR-RECIP	falla lubricador	N	R	CMT	CHEQUEOS DEL OPERADOR SEGUN RUTINA	OPERADOR
CMPR-RECIP	falla enfriamiento cilindro	L	R	CMT	CHEQUEOS DEL OPERADOR SEGUN RUTINA	OPERADOR
CMPR-RECIP	falla valvulas	L	R	CMT	CHEQUEOS DEL OPERADOR SEGUN RUTINA	OPERADOR
CMPR-RECIP	falla anillos compresion/piston	L	R	CMT	MONITOREO RELACION DE COMPRESION	OPERADOR
CMPR-RECIP	falla lubricador	N	R	CMT	CHEQUEOS DEL OPERADOR SEGUN RUTINA	OPERADOR
CMPR-RECIP	falla enfriamiento cilindro	L	R	CMT	CHEQUEOS DEL OPERADOR SEGUN RUTINA	OPERADOR