

**MODELO PARA IMPLEMENTAR ESTRATEGIA DE LUBRICACIÓN CON  
EMISIONES ACÚSTICAS A AEROENFRIADORES DE GAS DE PROCESO DE  
LAS TURBINAS DE REINYECCIÓN DE GAS DEL CPF CUIAGUA.**

**CARLOS FRANCISCO MORENO DORADO.  
OSCAR RICARDO URBINA GARZÓN.**

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

**2014**

**MODELO PARA IMPLEMENTAR ESTRATEGIA DE LUBRICACIÓN CON  
EMISIONES ACÚSTICAS A AEROENFRIADORES DE GAS DE PROCESO DE  
LAS TURBINAS DE REINYECCIÓN DE GAS DEL CPF CUPIAGUA.**

**CARLOS FRANCISCO MORENO DORADO.  
OSCAR RICARDO URBINA GARZÓN.**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar el título de  
gerencia de mantenimiento.**

**Director:  
CARLOS BORRAS PINILLA.**

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

**2014**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a Dios quien es mi guía, mi luz y el motor de mi vida, quien me da el impulso para seguir adelante y la sapiencia para sortear los problemas.

A mi esposa Alexandra, a mi hija Hannah Sofía y mi hijo Thomas, quienes son el pilar de mi vida y la razón para superarme día a día, las que deje solas mucho tiempo por dedicarme a culminar esta meta que está a punto de lograrse, pero que me han sabido comprender y apoyar en esta etapa de mi vida.

A mi madre, hermanos y a toda mi familia que han creído en mí y que aunque un poco lejos he sentido su apoyo incondicional.

A mis compañeros y amigos con los que iniciamos este proceso de formación y hoy en día lo estamos culminando, por su apoyo para no dejarme desfallecer en los momentos difíciles que se me presentaron.

**ORUG**

## **AGRADECIMIENTO**

Los autores del proyecto expresan sus agradecimientos a:

A la universidad industrial de Santander y su cuerpo de docentes de la especialización en gerencia de mantenimiento y a la fundación Unisangil por brindarnos el recurso humano y físico para alcanzar otra meta propuesta en nuestras vidas y contribuir a la formación tanto académica como personal.

A Dios por habernos permitido empezar otra etapa de nuestras vidas y hoy hemos llegado a un final que fue lleno de inquietudes, ayuda mutua, alegrías, tristezas pero a lo largo de ese camino estabas TU DIOS, escuchando nuestros gritos de zozobra, dándonos fuerza y serenidad en aquellos momentos un poco difíciles, por darnos salud, fuerza y creatividad para realizar y cumplir con las tareas cotidianas.

A nuestras familias, padres, esposa, hijos y demás, que en tantos momentos dejamos solos y les hurtamos el tiempo que teníamos para departir con ellos, por su apoyo, colaboración, amor y sabernos entender y comprender en los momentos difíciles.

El Ingeniero Carlos Borrás Pinilla, director de la monografía de grado por su apoyo, ofreciéndonos una trayectoria llena de sugerencias y observaciones que enriquecieron a un más nuestro trabajo ..

A nuestros compañeros que comenzaron este proceso con la ilusión de alcanzar un objetivo común y fueron apoyo incondicional en este pasaje de nuestras vidas, quienes con sus bromas hicieron más ameno y colocaron el picante a este proyecto.

**ORUG**

A Dios por darme la perseverancia necesaria para hacer este esfuerzo que con mucho anhelo he podido llegar a realizar, por darme esa fuerza necesaria para mantenerme en mi proyecto de vida, en esa línea o ruta de capacitación para hacer de mi un ingeniero mecánico idóneo capaz de desarrollar soluciones útiles a mi país y a la sociedad.

A mis padres y mi familia que con su comprensión y acompañamiento sincero han sido ese apoyo tan necesario para mantenerse motivado señalándome con cariño ese horizonte a seguir, con valores fundamentales que han formado de mi una persona honesta consciente de la necesidad de mejorar cada día en busca de prosperas oportunidades de crecimiento y desarrollo profesional.

Al cuerpo docente de la Universidad Industrial de Santander y a sus pares de la Fundación universitaria de San Gil que cada día nos entregan todo su conocimiento, que se esfuerzan por buscar la manera de que en tan poco tiempo podamos sacarle el máximo provecho a cada temática, que renunciando a sus familias los fines de semana muestran su compromiso para con nuestra educación pilar fundamental en el mejoramiento de toda la academia profesional.

**CFMD**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO .....	18
1.1. DESCRIPCIÓN DEL CPF CUPIAGUA .....	18
1.2. OBJETIVOS .....	22
1.2.1. Objetivo general .....	22
1.2.2. Objetivos específicos: .....	22
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA. ....	23
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE LUBRICACIÓN .....	25
2. ANÁLISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA .....	27
2.1 ESTUDIOS SIMILARES REALIZADOS EN LA INDUSTRIA. ....	27
2.2 INVESTIGACIONES REALIZADAS DEL TEMA. ....	29
2.2.1. El mantenimiento. ....	29
2.2.1.1 Reducir costos de producción: .....	29
2.2.2. Evolución del mantenimiento. ....	30
2.2.3. Tipos de mantenimiento. ....	32
2.2.3.1. Mantenimiento reactivo o correctivo .....	32
2.2.3.2. Mantenimiento preventivo o basado en tiempo .....	32
2.2.3.3. Mantenimiento predictivo o basado en condición .....	32
2.2.3.4. Mantenimiento proactivo .....	33
2.2.4. Mantenimiento Preventivo .....	33
2.2.4.1. La lubricación en el mantenimiento preventivo .....	34
2.2.4.2. Lubricación Centrada en Confiabilidad .....	42
2.2.5. Mantenimiento Predictivo .....	52
2.2.5.1 Técnicas Predictivas. ....	56

2.3 MARCO LEGAL .....	66
3. DESARROLLO DEL MODELO. ....	74
3.1 RECURSOS.....	75
3.1.1. Recursos Humanos: .....	75
3.1.2 Recursos Materiales: .....	75
3.1.3 Recursos tecnológicos: .....	75
3.2 RELACIÓN COSTO-BENEFICIO. ....	75
3.3 TECNOLOGÍA PARA IMPLEMENTAR LA TÉCNICA PREDICTIVA. ....	78
3.4 ALCANCE DEL MODELO.....	78
3.5 MOTORES ELÉCTRICOS A IMPLEMENTAR EL MODELO. ....	79
3.5.1. Partes de un motor eléctrico .....	79
3.5.1.1 Estator.....	79
3.5.1.2. Rotor .....	79
3.5.1.3. Bobinado.....	80
3.5.1.4. Carcaza.....	80
3.5.1.5. Cojinetes .....	80
3.5.1.6. Base.....	81
3.5.1.7. Caja de conexiones .....	81
3.5.1.8. Placa de características.....	81
3.6 COJINETES A LOS QUE SE IMPLEMENTARA EL MODELO.....	85
3.6.1 Descripción. ....	85
3.6.1.1 Cojinetes de bolas .....	86
3.6.1.2. De bolas a rotula .....	86
3.6.1.3. De bolas con contacto angular.....	87
3.6.1.4. De rodillos cilíndricos .....	87
3.6.1.5. Rodamientos de agujas .....	88
3.6.1.6. De rodillos a rotula .....	88
3.6.1.7. Rodamientos de rodillos cónicos .....	89
3.6.1.8 Rodamientos Axiales: .....	89

3.6.2 Factores de diseño de un rodamiento.....	90
3.6.3 Ciclo de vida de un rodamiento.....	90
3.6.4 Características de los rodamientos a implementar en el modelo.....	92
3.6.5 Re-Lubricación de los Rodamientos a Implementar en el Modelo .....	94
3.6.6 Calculo de la cantidad de grasa adecuada. ....	95
3.6.7 Tipo de grasa para la re-lubricación.....	96
3.6.8 Calculo de la frecuencia de re-lubricación. ....	99
3.7 DISEÑO DE LUBRICACIÓN PREDICTIVA. ....	100
3.7.1 Las emisiones acústicas como técnica predictiva.....	101
3.7.2 Equipo Ultra probé 9000. ....	102
3.7.3 Creación de rutas de re-lubricación. ....	103
3.7.4 Procedimiento de re-lubricación con ayuda de emisiones acústicas .....	106
3.8 LÍNEA BASE.....	110
 CONCLUSIONES .....	 111
 BIBLIOGRAFÍA .....	 112

## LISTA DE TABLA

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Cambio de rodamientos por año. ....	24
Tabla 2. Generaciones del mantenimiento. ....	31
Tabla 3. Clasificación ASTM y Consistencia NLGI .....	50
Tabla 4. Matriz de Excelencia Operacional.....	54
Tabla 5. Ejemplo de mediciones y parámetros usados para el diagnóstico predictivo .....	56
Tabla 6. Costo del cambio de rodamientos de un motor.....	76
Tabla 7. Costo de la ejecución de la estrategia a implementar (54 motores). ....	76
Tabla 8. Listado aeroenfriadores a implementar el modelo. ....	78
Tabla 9. HE-1802/2802/3802. ....	83
Tabla 10. HE-1801/2801/3801. ....	84
Tabla 11. Estrategia predictiva, motores, aeroenfriadores de alta tren uno. ....	104
Tabla 12. Estrategia predictiva, motores, aeroenfriadores de alta tren dos. ....	104
Tabla 13. Estrategia predictiva, motores, aeroenfriadores de alta tren tres. ....	105
Tabla 14. Estrategia predictiva, motores, aeroenfriadores de media presión. ....	105
Tabla 15. Análisis del comportamiento y acción a ejecutar. ....	110

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Plano del campo, CPF Cupiagua.....	18
Figura 2. Diagrama de bloques del proceso Cupiagua .....	20
Figura 3. Sistema de Separación-Slug Catcher.....	21
Figura 4. Sistema de Separación-de Crudo. <sup>2</sup> .....	21
Figura 5. Diagrama Proceso Compresión a Reinyección. <sup>2</sup> .....	22
Figura 6. Ubicación Aeroenfriadores de gas de proceso de turbinas NP <sup>2</sup> . .....	24
Figura 7. Estrategias del mantenimiento.....	32
Figura 8. Desgaste adhesivo .....	35
Figura 9. Desgaste Erosivo.....	36
Figura 10. Desgaste Corrosivo .....	36
Figura 11. Desgaste Abrasivo.....	36
Figura 12. Desgaste por fatiga superficial.....	37
Figura 13. Lubricación Limite .....	38
Figura 14. Lubricación mixta .....	39
Figura 15. Lubricación HD .....	39
Figura 16. Lubricación EHL .....	40
Figura 17. Regla básica para selección del lubricante.....	41
Figura 18. Daño de motores eléctricos por sobre-lubricación.....	47
Figura 19. Curva P-F. ....	55
Figura 20. Ventaja de emisiones acústicas.....	65
Figura 21. Costo cambio rodamientos 2013 Vrs Costo del objetivo propuesto (Anual). ....	77
Figura 22. Mantenimiento Correctivo Programado Vrs Predictivo (Anual).....	77
Figura 23. Partes del motor eléctrico. ....	83
Figura 24. HE-1802/2802/3802.....	84
Figura 25. HE-1801/2801/3801.....	84

Figura 26. Componentes de un rodamiento.....	85
Figura 27. Rodamiento rígido de bolas. ....	86
Figura 28. Rodamiento de bolas a rotula. ....	86
Figura 29. Rodamiento de contacto angular. ....	87
Figura 30. Rodamiento de rodillos cilíndricos. ....	88
Figura 31. Rodamiento de agujas. ....	88
Figura 32. Rodamiento de rodillos a rotula. ....	89
Figura 33. Rodamiento de rodillos cónicos. ....	89
Figura 34. Rodamientos axiales de bola y rodillo.....	90
Figura 35. Etapas que afectan la vida útil de los rodamientos. ....	91
Figura 36. Disposición de los rodamientos en el motor. ....	91
Figura 37. Características del rodamiento 6312/C3.....	92
Figura 38. Características del rodamiento 6315/C3.....	93
Figura 39. Características del rodamiento NU312 ECP.....	93
Figura 40. Características del rodamiento NU315 ECP.....	94
Figura 41. Placa del motor con características de re-lubricación.....	95
Figura 42. Ficha técnica de la grasa Shell Albania 3. ....	97
Figura 43. Características de la grasa Unirex 3.....	98
Figura 44. Ultra probe 9000. ....	102
Figura 45. Calibrar el equipo a 40 KHz. ....	108

## RESUMEN

**TITULO:** MODELO PARA IMPLEMENTAR ESTRATEGIA DE LUBRICACIÓN CON EMISIONES ACÚSTICAS A AEROENFRIADORES DE GAS DE PROCESO DE LAS TURBINAS DE REINYECCIÓN DE GAS DEL CPF CUPIAGUA.

**AUTORES:** Carlos Francisco Moreno Dorado.  
Oscar Ricardo Urbina Garzón.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo, lubricación correctiva, lubricación preventiva, lubricación predictiva.

### DESCRIPCIÓN:

El sector industrial va en crecimiento y el desarrollo de una sociedad consumista, que se hace cada día más exigente con la calidad de los bienes ofrecidos, la responsabilidad social y ambiental, se hace necesario crear estrategias y programas que mejoren la calidad de vida.

Uno de los grandes retos que tienen las empresas nacionales en la actualidad, es diseñar e implementar sistemas de lubricación predictiva en sus procesos de producción, con esto lograr un nivel competitivo que le permita surgir y liderar el mercado global.

Con el anterior fin, se diseñó el plan de lubricación predictiva, en base a las diferentes fallas del sistema y evaluando las diferentes soluciones, que cumplan con los objetivos de incrementar la productividad, partiendo de la optimización de la lubricación de los equipos y asegurando una disminución de riesgos que conlleven a incidentes o accidentes en personas.

El uso de nuevas tecnologías en la prolongación de la vida útil de los rodamientos de estos equipos, son garantía de tener procesos más confiables y eficaces asegurando así la disponibilidad de los aeroenfriadores y reduciendo el empleo de personal técnico para tareas no programadas de mantenimiento correctivo.

El empleo eficiente de grasas y lubricante reduce el daño medioambiental que tanto nos afecta la dosificación precisa de estos economiza recursos que pueden ser utilizados para otro fin; la constante capacitación del personal técnico de termina la competencia a la hora de toma de decisiones

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad De Ingenierías Físico –Mecánicas. Escuela De Ingeniería Mecánica. Especialización En Gerencia De Mantenimiento. Director. Carlos Borrás Pinilla.

## SUMMARY

**TITLE:** IMPLEMENTING LUBRICATION STRATEGIES MODEL WITH ACOUSTIC EMISSION OF GAS AIR COOLERS OF PROCESS OF REINJECTION GAS TURBINES OF CUPIAGUACPF.\*

**AUTHORS:** Carlos F Moreno D., Oscar Ricardo Urbina \*\*

**KEYWORDS:** corrective maintenance, preventive maintenance, predictive maintenance, corrective lubrication, preventive lubrication, predictive lubrication

### DESCRIPTION:

The industrial sector is on the growth and development of a consumer society that increasingly demanding day is done with the quality of goods offered, social and environmental responsibility, it is necessary to create strategies and programs to improve the quality of life.

One of the great challenges facing national firms at present, is to design and implement predictive lubrication systems in their production processes in order to achieve a competitive level where it can arise and lead the global market.

Under the previous order, the predictive lubrication plan was designed, based on the various system failures and evaluating the different solutions that meet the objectives of increasing productivity, based on the optimization of equipment lubrication and ensuring reduce risks that lead to incidents or accidents in people.

The use of new technologies in prolonging the lifespan of the bearings of these teams are guaranteed to have more reliable and efficient processes and ensuring the availability of air coolers and reducing the use of technical staff to work unscheduled corrective maintenance.

The efficient use of lubricating fats and reduces environmental damage that affects us both precise dosage of these saves resources that can be used for other purposes; constant training of technical staff competition ends when making decisions

---

\*Degree Work

\*\*Faculty of Physical Engineering -Mecánicas. School Of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Head teacher. Carlos Borrás Pinilla.

## INTRODUCCIÓN

Las empresas hoy en día, se están preparando para competir en nuevos mercados a partir de mejoras en los sistemas productivos y administrativos, con nuevas estrategias de mercadeo.

Por tal motivo la lubricación y en general el mantenimiento de los equipos, a veces queda relegado, prestándoles poca atención, cuando estos son parte clave y su adecuado tratamiento asegura la calidad, genera beneficios como la optimización de producción, disminución de fallas, disminución de costos, mayor ciclo de vida de los equipos y garantiza las políticas sobre seguridad industrial, salud, medio ambiente.

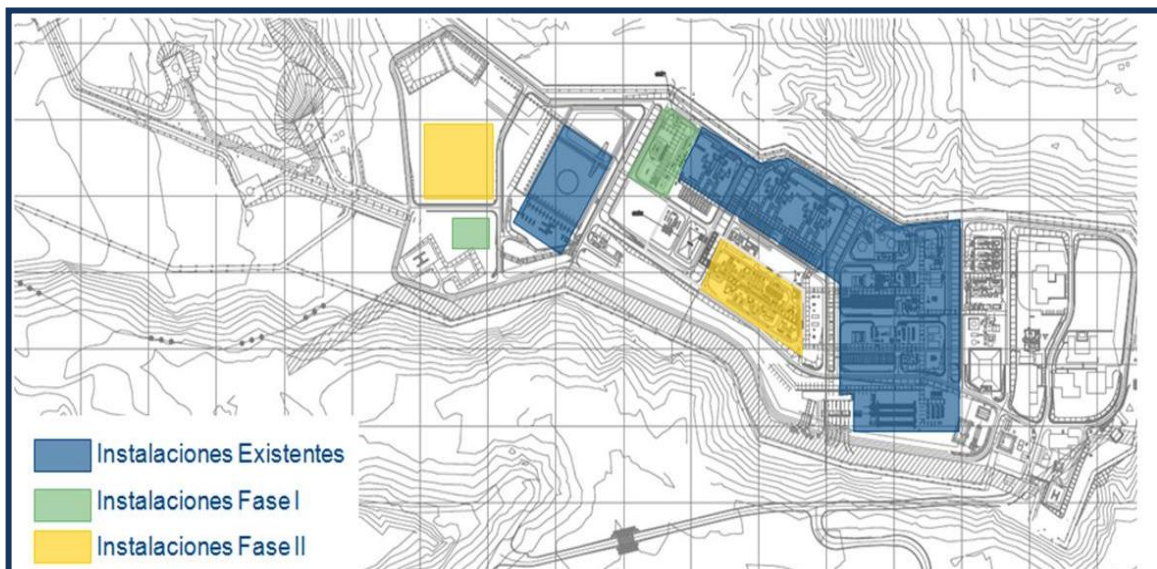
Una difícil tarea del mantenimiento en la actualidad por la evolución de los equipos a lubricar, de los mismos lubricantes y de la poca experiencia o formación del personal encargado, es la escogencia del lubricante adecuado, de la cantidad que se debe reponer y la frecuencia con la que se debe realizar el re-engrase.

En este trabajo se quiere optimizar la productividad de los equipos y minimizar los riesgos en seguridad, salud e impacto ambiental. Se realiza un diagnóstico de la problemática en el campo de la lubricación del área asignada a implementar el diseño de lubricación con ayuda de equipo de emisiones acústicas, conociendo los equipos a lubricar, los elementos a lubricar, calculando la cantidad de grasa a reponer, homologando la grasa a usar según fabricante por la marca de grasa usada en la planta, calcular la frecuencia a que se debe re-engrasar, además de conocer la técnica de emisiones acústicas y realizar el procedimiento adecuado para una correcta re-lubricación de los equipos y finalmente presentar unas conclusiones en donde se verifica el cumplimiento de los objetivos trazados.

## 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL CPF CUIAGUA

Figura 1. Plano del campo, CPF Cupagua<sup>2</sup>



Fuente: DIANA PICO, FREDY JIMENEZ, ECOPEPETROL Reporte de Cambios Operacionales. 2010.

En la ciudad de Aguazul Casanare, está ubicada la vicepresidencia de producción-GERENCIA NORORIENTAL (CPF Cupagua)<sup>1</sup>.

La Planta tiene una capacidad de diseño de producción de 220.000 Barriles de Crudo día (BOPD), y de 1.449 Millones de pies cúbicos día (MMSCFD) de gas. Esta Planta entró en operación en el año 1999<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> RODRÍGUEZ M, Orlando; TORRES BELTRÁN, Alexander y TURCA RODRÍGUEZ, Wilson. Estrategia de mantenimiento para la nueva planta de gas de Ecopetrol S.A en el CPF Cupagua. Monografía de Grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2012. 108 p.

<sup>2</sup> DIANA PICO, FREDY JIMENEZ, ECOPEPETROL Reporte de Cambios Operacionales. 2010.

La estructura de formación del Campo Cupiagua tiene 24 km de longitud y de 3 km de ancho, compuesta por 43 pozos, 31 de ellos productores y 12 inyectores; en la cabeza de los pozos se tiene una presión promedio de 900 psig<sup>1</sup>.

El Crudo sale de los pozos a través de (5) líneas Troncales que recoge el crudo de los (31) pozos y los transporta al CPF, éste llega al CPF en sus tres fases (gas, crudo, agua), a una presión de 685 psig; el transporte del mismo se hace a través de líneas de flujo de 16" y 20", y el flujo desde la cabeza del pozo al CPF se hace de forma natural, debido a que a cada pozo le llega gas de inyección a una presión de 5870 psi, que lo que hace es impulsar el Crudo desde el Yacimiento al CPF.

La figura 2 muestra como en el CPF, el Crudo es recibido por un Sistema Recolector que consiste en un Slug Catcher<sup>1</sup>, éste tiene dos vasijas dedicadas cada una a un cabezal de producción, las cuales separan los fluidos de entrada en gas y líquidos, y las tuberías de almacenamiento de líquidos para manejar los baches generados en las líneas troncales.

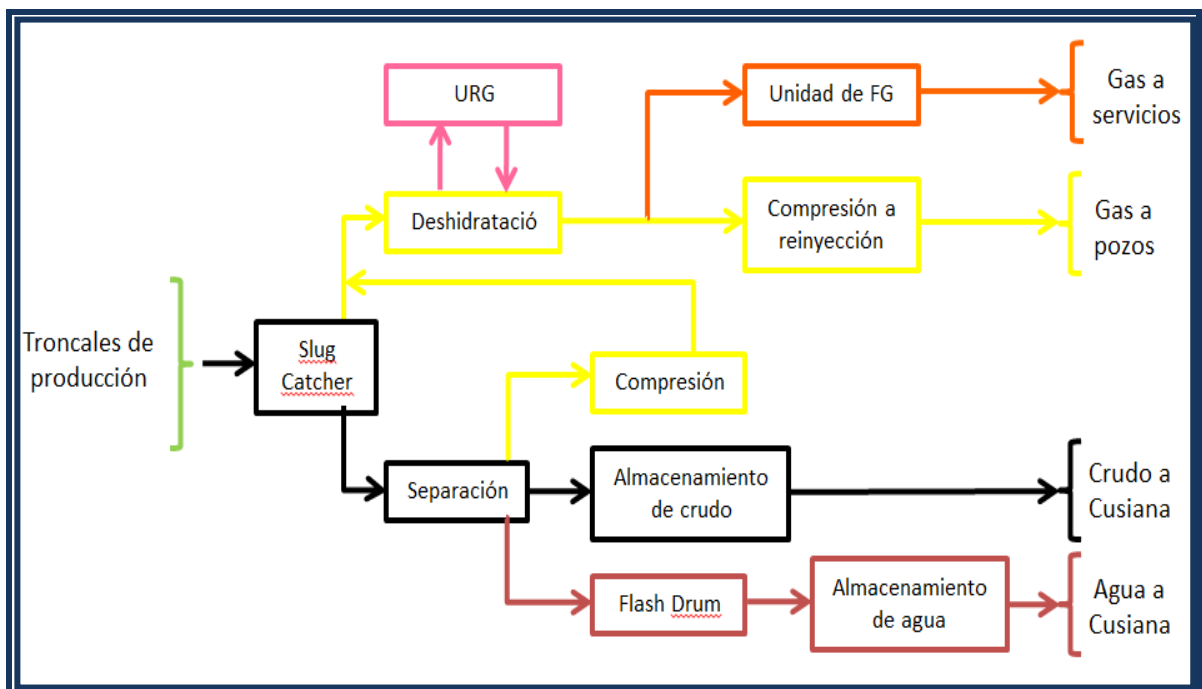
El Gas separado va por una parte al Sistema de Tratamiento de Gas a una presión aproximada de 700 psi y por la otra el "Crudo y el Agua" van al Sistema de Separación de crudo.

El gas, que sale del Slug Catcher, ver figura 3 y del Sistema de Separación, los cuales son llevados al Sistema de Deshidratación a tratamiento del Gas donde se produce gas limpio y seco para ser llevado al Sistema de Reinyección de gas.

El Sistema de Separación<sup>1</sup> de Crudo incluye dos trenes de separación idénticos con un calentador de petróleo crudo, tres etapas de separación bombas de recirculación de crudo y enfriadores. El Crudo separado es medido y almacenado ó transportado directamente a Cusiana, ver figuras 2 y 4.

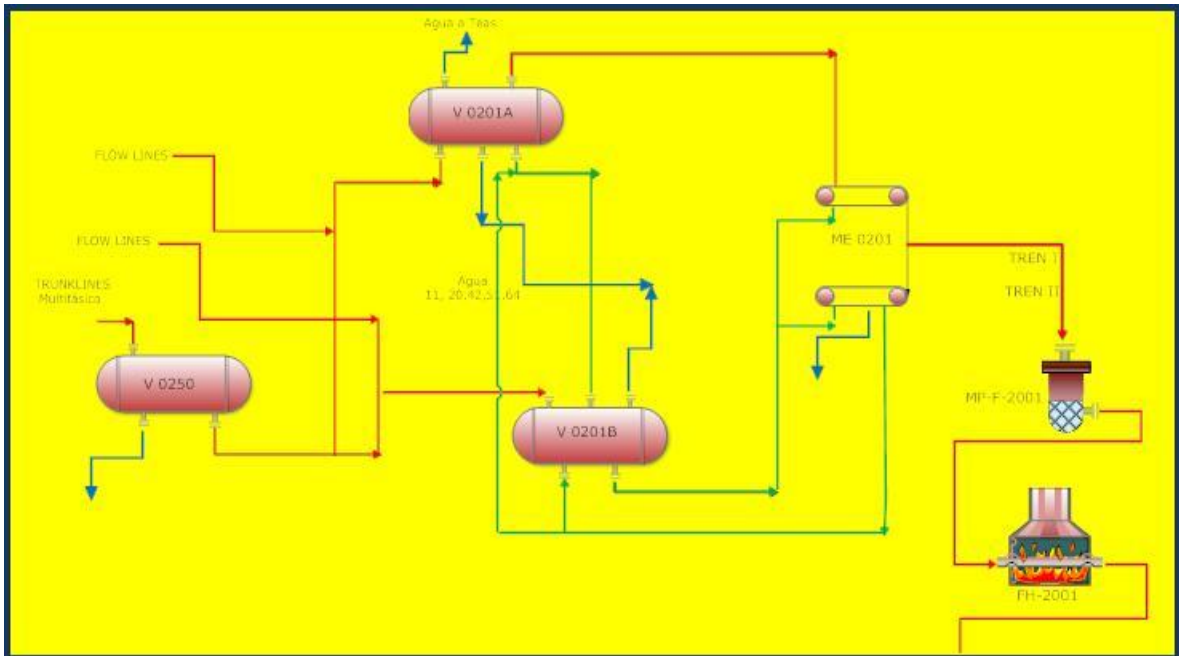
El sistema de Compresión de Gas de Reinyección incluye tres trenes, (3) de media y (3) de alta presión, ver figuras 3, 4 y 5. Los gases provienen de las vasijas de entrada al slug cácther y de los gases comprimidos por el compresor de gas de proceso. Cada compresor comprime 483 millones de pies cúbicos de gas con una descarga final de 6285 psig, donde es reinyectado nuevamente a los pozos, para cerrar el ciclo e impulsar en el yacimiento el Crudo multifásico que se extrae y retorna al CPF.

**Figura 2. Diagrama de bloques del proceso Cupiagua<sup>2</sup>**



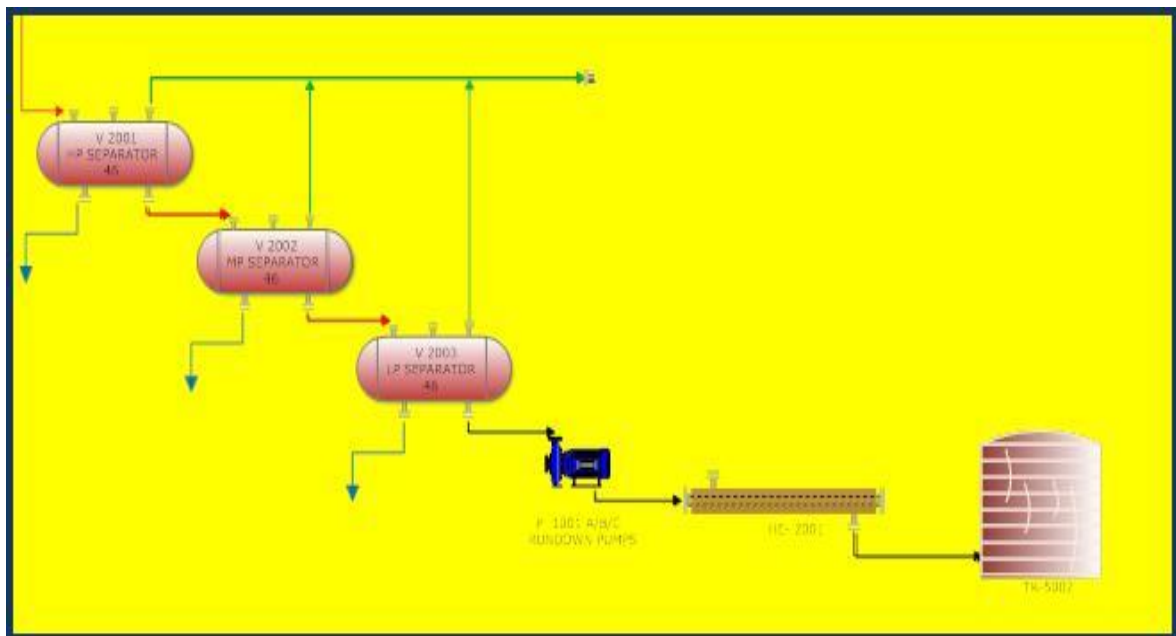
Fuente: Archivos de ECOPETROL, Tablero de control

**Figura 3. Sistema de Separación-Slug Catcher. <sup>2</sup>**



Fuente: Archivos de ECOPETROL, Tablero de control

**Figura 4. Sistema de Separación-de Crudo. <sup>2</sup>**



Fuente: Archivos de ECOPETROL, Tablero de control

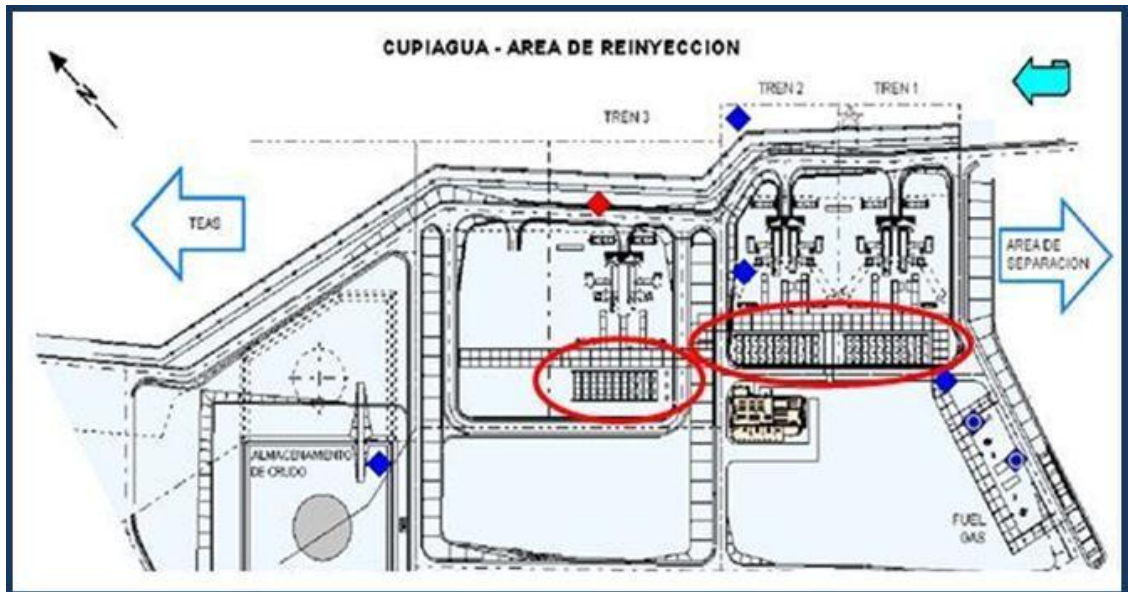


- Realizar un procedimiento adecuado para la re-lubricación correcta de los rodamientos de los motores, usando como ayuda equipo de emisiones acústicas.
- Realizar seguimiento al indicador de emergencias después de implementada esta estrategia para ver el resultado conseguido.
- Realizar implementación en todos los equipos de la planta de ser positivo el diseño.

### **1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.**

En el CPF de Cupiagua, más específicamente en los motores eléctricos de los aerofriadores de gas de proceso de las turbinas de reinyección, se viene presentando un ciclo muy corto en la vida útil de servicio, en los rodamientos de rodillos cilíndricos, instalados en el lado acoplado de los motores, estos son rodamientos abiertos; primero porque existía una rutina de lubricación en donde se le colocaba demasiada o poca grasa a los alojamientos de los rodamientos, lo que incrementaba la temperatura, este echo hacia que la grasa se separara (jabón de litio de la base lubricante) y el lubricante se perdía al ambiente y/o a partes internas del motor, originando la falla, los rodamientos de bolas del lado libre les acontecía lo mismo, por lo que se comenzaron a cambiar los rodamientos abiertos (z), por rodamientos sellados (zz), que tienen una vida útil más larga o mayor durabilidad por su condición de sellado, pero aun así el problema con cambio de rodamientos de los motores tiene un porcentaje considerable (33.3% en lo que va recorrido del 2013) como muestra la tabla 1.

Figura 6. Ubicación Aeroenfriadores de gas de proceso de turbinas NP<sup>2</sup>.



Fuente: Archivos de ECOPEPETROL

Tabla 1. Cambio de rodamientos por año.

COOLERS PROCESO DE GAS TURBINAS NP				
TAG	CANTIDAD MOTORES	CAMBIO RODAMIENTOS		
		2011	2012	2013
CA-HE-1801 A/N	14	3	5	5
CA-HE-1802 A/D	4	1	1	1
CB-HE-2801 A/N	14	4	5	4
CB-HE-2802 A/D	4	1	1	1
CC-HE-3801 A/N	14	5	3	5
CC-HE-3802 A/D	4	1	1	2
<b>TOTAL</b>	<b>54</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>18</b>
<b>% Mantenimientos al año</b>		<b>27,8%</b>	<b>29,63%</b>	<b>33,3%</b>

Fuente: CMMS Ecopetrol GNO.

Esta condición de los rodamientos, ocasiona baja confiabilidad de los equipos impactando la seguridad de las personas por incrementarse los trabajos de alto riesgo (trabajos en altura y nocturnos), impacta los indicadores de metas de la empresa por volverse trabajos no planeados ni programados por ser equipos críticos (por atender estos equipos como prioridad 0 o 1 se deja de realizar la estrategia programada, el cual es un indicador contractual de las metas, siendo la empresa penalizada por esto) y se incrementa el costo del mantenimiento por cuanto se requiere de personal extra, trabajando turno de noche, se aumenta el costo por repuestos y reparaciones generales del motor por daño en devanados.

#### **1.4 JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE LUBRICACIÓN**

Toda empresa hoy en día, presenta gran interés y preocupación, en mejorar todo lo concerniente a la seguridad industrial, salud y medio ambiente, por esta razón, este modelo a implementar, busca minimizar los riesgos y condiciones inseguras que puedan ocasionar daño a la salud física de las personas y a los activos de la empresa ocasionándole a esta, pérdidas humanas, multas y sanciones, esto referente a que con esta implementación se reducirían los trabajos en alturas que en la industria están catalogados como trabajos de alto riesgo por el índice de accidentalidad con lesiones graves e incluso muertes.

Otro enfoque dado al modelo de implementación de la estrategia de lubricación con ayuda de emisiones acústicas, para proporcionar la grasa adecuada a los rodamientos en motores eléctricos de los aeroenfriadores de proceso de las turbinas de reinyección de gas en el CPF Cupiagua, es el de minimizar los costos de mantenimiento y producción. Los trabajos no programados generan horas hombre adicional, consecución de herramientas especiales, mayores costos en repuestos y pérdidas de operatividad del equipo.

La combinación de técnicas de mantenimiento predictivo, es una estrategia a las que están apuntando las empresas clase mundo, con el fin de lograr altos estándares de confiabilidad en las plantas y procesos, con la implementación de esta técnica de emisiones acústicas no solo se mejorara la lubricación de los equipos sino que se mejorara la predicción de las fallas en los rodamientos, puesto que el ultrasonido las detecta incluso antes que la técnica de vibraciones.

La implementación de técnicas de mantenimiento predictivo en un corto plazo, son muy costosas por el valor de los equipos que se requieren y por la capacitación del personal, en este modelo a implementar, el costo sería bajo puesto que la empresa posee ya un equipo de emisiones acústicas, (Ultra-pro 9000) y que en este momento no presta ningún servicio y se tiene dos técnicos capacitados con certificación en este método, por esto, implementar esta estrategia sería sacarle provecho a un equipo costoso que no está prestando utilidad al mantenimiento y aprovechar la experiencia del personal en pro de minimizar los riesgos laborales, costos de mantenimiento y pérdida de funcionalidad del equipo.

## **2. ANÁLISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA**

### **2.1 ESTUDIOS SIMILARES REALIZADOS EN LA INDUSTRIA.**

En su monografía Adriana Acevedo<sup>3</sup>, expone temas interesantes como lo es el inicio del mantenimiento en la industria, como se va mejorando a través de sus generaciones y con el avance de nuevas tecnologías, como se rompieron paradigmas y como el mantenimiento dejó de ser visto como un gasto para convertirse en un engranaje fundamental de los procesos, yendo de la mano con la producción y otros departamentos para ir en pro de la gestión de activos de las empresas.

El mantenimiento predictivo nace en la tercera generación con la necesidad de dar mayor disponibilidad a los equipos, mejorando la seguridad y el impacto ambiental y la calidad del producto y de la mano nace la confiabilidad realizando datos estadísticos en busca de patrones de falla, buscando mayor durabilidad de los equipos con análisis de FMECA y FMEA<sup>3</sup>.

Con el avance de las tecnologías se da lugar a la localización de fallas con el equipo en operación como: termografía, ultrasonido, análisis de vibraciones, análisis de aceite, etc. También se realiza monitoreo a los parámetros operacionales de los equipos.

---

<sup>3</sup> RUIZ ACEVEDO, Adriana María. Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo. Monografía de Grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2012. 130 p.

Esta monografía muestra cómo impacta cada mantenimiento en los costos a largo, mediano y corto plazo, el correctivo es menos costoso a corto plazo pero a largo plazo se incrementan los costos y el mantenimiento predictivo es la evolución del preventivo pero a largo plazo y la efectividad es inversamente proporcional, siendo el preventivo mucho más costoso. También describe las diversas técnicas de mantenimiento predictivo, concluyendo que con una sola técnica no es suficiente para tener una buena asertividad de los resultados obtenidos, se deben combinar varias técnicas para lograr resultados óptimos.

Una buena guía para estudiar mejor la propuesta para la solución del problema planteado, fue la monografía de Javier Mauricio Mancilla<sup>4</sup>, en donde se da gran ilustración acerca de la lubricación en el mantenimiento.

Describió la manera como realizar la evaluación de la lubricación de una empresa, para encontrar los diversos problemas que afectan el correcto funcionamiento de los equipos, para sustentar la necesidad de implementar una estrategia de lubricación productiva que ayude a minimizar el desgaste anormal de los equipos y la reducción de costos de lubricación y mantenimiento. Lo anterior basado en un programa de:

- Lubricación correctiva.
- Lubricación preventiva.
- Lubricación predictiva.
- Lubricación proactiva.
- Gestión ambiental.
- Capacitación del personal.

---

<sup>4</sup> MANCILLA VIZCAYA, Javier Mauricio. Diseño e implementación del plan de lubricación productiva para la empresa Fliber Glass Colombia S.A planta Mosquera. Monografía de Grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2004. 181 p.

Mancilla también muestra la manera de seleccionar el lubricante correcto, la manera de aplicarlo, la frecuencia con que se debe re-lubricar y los componentes que el lubricante debe tener para ser el apropiado.

## **2.2 INVESTIGACIONES REALIZADAS DEL TEMA.**

**2.2.1. El mantenimiento.** El mantenimiento se define como, el conjunto de actividades que deben realizarse a instalaciones o equipos con el fin de corregir o prevenir fallas, buscando que estos continúen prestando la función para el cual fueron diseñados.

El mantenimiento ha sido desde el inicio de la industria, parte fundamental del desarrollo y ha venido evolucionando poco a poco, rompiendo paradigmas creados desde sus inicios, gracias a su apoyo en herramientas creadas para y por otras dependencias de la empresa, que le ha permitido llegar a ser parte fundamental del engranaje de mejora continua y a ser visto hoy en día, no solo como un grupo que genera gastos y pérdidas sino como un grupo que trabaja para mejorar la gestión de los activos.

Según la norma de gestión de activos, PAS 55, significa: *“Todas aquellas actividades y practicas sistemáticas y coordinadas a través de las cuales una organización administra de manera óptima sus activos y el comportamiento de estos, riesgo y gastos durante su vida útil, con el propósito de alcanzar su plan estratégico organizacional”.*

Los objetivos fundamentales del mantenimiento son:

### **2.2.1.1 Reducir costos de producción:**

- Optimizar la disponibilidad de instalaciones y equipos para la producción.

- Reducir los costos de las paradas de producción, ocasionada por el deficiente mantenimiento de equipos, mediante la aplicación de una determinada cantidad de mantenimiento, en los momentos más apropiados.
- Incrementar la vida útil de los equipos.
- Garantizar la seguridad industrial.
- El objetivo más importante desde el punto de vista humano es garantizar con el mantenimiento la seguridad operacional de los equipos.

**2.2.2. Evolución del mantenimiento.** En el comienzo de la industria, cuando nacen los procesos de producción mecanizados, para la fabricación de bienes a gran escala, lo que obliga a que esta dependiera de un adecuado funcionamiento de estas máquinas. Sin embargo, el mantenimiento era considerado como una actividad sin importancia y que generaba gastos.

En la evolución del mantenimiento, se habla de las generaciones que han marcado el desarrollo y mejora desde su inicio.

Como los autores no se han puesto de acuerdo con los años de inicio y terminación de dichas generaciones, este documento se basa en el libro de John Moubray, "Reliability Centred Maintenance", Industrial Press, NY 1997.

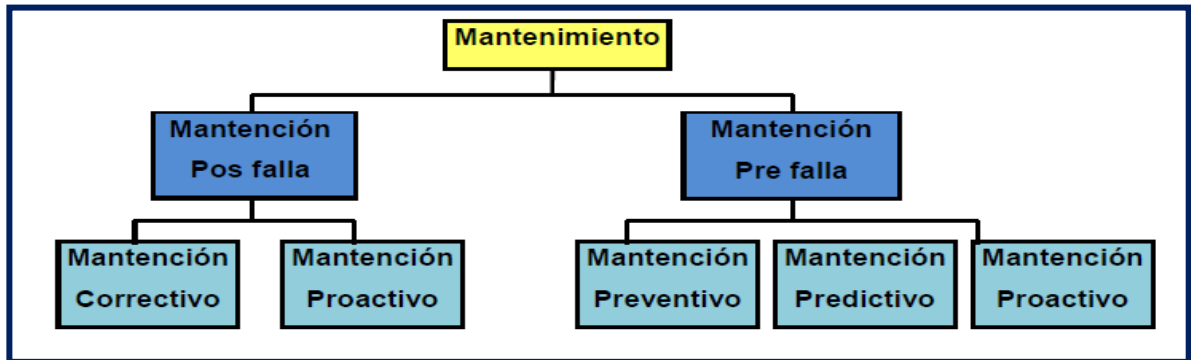
Tabla 2. Generaciones del mantenimiento.

Aspectos de mantenimiento	Comportamiento 1era generación (I Guerra Mundial - 1950)	Comportamiento 2da generación (1950 - 1970)	Comportamiento 3era generación (1970 - 2000)	Comportamiento 4ta generación (2000 - presente)
Expectativas del mantenimiento	Repare equipos cuando estén rotos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipos con mayor disponibilidad</li> <li>- mayor duración de los Equipos</li> <li>- Bajos costos de mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipos con mayor disponibilidad y confiabilidad.</li> <li>- Incremento en la seguridad</li> <li>- Sin daño al ambiente</li> <li>- Mejor calidad de producto</li> <li>- Mayor duración de los equipos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipos con mayor disponibilidad y confiabilidad</li> <li>- Incremento en la seguridad</li> <li>- Sin daño al ambiente</li> <li>- Mejor calidad de producto</li> <li>- Mayor duración de los equipos</li> <li>- Mayor Costo – Efectividad</li> <li>- Manejo del Riesgo (legislación, procedimientos, entrenamientos, equipos para minimizar el riesgo, etc)</li> </ul>
Visión sobre la falla del equipo	Todos los equipos se desgastan	Todos los equipos cumplen con la "curva de la bañera"	Existen 8 patrones de falla	Fallas desde el punto de vista del error humano, error del sistema, error de diseño y error de selección (Confiabilidad Operacional)
Técnicas de mantenimiento	Todas las habilidades de reparación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mantenimientos mayores planeados y programados</li> <li>- Sistemas de planificación y control de los trabajos (PERT, Gantt, etc.)</li> <li>- Computadores grandes y lentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Mantenimiento predictivo</b></li> <li>- Diseño basado en confiabilidad y mantenibilidad</li> <li>- Estudio de riesgos</li> <li>- Análisis de modos de falla y sus efectos (FMEA, FMECA)</li> <li>- Pequeños y rápidos computadores</li> <li>- Sistemas expertos</li> <li>- Trabajo en equipo y apoderamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitoreo por condición</li> <li>- Diseño basado en confiabilidad y mantenibilidad</li> <li>- Estudio de riesgos</li> <li>- Análisis de modos de falla y sus efectos (FMEA, FMECA)</li> <li>- Pequeños y rápidos computadores</li> <li>- Trabajo en equipo y apoderamiento</li> <li>- Uso de técnicas especializadas (RCA, RCM, TPM, PMO, Modelamiento de confiabilidad, optimización de repuestos etc.)</li> <li>- ERP – módulos de mantenimiento</li> <li>- "Outsourcing"</li> <li>- Internet</li> </ul>

Fuente: MOUBRAY, John. Reliability Centred Maintenance, Industrial Press, NY 1997.

**2.2.3. Tipos de mantenimiento.** Para cumplir con los objetivos propuestos se definen los siguientes tipos de mantenimiento según la figura 7.

**Figura 7. Estrategias del mantenimiento.**



Fuente: GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ, Carlos Ramón. Principios de mantenimiento. Universidad Industrial de Santander.

Donde las estrategias de mantenimiento se dividen así<sup>5</sup>:

**2.2.3.1. Mantenimiento reactivo o correctivo:** En esta estrategia se permite a la maquina funcionar hasta la falla. En ese instante se realiza la reparación o cambio de ella.

**2.2.3.2. Mantenimiento preventivo o basado en tiempo:** En esta estrategia se interviene la máquina periódicamente, para inspeccionar y reemplazar componentes, aun cuando la maquina esté operando satisfactoriamente.

**2.2.3.3. Mantenimiento predictivo o basado en condición:** En esta estrategia de mantenimiento se evalúa la condición mecánica de la máquina y su evolución, mientras ella está funcionando, a través de los síntomas que ella emite el exterior,

<sup>5</sup> GONZALES BOHORQUEZ, Carlos Ramón, Principios de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander.

en base a esto se programa las necesidades del mantenimiento cuando se detectan problemas en ella.

El aumento de la vida operativa de una maquina a través de una estrategia de mantenimiento predictivo, indudablemente disminuye los costos de mantenimiento y aumenta la productividad de la planta.

**2.2.3.4. Mantenimiento proactivo:** en esta estrategia de mantenimiento se identifica y corrige las causas raíz de las fallas de la máquina. Se pretende maximizar la vida útil operativa.

**2.2.4. Mantenimiento Preventivo.** Con el fin de contrarrestar<sup>6</sup> las causas conocidas de fallas potenciales en instalaciones, equipos, sistemas de equipos flotillas y otros activos, es necesario planear algunas tareas para evitar que las funciones mencionadas anteriormente dejen de ejecutarse debido a fallas potenciales, a esta previsión se le denomina mantenimiento preventivo, el cual difiere del mantenimiento correctivo ya que este último normalmente se considera como el reemplazo, renovación, reparación parcial o general de los componentes de un sistema o equipo con el propósito de que este realice correctamente la función para la que fue creado. Las razones por las que se prefiere el mantenimiento preventivo frente a otros tipos de mantenimiento se describen a continuación:

- Reducción de las fallas prematuras por medio de limpiezas periódicas, ajustes y lubricación adecuada.
- En caso de que la falla no pueda mitigarse, las revisiones periódicas y las mediciones que se realicen pueden ayudar a reducir el impacto de la falla en el equipo o en la instalación en general.

---

<sup>6</sup> BORRAS PINILLA, Carlos, Mantenimiento Preventivo. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2013.

- Se puede controlar la degradación gradual de una función o un parámetro.
- El indicador más importante de una organización se ve mejorado cuando se implementa el mantenimiento preventivo, ya que los costos pueden ser no solo controlados sino disminuidos, por ejemplo, los costos en materiales o repuestos.

**2.2.4.1. La lubricación en el mantenimiento preventivo:** Para reducir las fallas prematuras en equipos, la adecuada lubricación hace parte primordial del mantenimiento preventivo.

La lubricación<sup>7</sup> es el procedimiento para reducir fricción entre dos superficies móviles, evitando el contacto metal-metal entre ellas, con esto se ahorra energía, disminuye el desgaste y optimiza la vida útil de los equipos.

Dependiendo de factores como la viscosidad del aceite, la cantidad aplicada, el método de lubricación y la frecuencia con la que se realiza, un mecanismo queda bien o mal lubricado.

- **La fricción:** es la oposición que presentan dos zonas materiales en contacto, durante el inicio, desarrollo y final del movimiento relativo entre ellas, conlleva a consumo de energía, generación de calor, desgaste y en algunos casos a fallas catastróficas.
- **Desgaste:** es la pérdida de material entre dos superficies que se encuentran en movimiento relativo y manifestándose como funcionamiento errático, siendo necesario en la mayoría de los casos sacar de servicio el equipo rotativo del cual hacen parte esencial y cambiarle las piezas defectuosas:

---

<sup>7</sup> ALBARRACIN AGUILLON, Pedro Ramón, Lubricación centrada en confiabilidad. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2012.

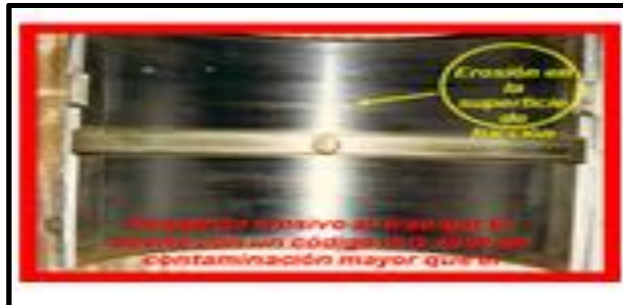
- ✓ **Desgaste Adhesivo:** Se presenta por el contacto metal-metal entre superficies del mecanismo lubricado, debido al adelgazamiento de la película lubricante, produce micro soldadura entre las asperezas. Figura 8.
- ✓ **Desgaste Erosivo:** Es la pérdida lenta de material en las rugosidades de las dos superficies que se encuentran en movimiento relativo, como resultado del impacto de partículas sólidas o metálicas en suspensión. Figura 9.
- ✓ **Desgaste corrosivo:** Se da como consecuencia de ataque químico en el proceso de degradación normal del aceite. Figura 10.
- ✓ **Desgaste abrasivo:** Se presenta por la presencia de partículas sólidas o metálicas en el aceite, siendo igual o de mayor tamaño que el espesor de la película lubricante y de la misma dureza o superior que las superficies metálicas del mecanismo lubricado. Figura 11.
- ✓ **Desgaste por fatiga superficial:** Puede verse reflejada por la aparición de micro picaduras en las superficies de los elementos en movimiento, es el resultado de elevados ciclos de tensión y compresión sobre las dos asperezas.

**Figura 8. Desgaste adhesivo**



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceites. Universidad Industrial de Santander.

**Figura 9. Desgaste Erosivo**



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceites. Universidad Industrial de Santander.

**Figura 10. Desgaste Corrosivo**



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceites. Universidad Industrial de Santander.

**Figura 11. Desgaste Abrasivo**



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceites. Universidad Industrial de Santander.

**Figura 12. Desgaste por fatiga superficial**



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceites. Universidad Industrial de Santander.

En la lubricación de cualquier mecanismo, se tienen varios tipos de situaciones:

- **Lubricación Límite o Solida:** Se da siempre que un mecanismo se pone en movimiento o se detenga, en este momento sobre las superficies metálicas solo hay adherida una película muy pequeña de lubricante, la cual impide que cuando estas se deslicen una sobre la otra, se produzca el contacto metal-metal y por ende se dé el desgaste adhesivo. Figura 13.
- **Lubricación Mixta:** Es la condición intermedia entre la lubricación limite y la hidrodinámica, una parte de la carga es soportada por la película limite que recubre las rugosidades de las superficies y la otra parte por la fluida o hidrodinámica, se da a medida que el mecanismo va incrementando su velocidad.

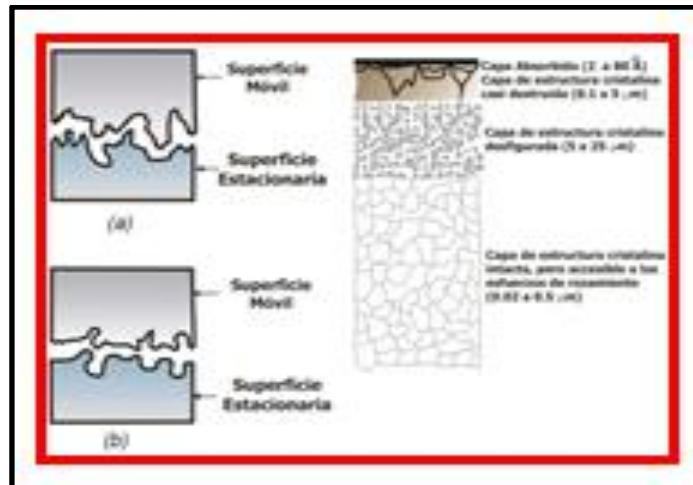
La incorrecta selección del aceite y la disminución de la viscosidad genera que el mecanismo quede trabajando bajo esta condición. Figura 14.

- **Lubricación Hidrodinámica o Fluida:** Cuando el mecanismo queda trabajando a su velocidad normal y si es lo suficientemente alta, las rugosidades de las dos superficies se separan completamente, flotando entre si, en este régimen la

velocidad del mecanismo es más influyente que la misma viscosidad del aceite.  
Figura 15.

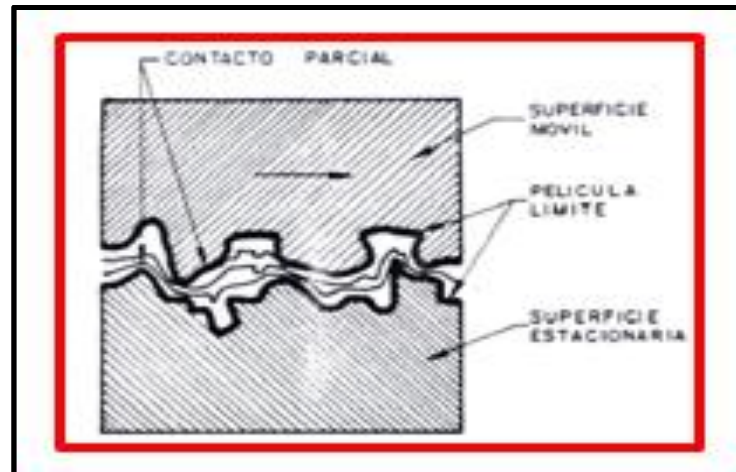
- **Lubricación Elastohidrodinámica:** En la industria existen mecanismos cuya carga es muy alta y la velocidad es muy baja, por tanto las superficies siempre interactúan entre sí, requiriéndose un lubricante de alta viscosidad y con aditivos que tengan la capacidad suficiente de formar una película sólida de resistencia al desgaste adhesivo mayor que la película que forma en los mecanismos que solo interactúan en el momento de arranque y parada, estos aditivos se conocen como de extrema presión (EP), cuya característica es soportar altas cargas de compresión y de esfuerzos cortantes sin que se rompa la película limite.

Figura 13. Lubricación Límite



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceites. Universidad Industrial de Santander.

**Figura 14. Lubricación mixta**



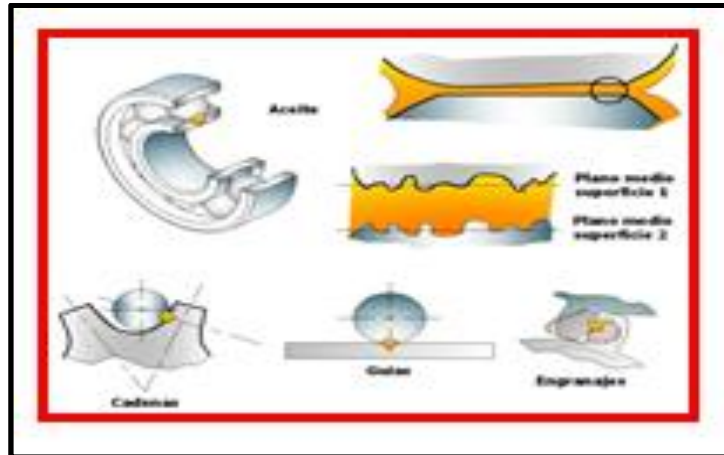
Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceites. Universidad Industrial de Santander.

**Figura 15. Lubricación HD**



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceites. Universidad Industrial de Santander.

**Figura 16. Lubricación EHL**



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceites. Universidad Industrial de Santander.

✓ **Lubricante:** Un lubricante es cualquier sustancia que al aplicarla entre dos superficies de fricción en movimiento, garantice que la fuerza de fricción sea lo más baja posible, además de esto debe cumplir con funciones como la de refrigerar, proteger, mantener la limpieza, sellar, entre otras.

- **Tipos de Lubricante:** Como lubricante podemos utilizar las siguientes sustancias:
  - Gases: Se emplean a presión con el propósito de formar un colchón entre los elementos en movimiento, su capacidad de soportar carga es muy bajo, el más utilizado es el aire.
  - Líquidos: Cualquier tipo de líquido se puede utilizar para lubricar, como es el caso del agua, el aceite mineral, vegetal, animal, sin embargo los más utilizados son los derivados del petróleo, constituidos por una base lubricante y un paquete de aditivos.

- Semisólidos: Son aquellas sustancias que poseen consistencia, para que esta película lubricante se sostenga más tiempo entre las zonas a lubricar, ejemplo es la grasa con un espesador metálico (jabón de litio, calcio, sodio).
- Sólidos: Además de que dan origen a películas lubricantes que se adhieren fuertemente a las superficies metálicas, como el grafito, bisulfuro de molibdeno, de flúor, silicona, boro y además permite que el coeficiente de fricción sea bajo.

✓ **Selección del Lubricante:** La selección correcta del lubricante se fundamenta en los aspectos de operación de los equipos y de acuerdo a:

- Velocidad.
- Temperatura.
- Carga.

Modifican las necesidades tanto de tipo básico, viscosidad, cantidad y tipo de aditivos para soportarlo.

**Figura 17. Regla básica para selección del lubricante.**



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceite. Universidad Industrial de Santander.

✓ **Métodos de Lubricación:** Existen muchas variedades de equipos para lubricar y por consiguiente muchos métodos, se debe escoger el que coloque el lubricante en el punto que se requiere, la cantidad apropiada y en la frecuencia correcta.

- Lubricación manual: Puede realizarse con una aceitera o una pistola engrasadora sobre el mecanismo, también se puede con brocha o en caso de lubricante asfáltico con espátula.
- Lubricación por salpique: En este tipo uno o varios de sus mecanismos se encuentran inmersos parcialmente en el aceite y lo salpican a todas las partes internas que conforman el equipo, se utiliza en mecanismos cerrados como reductores y compresores de pistón de simple efecto, es fundamental el correcto nivel de aceite.
- Lubricación por baño: Se utiliza en mecanismos donde el elemento encargado del salpique es bajo y por ello el flujo no es el correcto hacia los mecanismos, este sistema está conformado por una bomba que hace fluir el aceite desde un carter hasta un depósito superior y por unos ductos llega a los mecanismos a lubricar sin presión.
- Lubricación por circulación: Es el más adecuado para lograr una óptima lubricación, ya que forma una película lubricante con las mejores características y mantiene las piezas refrigeradas.

**2.2.4.2. Lubricación Centrada en Confiabilidad:** La lubricación<sup>7</sup> centrada en confiabilidad debe estar enmarcada en programas interdisciplinarios, que garanticen que todos los mecanismos lubricados, alcancen su vida de diseño, con costos bajos por consumo de energía y de mantenimiento.

- **Programas de la Lubricación Centrada en Confiabilidad:** Es una filosofía desarrollada dentro de un programa que permite evaluar el estado de la lubricación de los equipos rotativos y la eficacia de los programas de lubricación de la empresa.

❖ **Lubricación correctiva:** Evalúa que todos los equipos rotativos y los procesos relacionados con ellos, cuenten con los elementos necesarios para garantizar la correcta lubricación, los pasos para lograrlo son:

- Personal de lubricación.
- Cuarto de almacenamiento de lubricantes.
- Carta de lubricación.
- Rótulos metálicos para identificación del tipo de lubricante.
- Pancartas metálicas.
- Válvula de drenaje y tapón.
- Sistema de venteo.
- Indicador de nivel de aceite.
- Fugas de aceite.
- Aceiteras entre 1 y 5 galones.
- Pistolas engrasadoras.
- Graseras en los mecanismos lubricados con grasa.
- Carro portátil de lubricación.
- Equipo de filtración portátil para el trasiego de aceites nuevos.
- Guardas metálicas para cadenas.
- Caseta para almacenamiento de lubricantes.
- Licitación de lubricantes y estandarización de marcas de lubricantes.

❖ **Lubricación predictiva:** Evalúa los programas preventivos que la empresa está siguiendo sistemáticamente, para la aplicación de lubricantes a los mecanismos de los equipos críticos, esenciales y de propósito general, los pasos son:

- Clasificación de los equipos rotativos.
- Lubricación de mecanismos de los equipos.
- Cambio de elementos filtrantes de aceite.
- Toma de muestras de aceite.
- Software para programar la lubricación.

- ❖ **Lubricación predictiva:** Evalúa las metodologías utilizadas por la empresa para lubricar los componentes de los equipos rotativos, por condición y las rutas establecidas con este propósito, los pasos son:
  - Inclusión de los equipos en las rutas de monitoreo.
  - Instrumentos y equipos para monitoreo de la condición del lubricante, vibración y temperatura.
  - Definición y señalización de los puntos de monitoreo en los equipos.
  - Selección de los puntos de toma de muestra de aceites y montaje de facilidades.
  - Implementación de las rutas tribológicas.
  - Implementación de ruta de confiabilidad.
  - Cambio de filtros de aceite por conteo de partículas.
  - Pre-filtración de aceites nuevos.
  - Filtración y diálisis de aceite usado.
  - Limpieza interna de máquinas.
  - Flushing a los sistemas de lubricación.
  - Informe de confiabilidad y disponibilidad de máquinas.
  - Auditoria interna de lubricación.
  
- ❖ **Lubricación proactiva:** Evalúa los programas que la empresa esté desarrollando en ingeniería de lubricación, para mejorar la lubricación de los equipos rotativos críticos y esenciales, con base en los datos recopilados durante el desarrollo de la ruta tribológica y de confiabilidad, los pasos son:
  - Sistemas de lubricación nuevos o automáticos.
  - Sensores de temperatura en sitio y en línea.
  - Sistemas de enfriamiento de aceite.
  - Implementación de sistemas de filtración de aceites.
  - Implementación de lubricantes sintéticos.
  - Implementación de programas de ahorro de energía por menor fricción.

- ❖ **Gestión ambiental:** Se evalúa que está haciendo la empresa con los aceites usados y se especifican los pasos y técnicas que se deben implementar para prolongar su vida útil o para desecharlos sin que impacten negativamente al ambiente, los pasos son:
  - Programas para incrementar la vida de servicios de los aceites.
  - Diálisis de aceite usado.
  - Recolección de aceites usados.
  - Punto ecológico y biodegradación de los aceites usados.
  
- ❖ **Capacitación en lubricación y confiabilidad:** Especificar los programas de capacitación en tribología, lubricación y confiabilidad, que la empresa debe desarrollar para su personal de mantenimiento, lubricación y proceso, los pasos son:
  - Evaluar periódicamente los conocimientos.
  - Charlas periódicas sobre actualización en lubricación.
  - Programa para autoformación y certificación en lubricación.
  - Seminarios sobre lubricación básica y avanzada.
  
- **Lubricación en motores eléctricos:** La mayoría de los motores eléctricos son diseñados con rodamientos antifricción, lubricados con grasa. La grasa es la sangre de los rodamientos, proporciona una película de aceite lubricante que evita el contacto metal-metal, entre los elementos rodantes y las pistas.

El 65% de fallas en motores eléctricos son por daño en rodamientos y estos a su vez por prácticas deficientes de lubricación, Esto incluye selección incorrecta de lubricante, contaminación, falta de lubricante o sobre-engrasado.

Las fallas más comunes en motores eléctricos, por prácticas inadecuadas de lubricación son:

- ❖ **Lubricante incorrecto:** Es importante utilizar la grasa correcta para aplicaciones específicas. Reengrasar con la grasa equivocada puede llevar a falla prematura del rodamiento. La mayoría de los proveedores de aceite tienen grasas diseñadas específicamente para motores eléctricos, la cual es diferente de sus grasas multipropósitos de extrema presión (EP).
- ❖ **Incompatibilidad de Grasa:** Las grasas se hacen con diferentes espesantes, como el litio, calcio o poliuria. Desafortunadamente, no todas las grasas son compatibles con las otras, incluso aquellas con el mismo tipo de espesante. Por lo tanto, es importante que utilice la misma grasa o un sustituto compatible durante toda la vida del rodamiento.
- ❖ **Carcasa del Motor Llena de Grasa:** Si la cavidad de grasa está llena en exceso y se aplica alta presión con la pistola de engrasado, el exceso de grasa puede encontrar un camino entre el eje y la tapa interior del rodamiento y pasar al interior del motor. Esto hace que la grasa cubra los devanados extremos del sistema de aislamiento y puede causar fallas tanto del aislamiento del embobinado como del motor.
- ❖ **Carencia de Lubricante:** Hay varias posibles causas de falta de lubricación. La primera es que no se haya agregado suficiente grasa durante la instalación. La segunda es que se tengan intervalos de lubricación prolongados, inapropiados. La tercera involucra la posibilidad de que el aceite se haya separado del espesante base debido a excesivo calentamiento.
- ❖ **Sobre-presurización del Alojamiento del Rodamiento:** En cualquier momento en que hay sobre-presurización en el alojamiento del rodamiento, se aplican esfuerzos en partes que no han sido diseñadas para manejar tal presión. Tenga en mente que una pistola estándar de engrasado manual puede producir presiones de hasta 15,000 psi.
- ❖ **Sobre-calentamiento Por Exceso de Grasa:** Demasiado volumen de grasa provocará que los elementos del rodamiento batan la grasa, tratando de sacarla de su camino. Esto da como resultado pérdidas de energía, altas

temperaturas de operación, incremento del riesgo de separación de aceite y falla del rodamiento.

**Figura 18. Daño de motores eléctricos por sobre-lubricación.**



Fuente: ALBARRACÍN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo tribología y análisis de aceite. Universidad Industrial de Santander.

- **Frecuencia de re lubricación de rodamientos:** Hay varios métodos para determinar el ciclo (frecuencia) de re-engrase. Es importante estar consiente que ningún método proporcionará una solución mágica a los problemas de la planta. Hay múltiples tablas, cálculos y cartas disponibles que pueden proveer un buen punto de inicio. Pueden utilizarse para determinar cómo establecer los ciclos. El afinado final, sin embargo, debe hacerse por el método de prueba y error. Los factores que la mayoría de las calculadoras tienen en común son la carga, tiempo de operación, tipo de rodamiento, temperatura, ambiente de operación y velocidad.
- **Cantidad de grasa adecuada:** El control del volumen de grasa ha sido un problema permanente para la industria, y puede ser insuficiente el solo seguir las recomendaciones del fabricante original del equipo para resolver este problema. Hay una ecuación simple que toma un enfoque lógico para determinar el volumen de grasa a aplicar. La fórmula es:

$$G = 0.005 \times D \times B$$

En donde

G = la cantidad de grasa en gramos,

D = el diámetro exterior en milímetros y

B = el ancho del rodamiento en milímetros.

Una vez que se encuentre el volumen de grasa, debe ser convertido en bombazos de la pistola de engrase. Hay un método para obtener este número; para esto el usuario necesitará la pistola a emplear y una báscula postal. Una vez que encuentre la cantidad total de grasa que la pistola de engrasado aplica por cada bombazo, etiquétela para identificar que ha sido “calibrada”.

- **La Grasa:** Una grasa es un producto sólido o semifluido, constituido por la dispersión de un agente espesante en un lubricante líquido, otros ingredientes que le imparten características especiales pueden estar presentes

Los componentes de las grasas son:

- ❖ **Aceite base:** El aceite base utilizado en la fabricación de la grasa se selecciona con las mismas características del que se requeriría si el mecanismo fuese lubricado con aceite. Básicamente se utilizan los aceites de tipo parafínico y nafténico; este último se utiliza ampliamente para grasas que trabajan a bajas temperaturas, por su fluidez y por su habilidad para combinarse con el jabón.

Los aceites sintéticos se utilizan en grasas que trabajan en condiciones extremas de alta o baja temperatura y generalmente se utilizan con espesadores de jabón de litio. Cuando el espesador y el aceite base de la grasa son sintéticos, su uso se reduce solamente a equipos que trabajan bajo condiciones extremas.

- ❖ **Espesadores:** Los espesadores ó jabones de las grasas se fabrican a partir de una base metálica que puede ser calcio, sodio, litio, aluminio, bario, etc, que es

sometida a un proceso de calentamiento en donde se le añaden ácidos grasos ó hidróxidos. El espesador se mezcla con el aceite en un agitador y la mezcla resultante se calienta de nuevo. Durante la reacción se produce glicerina y agua, ésta se vaporiza, quedando solamente la glicerina, la cual ayuda a que el espesador se solubilice en el aceite. Una vez solubilizado éste, la mezcla se enfría, y el espesador pasa a estado de cristalización, en la forma deseada. Dependiendo de la velocidad de enfriamiento y del medio en el cual se lleve a cabo, se obtiene la estructura de la grasa, la cual puede ser de fibra corta, media ó larga. Esta estructura permite utilizarla para cada caso en particular. El tipo de fibra se puede determinar por medio del microscopio.

- ❖ **Aditivos:** Los aditivos más comunes utilizados en las grasas son los antioxidantes, los inhibidores de la herrumbre, de la corrosión, los aditivos de extrema presión (EP) y los mejoradores de untuosidad ó adhesividad hacia las superficies metálicas.

La consistencia es un factor importante de la grasa porque ella determina su capacidad de lubricación, sellamiento, de permanencia en su sitio, de bombeabilidad, y capacidad de soportar temperatura. Dos grasas con igual consistencia o dureza, no tienen necesariamente el mismo desempeño.

La consistencia de las grasas se determina según el método ASTM D217, conocido como cono de penetración de las grasas lubricantes y establecido por la NLGI (Instituto Nacional de Grasas Lubricantes). Este método permite hallar la consistencia de una grasa en términos de penetración, sin agitación (durante el almacenamiento). Penetración trabajada, penetración no trabajada y penetración trabajada durante prolongados períodos de tiempo. La consistencia normalmente se reporta en términos de penetración trabajada, porque es el factor más representativo de las condiciones bajo las cuales opera una grasa, principalmente si se utiliza en la lubricación de rodamientos.

**Tabla 3. Clasificación ASTM y Consistencia NLGI**

Penetración trabajada ASTM D217 mm/10 25°C (77°F)	Consistencia NLGI	Grado de dureza	Campo de aplicación
447-475	000	Muy fluida	Engranajes
400-430	00	Fluida	Engranajes
355-385	0	Semifluida	Rodamientos, sistema centralizado de lubricación
310-340	1	Muy Blanda	Rodamientos, sistema centralizado de lubricación
265-295	2	Blanda	Rodamientos
220-250	3	Media	Rodamientos
175-205	4	Dura	Cojinetes lisos, grasa en bloque
130-160	5	Muy Dura	Cojinetes lisos, grasa en bloque
85-118	6	Durísima	Cojinetes lisos, grasa en bloque
<p>Observaciones:                      (1) Las grasas fluidas y semifluidas, con una penetración ASTM D217 por encima de 475, no se prueban con el penetrómetro.</p>			

Fuente: ASTM D217.

Selección de la grasa: Para seleccionar correctamente la grasa para una aplicación específica es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Consistencia: los grados NLGI que se emplean comúnmente son 1, 2 y 3.
- Tipo de espesante: los más utilizados son los de litio, sodio y calcio.
- Viscosidad dinámica: se especifica de acuerdo con la velocidad y temperatura de operación del mecanismo.

- Factor de velocidad: el factor de velocidad (Fv) de la grasa es característico de cada grasa y siempre debe estar, en el caso de la lubricación de rodamientos, por encima del factor de giro (Fg) del rodamiento que se obtiene de multiplicar el diámetro medio del rodamiento (Dm) en mm por su velocidad de giro (n) en rpm. La Fg es igual a Dmn. El Fv de la grasa es importante tenerlo en cuenta en aquellas aplicaciones de altas velocidades, ya que si éste es mayor que el del rodamiento se podrá garantizar que durante el funcionamiento de éste, la grasa no será expulsada por fuerza centrífuga de las pistas de rodadura y elementos rodantes, evitándose de esta manera una lubricación deficiente y la posibilidad, en el caso de máquinas textiles como mecheras e hiladoras, que se manche la tela que se está procesando. Las grasas que presentan los mayores valores de Fv son las de jabón de litio y sodio y menores las de calcio, aluminio, poliurea y complejas.
- Temperatura de trabajo: permite seleccionar el grado NLGI y el tipo de jabón de la grasa.
- Aditivos: es necesario tener en cuenta el tipo de lubricación (fluida o EHL) que se está presentando en los mecanismos lubricados con el fin de determinar si la grasa requiere o no aditivos de Extrema Presión.
- Sistema de aplicación: influye en la selección de la consistencia de la grasa, así, para sistemas de lubricación centralizada por lo regular es NLGI 0 o 1; para reengrase es 2 y para sistemas de grasa empacada es 3.

#### Ventajas de la grasa:

- Las grasas se quedan en su sitio.
- Las grasas sellan y dejan fuera contaminantes.
- Las grasas no requieren sistema de circulación.
- Las grasas reducen el goteo, derrames y pérdidas.
- Las grasas incorporan aditivos solidos fácilmente.

- Las grasas son buenas para operación intermitente.
- Las grasas pueden usarse en sistemas sellados de por vida.
- Las grasas reducen el ruido.
- Las máquinas que usan grasas tienden a usar menos potencia.

**2.2.5. Mantenimiento Predictivo.** Según la norma: ISO 13372: 2004. Condition monitoring and diagnostics of machines. El mantenimiento predictivo es el enfocado en la predicción de la falla y en la toma de decisiones basadas en la condición del equipo para prevenir su degradación o falla.

Según la EPRI. Electric Power Research Institute<sup>8</sup>. Define el mantenimiento predictivo como un proceso que requiere de tecnologías y personal capacitado, que integra todos los indicadores disponibles de la condición de los equipos (datos de diagnóstico y rendimiento, registros de datos del operador), históricos del mantenimiento y el conocimiento del diseño para tomar decisiones oportunas sobre los requisitos de mantenimiento de los equipos importantes.

La implementación del mantenimiento predictivo esta ceñida a un paso a paso que se compone de:

- Validación de equipos críticos.
- Definición de las rutinas predictivas a aplicar y sus frecuencias.
- Capacitación del personal técnico.
- Costeo de la matriz de predictivo y definición de la forma como se va a aplicar (recurso propio o contratado).
- Cargue de las rutinas en el CMMS (Sistema computarizado de gestión de mantenimiento).
- Inicio y seguimiento de la ejecución de las rutinas y sus resultados.

---

<sup>8</sup> Electric Power Research Institute (EPRI), Predictive Maintenance Self-Assessment Guidelines For Nuclear Power Plants, 2000. P 1-1.

- Medición de indicadores de proceso y mejora en base a retroalimentación de resultados.

El éxito del mantenimiento predictivo se debe a que la mayoría de técnicas utilizadas son no destructivas, no intrusivas y se realizan con el equipo en línea, minimizando recursos, pérdida de producción (no se detiene el equipo mientras se interviene y por restablecimiento de procesos),

Tabla 4. Matriz de Excelencia Operacional.

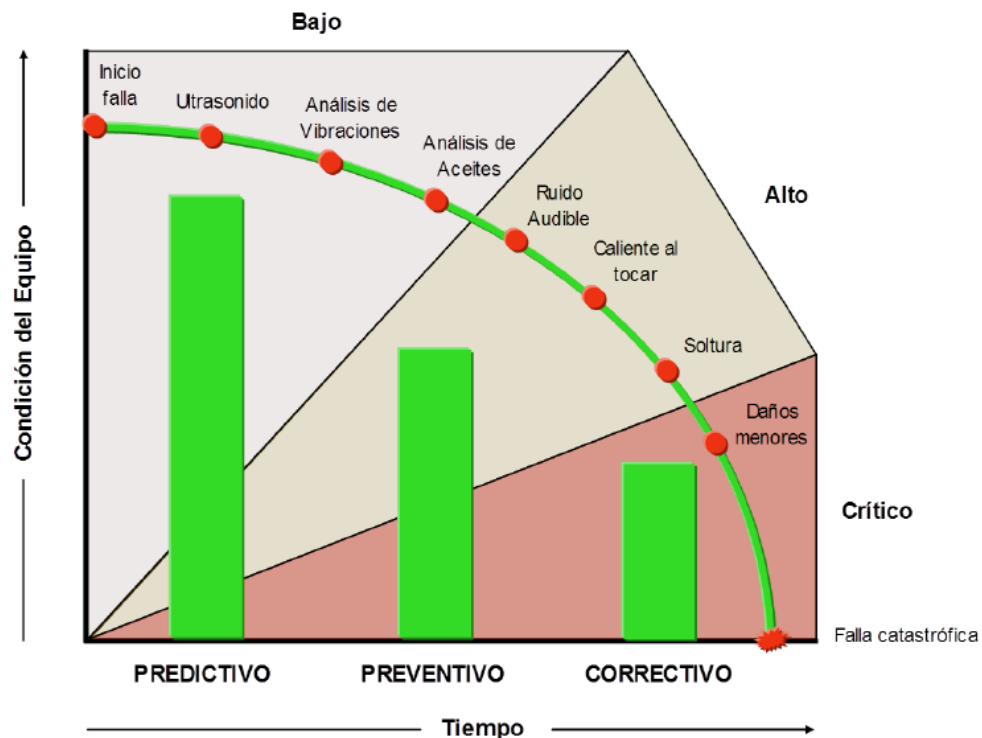
CLASE	ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO	ADMINISTRACIÓN Y ORGANIZACIÓN	PLANEACIÓN Y PROGRAMACIÓN	TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO	MEDIDAS DE DESEMPEÑO	TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN Y SU USO	INVOLUCRAMIENTO DE LOS EMPLEADOS	ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD	ANÁLISIS DE PROCESOS	INFORMACIÓN SOBRE INFRAESTRUCTURA E INSTALACIONES
<b>CLASE MUNDIAL</b>	Estrategia Corporativa de Mantenimiento	Organización de Alto Desempeño	Ingeniería de Mantenimiento y Planeación de Largo Plazo (mín. 3 años a la vista)	Todas las técnicas derivadas de un análisis estructurado	Efectividad de Equipos, benchmarking y eficiente base de datos de costos	Bases de datos totalmente integradas	Equipos de trabajo autónomos	Programa total de confiabilidad. Predicción y ajuste de estrategias con base en estudios de confiabilidad	Revisión regular de los procesos de costo, tiempo y calidad. Certificación ISO 9000 de los procesos de mantenimiento	Fuente única de información de infraestructura de equipos, componentes y las diferentes jerarquías
<b>DE LO MEJOR EN SU CLASE</b>	Plan de mejoramiento a largo plazo	Organización de mantenimiento integrada con proveedores de bienes y servicios	Buena planeación y programación del trabajo. Soporte de Ingeniería de Mantenimiento	CBM formal y dando resultados. PPMs con base en FCM. Inspecciones basadas en riesgo	MTBF, MTTR, Disponibilidad, costos de mantenimiento muy estructurados y gestionados	CMMS Convencional ligado a financiero y materiales	Equipos de mejoramiento continuo formalmente creados y funcionando	Modelamiento de Confiabilidad	Algunas revisiones de procesos administrativos de mantenimiento (estratégicos, tácticos y operativos)	Infraestructura de equipos y componentes estandarizada en las diferentes bases de datos
<b>CONCIENTE</b>	Plan estratégico de mantenimiento a un año	Mantenimiento integrado con las demás áreas de la compañía	Grupos de Planeación e Ingeniería de Mantenimiento establecidos	Algo de CBM. Algo de NDT	Tiempos de parada con modo, causa y elemento de falla. Costos de mantenimiento disponibles	CMMS convencional no ligado a otros sistemas	Comités de mejoramiento ad-hoc	Buena base de datos de falla en uso. RCFA y FMEA	Revisiones periódicas de procesos o procedimientos técnicos por disciplinas	Infraestructura de equipos jerarquizada y clasificada
<b>INSATISFACTORIO</b>	Plan de mejoramiento de mantenimientos preventivos	Mantenimiento integrado a Operaciones	Soporte para detección de fallas programación	Inspecciones basadas en tiempo	Algunos registros de falla y costos de mantenimiento no segregados	Algunos programas y registros de repuestos	Algunas reuniones de mejoramiento en seguridad	Registro de fallas poco usado	Procesos técnicos de mantenimiento revisados por lo menos una vez	Infraestructura de equipos y componentes estructurada en algún medio magnético
<b>INOCENTE</b>	Mantenimiento reactivo	Organización y administración funcional	No planeación. Programación elemental. No existe Ingeniería de mantenimiento	Paradas anuales de inspección únicamente	Ninguna aproximación sistemática a costos de mantenimiento y fallas de equipos	Manual y registro ad-hoc	Solo reuniones con el personal para tocar temas sindicales o sociales	No existe registro estructurado de fallas	Procesos técnicos y administrativos de mantenimiento no documentados y nunca revisados	No existe ningún registro de la infraestructura de equipos y componentes

Fuente: Archivos de ECOPETROL

La matriz de excelencia es una de las herramientas más utilizadas a nivel mundial, muestra de manera gráfica y cuantitativa, el estado de las organizaciones en el mantenimiento y en diferentes aspectos evaluados, muestra el grado de importancia que tiene este tipo de actividades, dentro de una organización clase mundial.

La evolución de las fallas en un equipo se puede ilustrar mejor en la curva P-F, como se muestra en la figura 9.

**Figura 19. Curva P-F.**



Fuente: ALLIED REABILITY, inc. PDM Secrets Revealed. Boston, 2006. Pag 4.

Al inicio de toda falla se presentan síntomas muy leves, imperceptibles por el hombre, pero que pueden ser detectables por algunas técnicas predictivas (riesgo bajo).

Al no tener implementado técnicas predictivas o no acatar las recomendaciones, la falla avanza y pasa a ser detectable por los sentidos, se hace audible o se incrementa la temperatura. En este punto se toma la decisión de intervenir el equipo pero en múltiples ocasiones, la falla ha evolucionado tan rápido que pasa de ser un mantenimiento preventivo a ser correctivo por los daños ocasionados.

**Tabla 5. Ejemplo de mediciones y parámetros usados para el diagnóstico predictivo**

Rendimiento	Mecánica	Eléctrica	Análisis de aceite, calidad de producto y otros
Consumo de energía	Expansión térmica	Corriente	Análisis de aceite
Eficiencia	Posición	Voltaje	Análisis de trazas de hierro
Temperatura	Nivel de fluido	Inductancia	Dimensiones de producto
Termografía	Vibración – desplazamiento	Resistencia	Propiedades físicas de producto
Presión	Vibración – velocidad	Capacitancia	Propiedades químicas (color, olor, apariencia)
Flujo	Vibración – aceleración	Campo magnético	Otras pruebas no destructivas
	Ruido audible	Aislamiento	
	Ultrasonido: ondas		

Fuente: ISO 13379. Condition monitoring and diagnostics of machines-General guidelines on data interpretation and diagnostics techniques, 2003. Pag 8.

### 2.2.5.1 Técnicas Predictivas.

- **Análisis de vibraciones.** El control y análisis vibracional<sup>9</sup> espectral es la herramienta principal del Mantenimiento Predictivo, se basa en que las máquinas tienen un nivel normal de vibración, como resultado de estar dentro de las tolerancias de las especificaciones de fabricación, montaje y operación.

<sup>9</sup> ASME INTERNATIONAL. Mantenimiento Predictivo. Pag 5.

Sí hay algún parámetro fuera de especificación entonces es una falla que causará el incremento del nivel vibracional, esta falla puede ser por su comportamiento dinámico (amplitud, frecuencia y ángulo de fase).

Los impactos mecánicos repetitivos y transcientes, generan picos de energía que excitan las frecuencias naturales de los elementos que son golpeados, los impactos son a baja frecuencia y las frecuencias naturales son a muy alta frecuencia y se producen con la fricción entre dos superficies.

La medición a muy alta frecuencia es utilizada para detectar defectos incipientes en; rodamientos, engranajes, ejes y cojinetes por rozamiento al fallar la lubricación, cavitación, soldaduras, etc.

El mantenimiento de una máquina depende de los niveles máximos tolerables de vibración espectral o de señales de muy alta frecuencia, establecidos sobre la base de estándares internacionales de máquinas similares o que son calculados en forma estadística en base a los valores históricos tomados en dicha planta.

- **Monitoreo de aceite lubricante.** Hay varias técnicas disponibles en análisis de aceite<sup>10</sup>:
  - ✓ Visual: inspección del almacenaje a granel para ver señales de agua o aeración severa, el color resaltarán cualquier cambio del estado de aceite.
  - ✓ Olores: los olores picantes indicarán oxidación del aceite y aditivos, los olores desagradables indicarán el crecimiento microbiano.
  - ✓ La prueba del papel secante: es útil en aceites para motores diésel, varios problemas son identificados fácilmente, tales como: productos de oxidación, lodo, glicol y agua.
  - ✓ La prueba del chasquido de la humedad: cuando la humedad o el agua está presente en el aceite, será evidente con un chasquido, cuando el aceite se

---

<sup>10</sup> ASME INTERNATIONAL. Mantenimiento Predictivo. Pag 6-7.

somete a una alta temperatura, al dejar caer una gota sobre una plancha caliente ( $>125^{\circ}\text{C}$ ) y se escucha el chasquido, si no se oye entonces el aceite está debajo del punto de saturación.

- ✓ La vida del Filtro: la vida corta del elemento del filtro, identificará el problema real, el cual requiere ser analizado.
- ✓ La prueba Magnética: sólo para desgastes ferrosos.

Otra herramienta importante del Mantenimiento Predictivo, es el control de parámetros de lubricantes tales como;

- ✓ Metales (ppm): ASTM D-5185, cantidad de partículas metálicas contenidas en el aceite (Análisis por absorción atómica).
- ✓ Viscosidad (cSt): ASTM D-445.
- ✓ FTIR: Degradación, Oxidación y sulfuros; Contaminación, Cenizas (TGA), glicol, agua y combustible (Análisis espectrométrico por rayos infrarrojos).
- ✓ TAN: Número de acides total.
- ✓ TBN: Número básico total.
- ✓ Color.

Los valores máximos permisibles son obtenidos de las normas internacionales, es importante considerar la repetición de los datos para el establecimiento la supervisión de las tendencias.

La ferrografía, es una técnica que analiza las partículas (de 0.1 - 500 micrones) de desgaste por fricción de los componentes de una máquina, el objetivo es determinar los problemas internos que se presentan. Para poder emitir un diagnóstico confiable se deberá analizar la forma y los tamaños de las partículas con un microscopio y comparar con los patrones de identificación.

Todos los resultados de los análisis (perfil de distribución y concentración de partículas) se registrarán en una base de datos a fin de poder evaluar su comportamiento en el tiempo.

- **Termografía Infrarroja:** La cantidad de energía<sup>11</sup> que emite todo cuerpo desde su superficie esta en relación directa con su temperatura. La temperatura de los cuerpos determina el tipo de luz que emite cuanto más frío está el objeto mayor es su longitud de onda de brillo, esta es la energía infrarroja que es invisible al ojo humano, pero a través de instrumentos termográficos se puede ver esta energía y transformar en imágenes visibles.

Ventajas de la termografía.

- ✓ Se tiene un registro de la distribución de temperaturas.
- ✓ No interrumpe el funcionamiento del equipo.
- ✓ Permite analizar grandes áreas en tiempos reducidos.
- ✓ No requiere contacto físico con el equipo inspeccionado.
- ✓ Sistema portátil y autónomo.
- ✓ Gran sensibilidad que permite tomar mediciones a distancia.
- ✓ Permite identificar de forma rápida y segura los puntos calientes asociados a fallas tales como; cortocircuitos, conectores defectuosos.
- ✓ Pérdidas de calor o frío por defecto del aislamiento térmico o refractario, etc.

Aplicación en equipos rotativos.

- ✓ Evaluación del estado de rodamientos.
- ✓ Evaluación del balance térmico en cámaras de combustión de turbinas a gas.
- ✓ Estado de los inyectores de combustible en motores diésel (dosificación de combustible por la distribución térmica en los cilindros)

---

<sup>11</sup> ASME INTERNATIONAL. Mantenimiento Predictivo. Pag 7-10.

- ✓ Fallas en las válvulas o inyectores y bloqueo de los tubos del radiador en motores diésel.
- ✓ Fricción por interacción entre la polea y las fajas.
- ✓ Fugas de gases por uniones de las turbinas a gas o vapor.

#### Aplicaciones en mantenimiento eléctrico.

- ✓ Oxidación de contactos.
- ✓ Envejecimiento del material.
- ✓ Sobrecargas.
- ✓ Aislamientos térmicos.
- ✓ Detecta el estado de envejecimiento de los aisladores eléctricos.
- ✓ Detecta la existencia de pérdidas térmicas.
- ✓ Permite verificar la calidad de montaje de aislamiento
- ✓ Motores eléctricos.
- ✓ Centros de transformación de Media Tensión (transformadores, interruptores automáticos, fusibles)
- ✓ Líneas de distribución ( aisladores, secciones en tendidos aéreos)
- ✓ Subestaciones transformadoras de Alta Tensión.

#### Aplicación en la industria química y de proceso.

- ✓ Evaluación del estado de refractarios: desgaste, fisuras, pérdida de resistencia térmica.
- ✓ Evaluación del estado de Hornos rotativos, calderas, chimeneas
- ✓ Inspección de Hornos continuos y de tratamientos térmicos.
- ✓ Inspección de aislamiento y fugas en tuberías.
- ✓ Fugas por la carcasa del caldero

#### Aplicación en la Industria Electrónica

- ✓ Verificación de modelos teóricos de PCB
- ✓ Localización de cortocircuitos.

✓ Estudio de las conexiones eléctricas de potencia y alimentación

- **Pruebas en motores eléctricos.** La mayoría de fabricantes de Colectores FFT son suministrados con un software experto para el diagnóstico de fallas por corrientes<sup>12</sup> en motores de inducción, la corriente de las fases son medidas por un transformador de corriente que pueden ser medidas en el circuito secundario o en las fases principales, la medida de corriente es transformada en voltaje y también se utiliza un filtro pasa alta para la prueba de excentricidad.

Las fallas del motor eléctrico podrían ser; barras rotas del rotor, excentricidad estática y dinámica, fallas electromecánicas tales como defectos en la fabricación y de la fundición. El software experto analiza el espectro de corriente y emite un diagnóstico electromagnético.

- **Ultrasonido.** La técnica ultrasónica<sup>13</sup> está basada en el hecho de que los materiales sólidos son buenos conductores de las ondas acústicas, ya que todo material con propiedades elásticas puede ser capaz de favorecer la propagación de ondas sónicas y ultrasónicas, siempre que las fuerzas elásticas sean capaces de retraer las partículas del mismo a su posición de reposo luego de ser desplazadas por una energía mecánica.

Por lo tanto, las ondas acústicas, no solo se reflejan en las interfaces, sino que también lo hacen en las discontinuidades internas. El efecto de la interacción de las ondas acústicas con los materiales es mejor cuando se tienen longitudes de onda pequeñas, lo cual se traduce en altas frecuencias de éstas. Esto implica que las ondas ultrasónicas deban ser usadas en un rango de frecuencias entre 0.5 MHz y 25 MHz obteniéndose magnitudes de milímetros

---

<sup>12</sup> ASME INTERNATIONAL. Mantenimiento Predictivo. Pag 10-11.

<sup>13</sup> T.P. Group S.A. Ultrasonido I. Bogotá, 2013. Pag 1-2.

para la longitud de onda. Este intervalo de frecuencias corresponde a aquellas ondas que no son detectadas por el oído humano.

Limitándose a las pruebas en los objetos para determinar posibles discontinuidades en los materiales, mediante la inspección ultrasónica se puede detectar, ubicar, evaluar y hacer un diagnóstico de lo encontrado. La más importante de sus aplicaciones se basa en la reflexión del ultrasonido en la interface producida por discontinuidades presentes en los materiales.

Para facilitar la transmisión del sonido se utilizan unos elementos llamados palpadores los cuales se construyen sobre la base de un cristal piezoeléctrico o una pastilla cerámica que actúa como generadora/receptora de las vibraciones ultrasónicas.

Los principales fenómenos físicos que intervienen en este ensayo son: la velocidad de propagación, atenuación, reflexión y refracción.

- **Emisiones Acústicas.** Es un método de inspección no destructivo<sup>14</sup>, que se usa actualmente en diversas industrias como la energética y petroquímica, con el objeto de localizar diferentes fallas estructurales, discontinuidades, microfisuras, erosión y corrosión, en componentes mecánicos y materiales de las más variadas piezas.

Se basa en el estudio de un fenómeno que genera ondas elásticas transitorias por la liberación rápida de energía a partir de fuentes localizadas en un material, detecta y convierte ondas de alta frecuencia en señales eléctricas, estas señales son procesadas en equipos electrónicos adecuados y analizado por personal especializado.

---

<sup>14</sup> BORRAS PINILLA, Carlos, Mantenimiento Preventivo. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2013.

## Aplicaciones de las emisiones Acústicas.

Las aplicaciones de las emisiones acústicas son variadas y aun son caso de estudio, entre ellas podemos encontrar:

- ❖ Evaluación de estructuras.
- ❖ Pruebas de carga.
- ❖ Estudio de corrosión.
- ❖ Pruebas de materiales avanzados.
- ❖ Control de calidad de productos.
- ❖ Detección de fallas por fatiga de componentes estructurales de aeronaves.
- ❖ Control de agrietamiento de soldaduras durante el proceso de enfriamiento.
- ❖ Estudio del comportamiento de materiales a alta temperatura.
- ❖ Monitoreo de tuberías.
- ❖ Pruebas de vagones cisterna.
- ❖ Aplicaciones médicas.

Originalmente se tomó como NDT para examinar recipientes sometidos a presión, pero con el tiempo se convirtió en una tecnología más amplia, aplicándose a todo tipo de control de procesos así como para prevenir fallas de integridad estructural.

En el lado de control de procesos se utiliza para:

- ❖ Detección de fugas.
- ❖ Diagnostico predictivo.
- ❖ Impactos de partículas.
- ❖ Descargas eléctricas.
- ❖ Variedad de procesos tipo fricción.

## **Emisiones acústicas en rodamientos.**

Las cargas normales en un rodamiento causan una deformación elástica de los elementos en el área de contacto que otorgan una distribución elíptica suave, las

superficies de los rodamientos tienen deformidades microscópicas que afectan la distribución ideal del estrés en el rodamiento, el lubricante en el rodamiento compensa la distribución del estrés afectada por este hecho.

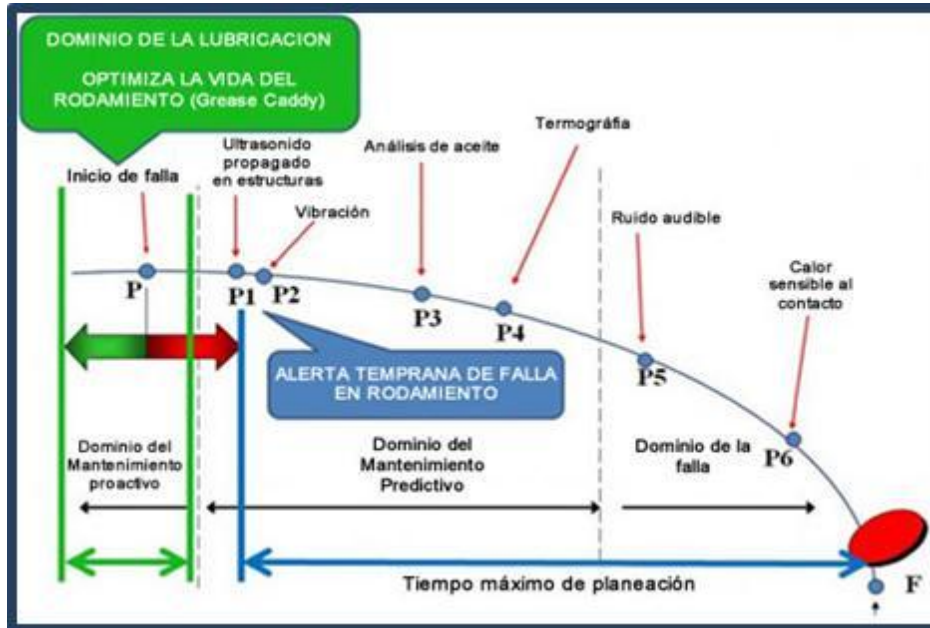
En los elementos rodantes como en los caminos de rodadura en las pistas se comienza a presentar fatiga, sutil deformación del metal que produce superficies irregulares, incrementando la emisión del sonido acústico.

Esta información fue descubierta originalmente, por experimentos llevados a cabo por la NASA, en las inspecciones ejecutadas, mientras monitoreaban a frecuencias desde 24 a 50 KHz, encontraron que los cambios de amplitud, indicaban falla, antes que cualquier otra indicación incluyendo temperatura y aumento en la vibración.

La inspección predictiva y proactiva de los equipos rotativos con un instrumento de emisiones acústicas tiene las siguientes ventajas:

- ❖ Alerta temprana de la falla de rodamientos.
- ❖ La detección de falta de lubricación.
- ❖ Prevenir problemas de lubricación.
- ❖ Avanzado software de análisis que ayuda a su proceso de trabajo de manera eficiente.
- ❖ Se puede utilizar en todas las velocidades de los rodamientos, alta media y baja.
- ❖ Es una señal de alta frecuencia y señal de onda corta, es posible filtrar los ruidos de fondo de planta, se filtran los ruidos confusos del entorno y se centran en el ruido específico para inspección.
- ❖ Los métodos básicos de inspección son extremadamente simples y requieren poca capacitación.

Figura 20. Ventaja de emisiones acústicas.



Fuente: <http://www.uesystems.com/new/wpcontent/uploads/2012/08/guia de lubricación>.

Cómo funciona la inspección de rodamientos con emisiones acústicas: Los movimientos mecánicos producen un amplio espectro de sonido. Uno de los principales contribuyentes a la tensión excesiva en las máquinas es la fricción. Los instrumentos de emisiones acústicas detectan la fricción. Al centrarse estas en una estrecha banda de frecuencias altas, el instrumento detecta los cambios sutiles en la calidad de la amplitud y el sonido producido por el equipo operativo. A continuación, se heterodinean hacia abajo estos sonidos normalmente no detectables en el rango audible en el que se escuchan a través de auriculares y puede observarse en un panel de visualización de tendencias mediante la comparación y el análisis.

Métodos de inspección de rodamientos por emisiones acústicas:

Hay tres métodos para monitorear los rodamientos por medio de ultrasonido:

- ❖ **Comparativa:** Compara los mismos rodamientos y las desviaciones de notas, método fácil y rápido de hacer.
- ❖ **Histórico:** Establecer una tendencia en el tiempo de los valores medidos con la ayuda de software DMS.
- ❖ **Analítica:** Utilice el software con la calculadora integrada de fallos.

Con el método histórico y el software DMS se puede programar también los niveles de alarma en nuestros puntos de datos, además se puede:

- ❖ Establecer una lectura de referencia.
- ❖ Primera alarma: indicación de la falta de lubricación.
- ❖ Segunda alarma: alerta temprana de fallos en los rodamientos.

Establecer una línea base para cada rodamiento, realizar mediciones rutinarias para señalar los aumentos de decibelios. Cuando un rodamiento alcanza una ganancia de 8 dB sobre la línea base sin cambio en la calidad de sonido, significa que necesita lubricación. Al aplicar el lubricante, se detiene cuando cae el nivel de dB a los valores basales. Se pueden establecer en los rodamientos diversas etapas de falla:

- ❖ Una ganancia de 8 dB respecto al valor basal indica pre-falla o falta de lubricación.
- ❖ Un aumento de 12 dB, establece el principio del modo de fallo.
- ❖ Una ganancia de 16 dB indica una condición de insuficiencia avanzada.
- ❖ Mientras que un 35-50 dB de ganancia advierte de una falla catastrófica.

## **2.3 MARCO LEGAL**

**ISO 13372: 2004.** Condition monitoring and diagnostics of machines.

**Resolucion 3673:** Reglamento técnico de trabajo seguro en Alturas.

ISO 13372: 2004

## Introducción

Esta Norma Internacional define los términos relativos sólo a condición de control y diagnóstico de máquinas. Proporciona términos para su uso en la monitorización de estado y diagnóstico de máquinas de documentos que no son vocabularios, y en su caso los documentos deben citar esta norma internacional como la fuente de definición. Se considera un documento vivo y se modificará o actualizará a medida que surgen términos adicionales.

## Alcance

Esta Norma Internacional define los términos utilizados en el monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas. Su objetivo es proporcionar a los usuarios y fabricantes de monitoreo de condiciones y sistemas de diagnóstico con un vocabulario común.

### 1 Condiciones generales

#### 1.1 mantenimiento desglose

#### 1.2 con sede en estado de mantenimiento

#### 1.3 monitoreo de condición

#### 1.4 criticidad

#### 1.5 diagnósticos

#### 1.6 equipos

#### 1.7 fracaso

#### 1.8 criticar

#### 1.9 función

#### 1.10 máquina

- 1.11 características de la máquina
- 1.12 sistema de la máquina
- 1.13 gestión de la salud de maquinaria
- 1.14 vigilancia de la salud de maquinaria
- 1.15 pronósticos
- 1.16 severidad
- 1.17 sistema
- 1.18 mantenimiento preventivo

## 2 características de la máquina

- 2.1 maquinaria crítica
- 2.2 mantenibilidad
- 2.3 rendimiento
- 2.4 fiabilidad

## 3 Operación y mantenimiento

- 3.1 alineación
- 3.2 sistema de salud y la supervisión del uso
- 3.3 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad
- 3.4 crecimiento térmico

## 4 Fallos

- 4.1 anormalidad
- 4.2 alarma
- 4.3 alerta
- 4.4 anomalía
- 4.5 distorsión
- 4.6 modo de fallo
- 4.7 progresión de fallo
- 4.8 signo

4.9 síndrome

5 de recogida de datos y datos de adquisición

5.1 atenuación

5.2 ruido de fondo

5.3 rango dinámico

5.4 termografía

5.5 ventana de tiempo

5.6 ruido triboeléctrico

6 Características de los datos

6.1 asíncrono

6.2 descriptor

6.3 piso de ruido

6.4 fuera de línea

6.5 en la línea

6.6 componente subsíncrono

6.7 componente síncrona

6.8 vector térmica

6.9 firma de vibración

7.1 análisis de la firma eléctrica

7.2 dominio de la frecuencia

7.3 dominio del tiempo

7.4 cascada

8 Análisis

8.1 mapa de velocidad crítica

8.2 insuficiencia modos y efectos de análisis AMFE

8.3 efectos del modo de fallo y análisis de criticidad FMECA

- 8.4 tasa de fracaso
- 8.5 frecuencia de falla
- 8.6 análisis de frecuencia
- 8.7 Análisis de Pareto
- 8.8 Evaluación de riesgos
- 8.9 causa principal
- 8.10 análisis de fallos de causa raíz

## 9 Diagnóstico

- 9.1 línea de base
- 9.2 diagnóstico
- 9.3 parámetro
- 9.4 síntoma

## 10 de Pronósticos

- 10.1 disponibilidad
- 10.2 pronóstico

**ASTM D-5185:** Standard Test Method for Determination of Additive Elements, Wear Metals, and Contaminants in Used Lubricating Oils and Determination of Selected Elements in Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES)

**ASTM D-445-12:** Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)

ASTM D 445-12

Método Estándar de Prueba para VISCOSIDAD DE transparentes y opacas LÍQUIDOS (cinemático y Viscosidades dinámicas)

Esta norma ha sido publicada bajo la designación fija D 445; el número inmediatamente después de la designación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de la última aprobación. Esta es también una norma del Instituto del Petróleo publicada bajo la designación fija IP 71 La final número indica el año de la última revisión.

Este método fue adoptado como una norma conjunta ASTM -IP en 1964.

## 1. Alcance

1.1 Este método cubre la determinación de la viscosidad cinemática del líquido de productos derivados del petróleo (Notas 1 y 2), tanto transparentes como opacos, midiendo el tiempo de flujo de un volumen fijo de líquido a una temperatura dada a través un instrumento capilar de vidrio calibrado, utilizando "el flujo por gravedad." Un procedimiento dado para un cálculo de viscosidades dinámicas de viscosidades cinemáticas medidas.

Nota 1 - Los betunes son exceptuados; para la similar medición de su viscosidad, véase el método

ASTM D 2170, de la prueba para Viscosidad Cinemática de los asfaltos, 2 y el Método ASTM D

2171, prueba para Absolute Vis- viscosi- de Asfaltos. 2

Nota 2 - El método está diseñado para su uso con líquidos, en el que la tasa de cizallamiento es proporcional al esfuerzo de cizallamiento (flujo newtoniano). La proporcionalidad constante es el coeficiente de viscosidad.

Con ciertos productos que presentan "gel-como" BE- conducta, se debe tener cuidado de que las mediciones son realizado a temperaturas suficientemente altas para tales materiales fluyan libremente de modo que los resultados similares se obtener en viscosímetros capilares de diferente diámetros.

## 2. Definiciones

2.1 viscosidad cinemática - una medida de la tiempo para un volumen fijo de líquido fluya por gravedad a través de un capilar. La unidad cgs de viscosidad cinemática es la que tiene el Stoke

Dimensiones centímetros-cuadrado por segundo. En la viscosidad cinemática es la industria del petróleo generalmente expresada en centistokes, cSt, por lo que 1

St = 100 cSt.

2.2 viscosidad dinámica (a veces llamado viscosidad absoluta) es numéricamente el producto de la viscosidad cinemática y la densidad de la líquido, ambos a la misma temperatura. Los cgs unidad de la viscosidad dinámica es el equilibrio, P, que tiene las dimensiones gramos por centime- ter por segundo.

## 3. RESUMEN DEL MÉTODO

3.1 El tiempo se midiendo que el líquido fluya a través del capilar viscosímetro bajo una precisión reproducible cabeza y a una temperatura controlada de cerca. A continuación se calcula la viscosidad cinemática desde el tiempo de flujo medido y la calibración la constante del viscosímetro.

## 4. Aparato

4.1 Viscosímetros, capilar de cristal calibrado, capaz de medir la viscosidad dentro de los límites de repetibilidad y reproducibilidad dada en la Sección 10 son aceptables.

Nota 3 La constante de calibración,  $C$ , es dependiente de la aceleración de la gravedad en el lugar de calibración y esto se debe, por lo tanto, suministrar por el laboratorio junto con la normalización constante del instrumento.

Este método está bajo la jurisdicción de la Comisión ASTM Comité D-2 sobre Productos del petróleo y lubricantes. Una lista de los miembros se pueden encontrar en el Anuario ASTM.

### **3. DESARROLLO DEL MODELO.**

Partiendo del planteamiento del problema expuesto anteriormente, en los aeroenfriadores de proceso de gas de las turbinas de reinyección del CPF Cupiagua, en donde el ciclo de vida de los rodamientos de rodillos cilíndricos, es muy corta y esto conlleva a otros problemas asociados.

Con este modelo a implementar se busca optimizar la vida útil de los rodamientos, por medio de una lubricación correcta, minimizando los costos de mantenimiento, reduciendo los riesgos laborales y dando una mayor confiabilidad a los procesos y a la planta en general. Además adicionalmente se ganara con la implementación de esta técnica, el encuentro de falla en rodamientos, antes que cualquier otra técnica predictiva, en este caso, el análisis de vibraciones que se tiene como técnica predictiva en estos equipos, llevando un mejor control para realizar mantenimientos programados.

Este modelo se basara en estudios realizados y sus respectivos cálculos, en investigaciones de otras implementaciones similares y datos de obtenidos del sistema de documentación de la empresa, todo esto apuntando a obtener el mejor resultado en la muestra tomada y así poder implementarlo en todos los equipos del campo, dándole una gran confiabilidad a los activos de la empresa dueña del campo y la empresa mantenedora posicionarse como una compañía líder a nivel nacional y mundial como es una de sus metas propuestas, siendo la mejor opción del mantenimiento.

### **3.1 RECURSOS.**

En este modelo se requiere tanto recursos humanos, recursos materiales y recursos tecnológicos.

**3.1.1. Recursos Humanos:** Para ejecutar estas rutas a implementar, se requiere de dos técnicos.

- Un técnico predictivo: encargado de manejo del equipo, recolección de datos y análisis de los mismos y verificar que el procedimiento se cumpla al pie de la letra.
- Un técnico eléctrico: encargado de re-lubricar los rodamientos bajo el lineamiento del procedimiento y del técnico predictivo.

**3.1.2 Recursos Materiales:**

- Maquina reinyectora de grasa, ya sea manual o neumática.
- Grasa Unirex 3.
- Tela para recoger y limpiar exceso de grasa.
- Bolsas rojas de basura para elementos contaminados.

**3.1.3 Recursos tecnológicos:**

- Equipo Ultra probe 9000.
- Manejo de exell para análisis de los datos recolectado.

### **3.2 RELACIÓN COSTO-BENEFICIO.**

Los datos de la tabla 1, indican que el cambio de los rodamientos de los aeroenfriadores a implementar el modelo, se viene incrementando tendencialmente año tras año, debido a las condiciones actuales de estos componentes, no se tiene estrategia de re-lubricación, no se tiene la posibilidad de

alargar la vida útil con una re-lubricación por temor a agravar el problema, si la grasa contamina la parte interna del motor.

Este modelo pretende disminuir al comienzo el índice del 33% en el 2013, (18 cambios de rodamientos) a un 11%, (6 cambios), es decir un 22% del actual. En la figura 21 y 22 se observan las diferencias entre el costo del mantenimiento en el 2013 y el costo del mantenimiento que se busca y el costo del mantenimiento correctivo programado frente al mantenimiento predictivo que se pretende implementar.

En las siguientes tablas, se evidencia, cuanto es el costo de un cambio de rodamientos de un motor y cuánto cuesta realizar una ruta de la propuesta a implementar.

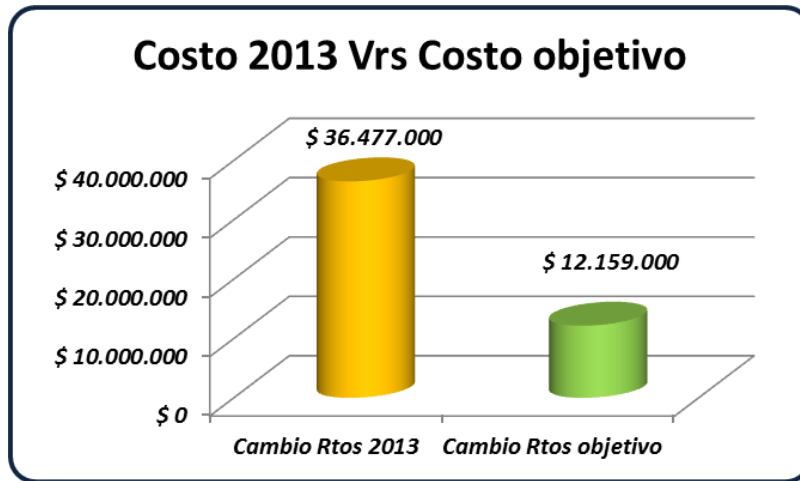
**Tabla 6. Costo del cambio de rodamientos de un motor.**

<b>COSTO MANTENIMIENTO PREVENTIVO (1 MOTOR)</b>		
<b>Item Mtto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>
<b>Rto 6315 ZZ</b>	1	\$ 250.000
<b>Rto NU315</b>	1	\$ 310.000
<b>Sellos de labio</b>	2	\$ 150.000
<b>Chesterton 803</b>	0,25 Caneca 5 gl	\$ 236.500
<b>Chesterton 243</b>	0,25 Caneca 5 gl	\$ 180.000
<b>HH Mantenimiento</b>	45	\$ 900.000
<b>Costo Total</b>		<b>\$ 2.026.500</b>

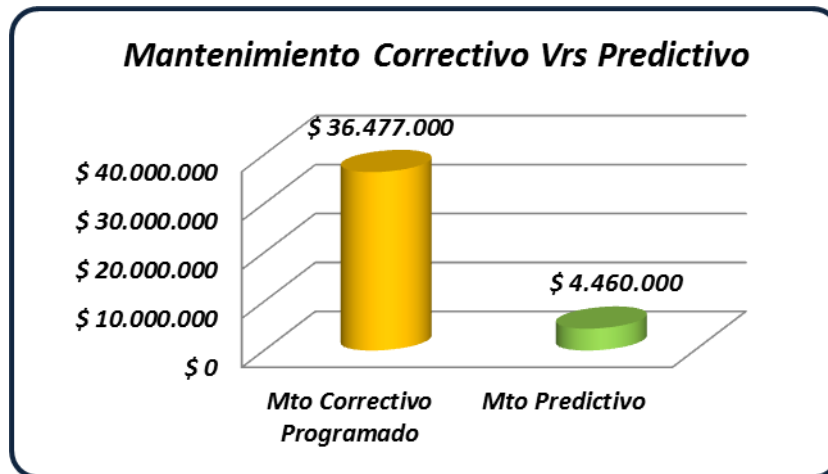
**Tabla 7. Costo de la ejecución de la estrategia a implementar (54 motores).**

<b>COSTO MANTENIMIENTO PREDICTIVO (54 MOTORES)</b>		
<b>Item Mtto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>
<b>Grasa Unirex</b>	108 gr Grasa Unirex 3	\$ 35.000
<b>HH Mantenimiento</b>	54	\$ 1.080.000
<b>Costo Total</b>		<b>\$ 1.115.000</b>

**Figura 21. Costo cambio rodamientos 2013 Vrs Costo del objetivo propuesto (Anual).**



**Figura 22. Mantenimiento Correctivo Programado Vrs Predictivo (Anual).**



Aparte del beneficio económico, existe otro muy importante y es el de seguridad industrial, se disminuye la exposición a trabajos de alto riesgo, como son los trabajos de altura, los trabajos en horarios nocturnos y exposición a altas temperaturas, además del riesgo psicosocial por la presión a la premura de colocar el equipo nuevamente a realizar su funcionalidad.

### 3.3 TECNOLOGÍA PARA IMPLEMENTAR LA TÉCNICA PREDICTIVA.

La implementación de técnicas de mantenimiento predictivo en un corto plazo, son muy costosas por el valor de los equipos que se requieren y por la capacitación del personal.

En este modelo a implementar, el costo sería bajo puesto que la empresa posee ya un equipo de emisiones acústicas, (Ultra-pro 9000) y que en este momento no presta ningún servicio y se tiene dos técnicos capacitados en este método, por esto, implementar esta estrategia sería sacarle provecho a un equipo costoso que no está prestando utilidad al mantenimiento y aprovechar la experiencia del personal en pro de minimizar los riesgos laborales, costos de mantenimiento y pérdida de funcionalidad del equipo.

### 3.4 ALCANCE DEL MODELO.

El modelo que se quiere implementar de lubricación a motores de aeroenfriadores con la ayuda de equipo de emisiones acústicas, en comienzo será con los aeroenfriadores de proceso de gas de las turbinas de reinyección del CPF Cupiagua, en la tabla siguiente se relacionan los equipos:

**Tabla 8. Listado aeroenfriadores a implementar el modelo.**

<b>AEROENFRIADORES DE GAS PROCESO</b>		
<b>TAG</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>CANTIDAD</b>
<b>HEM-1801A/N</b>	<i>Cooler de proceso turbina CA-KTB-1801</i>	14
<b>HEM-1802A/D</b>	<i>Cooler de proceso turbina CA-KTB-1802</i>	4
<b>HEM-2801A/N</b>	<i>Cooler de proceso turbina CB-KTB-2801</i>	14
<b>HEM-2802A/D</b>	<i>Cooler de proceso turbina CA-KTB-2802</i>	4
<b>HEM-3801A/N</b>	<i>Cooler de proceso turbina CA-KTB-3801</i>	14
<b>HEM-3802A/D</b>	<i>Cooler de proceso turbina CA-KTB-3802</i>	4
<b>TOTAL</b>		54

### **3.5 MOTORES ELÉCTRICOS A IMPLEMENTAR EL MODELO.**

Los motores eléctricos son máquinas que transforman energía eléctrica en energía mecánica, por medio de campos eléctricos variables, los motores eléctricos se componen de dos partes principales, una fija llamada estator y un móvil llamada rotor. Algunos motores eléctricos son reversibles, es decir que transforman energía mecánica en energía eléctrica funcionando como generadores.

#### **3.5.1. Partes de un motor eléctrico**

**3.5.1.1 Estator:** Constituye la parte fija del motor. El estator es el elemento que opera como base, permitiendo que desde ese punto se lleve a cabo la rotación del motor. El estator no se mueve mecánicamente, pero si magnéticamente. Existen dos tipos de estatores:

- Estator de polos salientes.
- Estator ranurado.

El estator está constituido principalmente de un conjunto de láminas de acero al silicio (se les llama “paquete”), que tienen la habilidad de permitir que pase a través de ellas el flujo magnético con facilidad; la parte metálica del estator y los devanados proveen los polos magnéticos. Los polos de un motor siempre son pares (pueden ser 2, 4, 6, 8, 10, etc.), por ello el mínimo de polos que puede tener un motor para funcionar es dos (un norte y un sur).

**3.5.1.2. Rotor:** Constituye la parte móvil del motor. El rotor es el elemento de transferencia mecánica, ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a mecánica. Los rotores, son un conjunto de láminas de acero al silicio que forman un paquete, y pueden ser básicamente de tres tipos:

- Rotor ranurado.
- Rotor de polos salientes.
- Rotor jaula de ardilla

**3.5.1.3. Bobinado:** Un motor monofásico tiene dos grupos de devanados en el estator: el primer grupo, se conoce como el devanado principal o devanado de trabajo; el segundo, se le conoce como devanado auxiliar o de arranque. Estos dos devanados se conectan en paralelo entre sí, el voltaje de línea se aplica a ambos al energizar el motor.

Los dos devanados difieren entre sí física y eléctricamente. El devanado de trabajo está formado de conductor grueso y tiene más espiras que el devanado de arranque, éste, generalmente se aloja en la parte superior de las ranuras del estator, en tanto que el de trabajo se aloja en la parte inferior. El devanado de arranque tiene menos espiras de una sección delgada o pequeña de conductor.

**3.5.1.4. Carcaza:** La carcasa es la parte que protege y cubre al estator y al rotor, el material empleado para su fabricación depende del tipo de motor, de su diseño y su aplicación. Así pues, la carcasa puede ser:

- Totalmente cerrada.
- Abierta
- A prueba de goteo.
- A prueba de explosiones.
- De tipo sumergible

**3.5.1.5. Cojinetes:** Contribuyen a la óptima operación de las partes giratorias del motor. Se utilizan para sostener y fijar ejes mecánicos, y para reducir la fricción, lo que contribuye a lograr que se consuma menos potencia. Los cojinetes pueden dividirse en dos clases generales:

- Cojinetes de deslizamiento: Operan basándose en el principio de la película de aceite, esto es, que existe una delgada capa de lubricante entre el eje y la superficie de apoyo.
- Cojinetes de rodamiento: Se utilizan preferentemente en lugar de los cojinetes de deslizamiento por varias razones:
  - ✓ Tienen un menor coeficiente de fricción, especialmente en el arranque.
  - ✓ Son compactos en su diseño.
  - ✓ Tienen una alta precisión de operación.
  - ✓ No se desgastan tanto como los cojinetes de tipo deslizante.
  - ✓ Se rempazan fácilmente debido a sus tamaños estándares.

**3.5.1.6. Base:** La base es el elemento en donde se soporta toda la fuerza mecánica de operación del motor, puede ser de dos tipos:

- Frontal.
- Lateral.

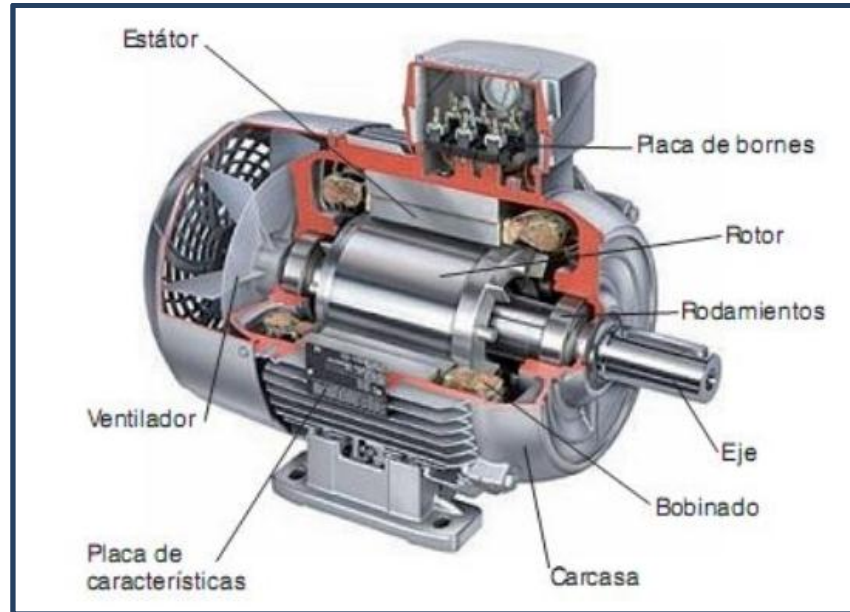
**3.5.1.7. Caja de conexiones:** Por lo general, en la mayoría de los casos los motores eléctricos cuentan con caja de conexiones. La caja de conexiones es un elemento que protege a los conductores que alimentan al motor, resguardándolos de la operación mecánica del mismo, y contra cualquier elemento que pudiera dañarlos.

**3.5.1.8. Placa de características.**

- Nombre del fabricante.
- Tamaño, forma de construcción.
- Clase de corriente.
- Clase de máquina; motor, generador, etc.
- Número de fabricación.

- Identificación del tipo de conexión del arrollamiento.
- Tensión nominal.
- Intensidad nominal.
- Potencia nominal.
- Indicación en kW para motores y generadores de corriente continua e inducción.
- Potencia aparente en kVA en generadores síncronos.
- Unidad de potencia, por ejemplo kW.
- Régimen de funcionamiento nominal.
- Factor de potencia.
- Sentido de giro.
- Velocidad nominal en revoluciones por minuto revol/min.
- Frecuencia nominal.
- “Err” excitación en máquinas de corriente continua y máquinas síncronas. “Lfr” inducido para máquinas asíncronas.
- forma de conexión del arrollamiento inducido.
- Máquinas de cc y síncronas: tensión nominal de excitación. Motores de inducido de anillos rozantes: tensión de parada del inducido (régimen nominal).
- Máquinas de cc y síncronas: corriente nominal de excitación. Motores de inducido de anillos rozantes: intensidad nominal del motor.
- Clase de aislamiento.
- Clase de protección.
- Peso en Kg o T.
- Número y año de edición de la disposición VDE tomada como base.

**Figura 23. Partes del motor eléctrico.**



Fuente: WHITE, Glen. Introducción al análisis de las vibraciones. Woburn MA: Azima DLI. 2010.

Después de tener claro que es un motor y las partes de él, describiremos el que poseen los aeroenfriadores a los cuales le crearemos el modelo a implementar en las siguientes tablas y figuras.

**Tabla 9. HE-1802/2802/3802.**

<b>MARCA: ABB MOTORS</b>				
<b>V</b>	<b>A</b>	<b>Hz</b>	<b>Rpm</b>	<b>KW</b>
460 D	37	60	1170	22
<b>Efici.</b>	<b>IP</b>	<b>Ens. CI</b>	<b>Rto LA</b>	<b>Rto LL</b>
0.82	W55	F	UN 312 E	6312/C3

Figura 24. HE-1802/2802/3802.



Tabla 10. HE-1801/2801/3801.

MARCA: ABB MOTORS				
V	A	Hz	Rpm	KW
460 D	60	60	1185	37
Efici.	IP	Ens. CI	Rto LA	Rto LL
0.83	W55	F	UN 315 E	6315/C3

Figura 25. HE-1801/2801/3801.



Según se observa en las placas de los motores, los rodamientos que utilizan estos son:

- Rodamiento rígido de bolas: Utilizado en el lado libre del motor (6312/C3 y 6315/C3).
- Rodamiento de rodillos cónicos: Utilizado en el lado acoplado del motor (NU612E y NU615E).

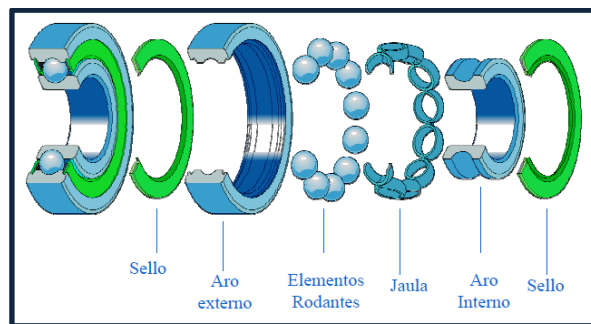
### 3.6 COJINETES A LOS QUE SE IMPLEMENTARA EL MODELO.

**3.6.1 Descripción.** Los cojinetes son elementos mecánicos, generalmente diseñados para soportar y mantener los ejes en una posición determinada. Se pueden dividir en dos clases:

- Cojinetes planos. Incluyen los bujes, cojinetes de dos partes (sencillos, radiales, de guías), cojinetes de cuatro partes y de empuje.
- Cojinetes antifricción o rodamientos. Son elementos normalizados que constan de dos aros concéntricos con caminos de rodadura, en la mayoría de los casos esféricos, sobre los que se desplazan unos cuerpos rodantes, bolas, rodillos, agujas, etc, cuya finalidad es el permitir la movilidad de la parte giratoria respecto de la fija, sirviéndole de apoyo y facilitando su desplazamiento.

Los rodamientos son piezas de acero aleado con cromo, manganeso, molibdeno, para facilitar la ejecución de rigurosos tratamientos térmicos y obtener piezas de gran resistencia al desgaste y a la fatiga.

**Figura 26. Componentes de un rodamiento.**

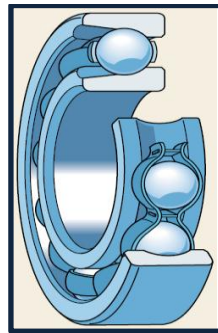


Fuente: Manual de rodamiento SKF

Cada tipo de rodamiento muestra propiedades características, que dependen de su diseño y que lo hace más o menos apropiado para una aplicación dada, los tipos de rodamientos son:

**3.6.1.1 Cojinetes de bolas:** Son usados en una gran variedad de aplicaciones, son fáciles de diseñar, no desarmables, capaces de trabajar a muy altas velocidades y requieren poco mantenimiento en servicio. Estas características, unidas a su ventaja de precio, hacen a estos rodamientos los más populares de todos los rodamientos.

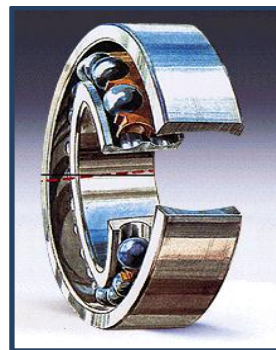
**Figura 27. Rodamiento rígido de bolas.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

**3.6.1.2. De bolas a rotula:** Gran capacidad de carga axial, que transmite movimiento con poca fricción y desgaste. Tiene dos hileras de bolas y un camino de rodadura esférico común en el aro exterior. Este tipo de rodamiento asume más desalineación que cualquier otro, incluso cuando se balancea, trabaja con suavidad.

**Figura 28. Rodamiento de bolas a rotula.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

**3.6.1.3. De bolas con contacto angular:** Diseñados para soportar cargas combinadas. Los rodamientos de dos hileras, simplifican las disposiciones ya que pueden soportar y fijar un eje en ambas direcciones. Los rodamientos de bolas con cuatro puntos de contacto ahorran espacio cuando las cargas axiales actúan en ambas direcciones.

**Figura 29. Rodamiento de contacto angular.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

**3.6.1.4. De rodillos cilíndricos:** Pueden soportar pesadas cargas radiales a altas velocidades. Los rodamientos de una hilera del diseño EC tienen una geometría interna optimizada que aumenta su capacidad de carga radial y axial, reduce su sensibilidad a la desalineación y facilita su lubricación. Los rodamientos completamente llenos de rodillos incorporan el máximo número de rodillos y no tienen jaula. Están diseñados para cargas muy pesadas y velocidades moderadas.

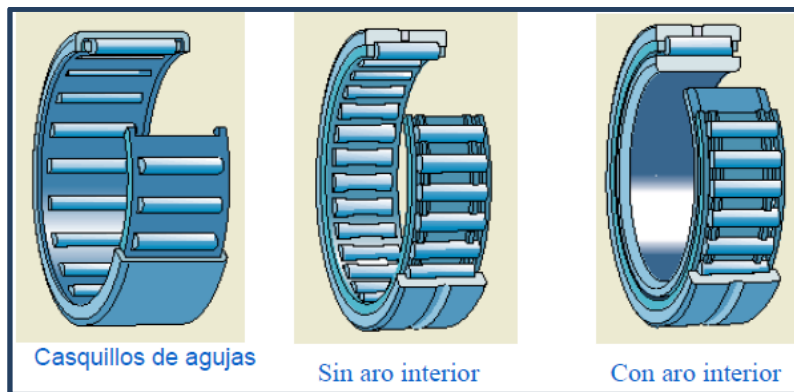
**Figura 30. Rodamiento de rodillos cilíndricos.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

**3.6.1.5. Rodamientos de agujas:** Su baja sección transversal les hace adecuados para espacios radiales limitados. Pueden soportar cargas radiales pesadas. La amplia variedad de diseños, incluyendo rodamientos combinados para cargas radiales y axiales, permite unas disposiciones de rodamientos sencillas, compactas y económicas.

**Figura 31. Rodamiento de agujas.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

**3.6.1.6. De rodillos a rotula:** Robustos rodamientos autoalineables que son insensibles a la desalineación angular. Ofrecen una gran fiabilidad y larga duración incluso en condiciones de funcionamiento difíciles. Montados en manguitos de fijación o de desmontaje y alojados en soportes de pie, proporcionan unas

disposiciones de rodamientos económicas. También disponibles con obturaciones para un funcionamiento libre de mantenimiento.

**Figura 32. Rodamiento de rodillos a rotula.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

**3.6.1.7. Rodamientos de rodillos cónicos:** Diseñados para pesadas cargas combinadas. Las excelentes relaciones de capacidad de carga/sección transversal proporcionan unas disposiciones de rodamientos económicas.

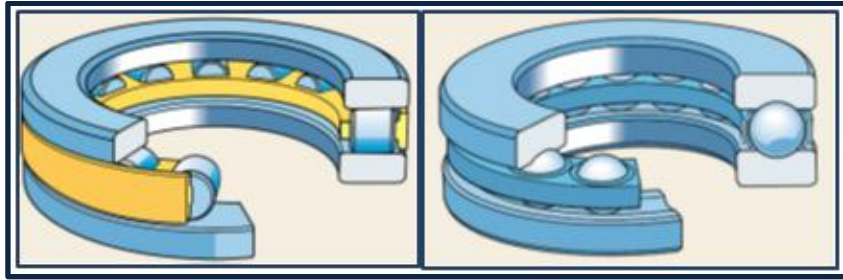
**Figura 33. Rodamiento de rodillos cónicos.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

**3.6.1.8 Rodamientos Axiales:** Diseñados para cargas puramente axiales. Están disponibles diseños de simple y de doble efecto y de bolas y de rodillos.

**Figura 34. Rodamientos axiales de bola y rodillo.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

### **3.6.2 Factores de diseño de un rodamiento.**

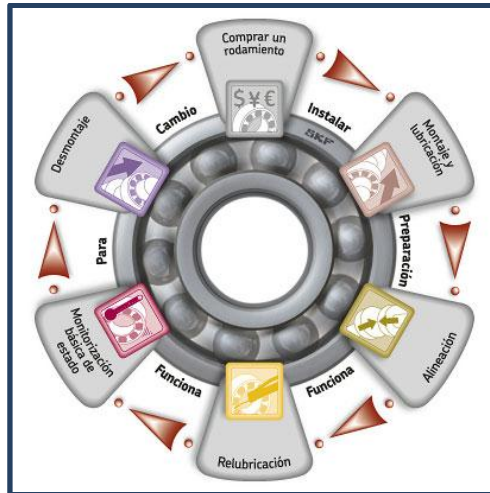
- Magnitud y dirección de las cargas.
- Velocidad de operación.
- Condiciones externas.
- Espacio disponible.
- Vida útil esperada.

**3.6.3 Ciclo de vida de un rodamiento.** Cada rodamiento tiene una vida útil precalculada, no obstante, las investigaciones han demostrado que, por varias razones no todos llegan a alcanzarla.

Las etapas más importantes que afectan considerablemente la vida de un rodamiento, se pueden reconocer durante el ciclo de vida mismo. En la siguiente figura mostraremos esas etapas.

Las etapas del ciclo de vida de un rodamiento son extremadamente importantes para que el rodamiento logre su vida útil máxima. Aplicando las adecuadas prácticas de mantenimiento y utilizando las herramientas adecuadas, se puede prolongar considerablemente la vida útil del rodamiento y aumentar la productividad y la eficiencia de la planta.

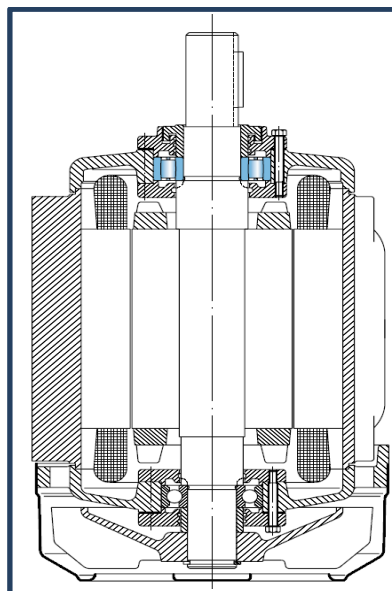
**Figura 35. Etapas que afectan la vida útil de los rodamientos.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

Los rodamientos que se tienen en el motor del diseño son 6312/C3 y 6315/C3 en el lado libre del motor y NU312E y NU315E en el lado carga del motor. Este es de trabajo en posición vertical, como se muestra en la figura siguiente.

**Figura 36. Disposición de los rodamientos en el motor.**



Fuente: Manual de rodamiento SKF

Para calcular la vida nominal de los rodamientos se usa la fórmula:

$$L = \left( \frac{C}{F} \right)^P$$

L= Vida nominal expresada en millones de revoluciones.

C= Carga dinámica base del rodamiento en KN.

F o Co= Carga equivalente sobre el rodamiento en KN.

P= Constante 10/3, en el caso de rodamientos de rodillos.

L = 1.2 millones de revoluciones aproximadamente en el caso de los rodamientos de los motores en mención. Equivalente a 3.8 años de duración en condiciones normal de trabajo.

### 3.6.4 Características de los rodamientos a implementar en el modelo

Figura 37. Características del rodamiento 6312/C3.

Dimensiones principales			Capacidad de carga		Velocidades nominales		Designación
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	Velocidad de referencia	Límite de velocidad	
mm			kN		rpm		-
60	130	31	85,2	52	11000	5600	<b>6312-2Z *</b>
							6312-2Z

**Factores de cálculo**  
k<sub>r</sub> 0,03  
f<sub>0</sub> 13

Fuente: catálogo general SKF.

**Figura 38. Características del rodamiento 6315/C3.**

Principal dimensions			Basic load ratings		Speed ratings		Designation
d	D	B	dynamic C	static C <sub>0</sub>	Reference speed	Limiting speed	* SKF Explorer bearing
mm			kN		r/min		-
75	160	37	119	76,5	9000	4500	<b>6315-2Z *</b>

Calculation factors  
 $k_f$  0,03  
 $f_0$  13

Fuente: catálogo general SKF.

**Figura 39. Características del rodamiento NU312 ECP.**

Dimensiones principales			Capacidades de carga básica		Designación	Aro angular
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	* rodamiento SKF Explorer	Designación
mm			kN		-	-
60	130	31	173	160	NU 312 ECP *	HJ 312 EC

**Factor de cálculo**  
 $k_f$  0,15  
 $e$  0,2 Y 0,6

HJ 312 EC  
Masa kg 0,22

Fuente: catálogo general SKF.

**Figura 40. Características del rodamiento NU315 ECP.**

Dimensiones principales			Capacidades de carga básica		Designación	Aro angular
d	D	B	C	estática C <sub>0</sub>	* rodamiento SKF Explorer	Designación
mm			kN		-	-
75	160	37	280	265	NU 315 ECP *	HJ 315 EC

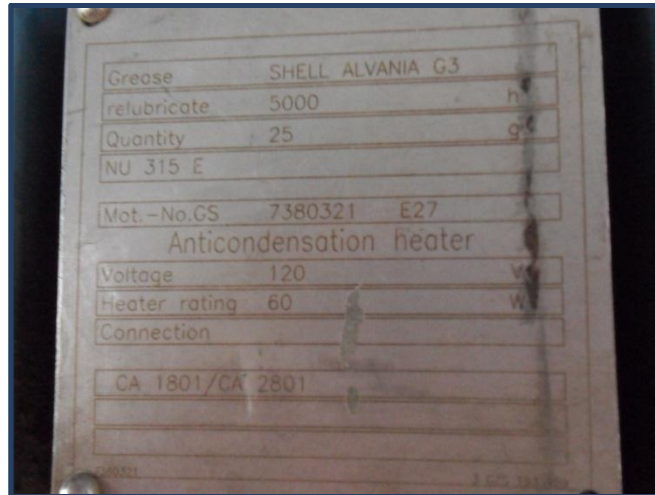
  

The figure contains three technical drawings of the NU315 ECP roller bearing. The first drawing on the left shows the bearing with dimensions: outer diameter D=160 mm, inner diameter d=75 mm, width B=37 mm, and a distance from the inner diameter to the outer diameter of the roller of f<sub>1,2min</sub> 2,1 mm. The second drawing in the middle shows the bearing with dimensions: outer diameter D<sub>amax</sub> 148 mm, inner diameter d<sub>amax</sub> 92 mm, and a distance from the inner diameter to the outer diameter of the roller of f<sub>1max</sub> 2 mm. The third drawing on the right shows the bearing with dimensions: outer diameter D<sub>1</sub> 136 mm, inner diameter d<sub>1</sub> 104 mm, width B<sub>2</sub> 16,5 mm, and a distance from the inner diameter to the outer diameter of the roller of f<sub>3,4min</sub> 2,1 mm. Below the drawings, the load factors are listed: Factor de cálculo k<sub>r</sub> 0,15, e 0,2, and Y 0,6. The weight is listed as HJ 315 EC Masa kg 0,39.

Fuente: catálogo general SKF.

**3.6.5 Re-Lubricación de los Rodamientos a Implementar en el Modelo.** Cabe anotar que se realizara los cálculos para los rodamientos de rodillos cilíndricos (NU315E y NU312E), instalados en el lado carga del motor, porque los rodamientos del lado libre (6315/C3 y 6312/C3), poseen sellos permanentes a los dos lados que protegen contra el agitación de la grasa y su contaminación, además son lubricados de por vida y la grasa que utilizan es de litio o complejo de litio y trabajan sin re-lubricar hasta que se presenta la falla, la vida útil típica de estos rodamientos es de 2 a 4 años dependiendo de la vida útil de la grasa aunque sus limitaciones están restringidas a menos de 3600 revoluciones por minuto (rpm). Se muestra en la figura 41, el tipo, cantidad y horas de re-lubricación de los rodamientos que poseen estos motores según placa, sin embargo se realizara un estudio para hallar la cantidad, horas y tipo de grasa, por el medio en que se encuentran los motores, estas características pueden cambiar.

**Figura 41. Placa del motor con características de re-lubricación.**



**3.6.6 Calculo de la cantidad de grasa adecuada.** Hallando por medio de la fórmula la cantidad de grasa indicada tenemos:

$$G = D * B * X$$

G = Cantidad de grasa en gramos.

D = Diámetro exterior del rodamiento en mm.

B = Ancho del rodamiento en mm.

X = 0,001 = Lubricación diaria.

0,002 = Lubricación semanal.

0,003 = Lubricación mensual.

0,005 = Lubricación anual.

NU315E

$$G = 160\text{mm} * 37\text{mm} * 0,005 = 29,6 \text{ g}$$

UN312E

$$G = 130 * 31 * 0.005 = 20,1$$

La re-lubricación según la placa es de (5000 Hras), 6.9 meses por lo que se tomó el factor anual.

Para saber el llenado total del rodamiento se debe utilizar el DmN (producto de las rpm por el diámetro medio), este es igual a:

$$DmN = N (D + d) / 2$$

$$DmN (NU315E) = 1170 (160 + 75) / 2 = 137475.$$

$$DmN (NU312E) = 1170 (130 + 60) / 2 = 111150.$$

DmN por debajo de 100000, se multiplica la formula por 1.

DmN entre 100000 y 350000, se multiplica por 0,6.

DmN por encima de 350000, se multiplica por 0,4.

NU315E


$$G = 160\text{mm} * 37\text{mm} * 0,005 = 29,6 \text{ g} * 0,6 = +/- 18\text{g}.$$

UN312E

$$G = 130\text{mm} * 31\text{mm} * 0.005 = 20,1 * 0,6 = +/- 12\text{g}.$$

**3.6.7 Tipo de grasa para la re-lubricación.** Según el fabricante la grasa adecuada para la re-lubricación de estos rodamientos es la Shell Albania 3, a continuación relacionamos la ficha técnica de la grasa.

Figura 42. Ficha técnica de la grasa Shell Alvania 3.


Ficha Técnica de Productos

## Shell Alvania Grease RL 3

**Grasa multipropósito para aplicaciones industriales.**

JABÓN ESPESANTE	CONSISTENCIA NLGI	RANGO DE TEMPERATURA	VISCOSIDAD DEL ACEITE BASE		ADITIVO EXTREMA PRESIÓN	LUBRICANTE SÓLIDO	RESISTENCIA AL AGUA
LITIO	3	-30°C o +130°C	40°C 100 cSt	100°C 10,2 cSt	-	-	☆☆

Shell Alvania Greases RL son grasas industriales multipropósito que están hechas a base de un nuevo jabón espesante de hidroxistearato de litio reforzado con aditivos antioxidantes, antidesgaste y antiherrumbre.

**Aplicaciones**

- Rodamientos planos y de rodillos.
- Rodamientos de motores eléctricos.
- Rodamientos sellados de por vida.
- Rodamientos de bombas de agua.

Las grasas Shell Alvania Greases RL pueden utilizarse en un amplio rango de condiciones de operación. En condiciones de altas temperaturas, o bien en presencia de agua, las grasas Shell Alvania Greases RL ofrecen ventajas muy significativas en comparación con grasas de litio convencionales.

Shell Alvania Grease RL 3 es una grasa industrial de mediana/alta consistencia de alto desempeño. Se recomienda particularmente para la lubricación de rodamientos de motores eléctricos.

**Propiedades y Beneficios**

- **Desempeño confiable a altas temperaturas.**  
Muy buen desempeño a temperaturas de hasta + 130° C. Esto implica una mayor vida útil del rodamiento.
- **Buena estabilidad mecánica y de oxidación.**  
Resiste la formación de depósitos causada por la oxidación a altas temperaturas. Shell Alvania Greases RL son extremadamente estables bajo condiciones de vibración y no presentan fugas, incluso en rodamientos bajo permanentes cargas de impacto.

- **Buena resistencia a la corrosión.**  
Protege eficazmente en ambientes húmedos.
- **Larga vida útil en el almacenamiento.**  
No sufre cambios de consistencia durante períodos prolongados de almacenamiento.

**Intervalos de Reengrase**

Para aquellos rodamientos que operen a temperaturas cercanas a la temperatura máxima recomendada, es aconsejable revisar los intervalos de reengrase.

**Salud y Seguridad**

Las indicaciones de Salud y Seguridad están disponibles en la Hoja de Seguridad que se puede obtener por medio de su representante Shell.

**Proteja el Medio Ambiente**

Lleve las grasas a puntos de recolección autorizados. No contamine con grasas los drenajes, el suelo, el mar, ni las corrientes de agua.

**Soporte Técnico**

Cualquier consulta respecto de aplicaciones no cubiertas en este documento puede obtenerla de su representante Shell.

<b>Características Típicas</b>			
<b>Shell Alvania Grease RL</b>			<b>3</b>
Consistencia NLGI			3
Jabón Espesante			Hidroxistearato de litio
Aceite Base			Mineral
Viscosidad del aceite base	a 40 °C      cSt	IP 71/ASTM-D445	100
	a 100 °C      cSt		10,2
Penetración Trabajada	a 25 °C      0,1mm	IP 50/ASTM-D217	220-250
Punto de goteo	°C	IP 132/ ASTM-D566-76	190
Estas características son típicas de la producción actual y pueden variar con futuras producciones de acuerdo a especificaciones Shell.			

Fuente: <http://www.epc.shell.com/Docs/GPCDOC.pdf>

En la planta se utiliza la grasa multipropósito Unirex 2 y puesto que todos los aceites y grasas se manejan con la marca Mobil, se evaluó la elección de la más apropiada para la lubricación en los rodamientos de los motores.

Se llegó a la conclusión de utilizar la grasa unirex 3 porque guiados por la ficha técnica, es un producto de calidad Premium, con complejo de litio, adecuada para trabajo a altas temperaturas en rodamientos, se pueden utilizar en una amplia gama de aplicaciones industriales y particularmente recomendada para la lubricación de motores eléctricos, es de grado NLGI 3, utilizada en aplicaciones especiales como: cojinetes de motores eléctricos sellados de por vida, cojinetes montados verticalmente y aplicaciones de gran velocidad, además que es por sus características, similar a la que recomienda el fabricante.

**Figura 43. Características de la grasa Unirex 3.**

Propiedades y Beneficios	
Las grasas UNIREX N ofrecen excelentes prestaciones a altas y bajas temperaturas, resistencia al agua y la corrosión y una prolongada vida de servicio en una amplia gama de aplicaciones constituidas por cojinetes.	
Propiedades	Ventajas y Beneficios potenciales
Excelentes prestaciones a altas temperaturas	El espesante de complejo de litio confiere resistencia al reblandecimiento / desgaste total de los cojinetes a temperaturas de hasta 190°C
Extraordinaria vida útil de la grasa	Las pruebas de laboratorio con cojinetes muestran que la grasa presenta un extraordinario rendimiento a temperaturas de los cojinetes mayores de 120°C
Muy buenas características a bajas temperaturas	Los requisitos de potencia de arranque son bajos a temperaturas de hasta al menos -29°C y la grasa puede ser adecuada para su uso a temperaturas de hasta -40°C en aquellas aplicaciones en las que el par no sea limitante. Cumple los requisitos DIN de presión de flujo a -20°C.
Excelente estabilidad mecánica	Presenta una excelente resistencia al reblandecimiento debido al trabajo mecánico
Excelente resistencia al agua y la corrosión	Resiste el lavado con agua y protege a los cojinetes frente a la corrosión
Excelente rendimiento en aplicaciones de alta velocidad	Las características de accesibilidad proporcionan excelentes prestaciones en los rodamientos con pistas profundas que funcionan a altas velocidades. Unirex N3 se recomienda cuando el valor de DmN (diámetro medio del cojinete x la velocidad de rotación en rpm) sea mayor de 360.000

Características típicas		
Unirex N	2	3
Tipo de espesante	Complejo de litio	Complejo de litio
Grado NLGI	2	3
Color, visual	Verde	Verde
Textura	Suave, untuosa	Suave, untuosa
Punto de gota, ASTM D 2265, °C,	230	230
Viscosidad del aceite base, ASTM D 445, cSt @ 40°C	115	115
Índice de viscosidad del aceite base, ASTM D 2270	95	95
Penetración, trabajada, 60 golpes, ASTM D 217, mm/10	280	235
Cambio en la penetración tras 100.000 golpes, ASTM D 217, mm/10	25	30
Separación del aceite, ASTM D 6184, % masa @100°C / 30 horas	1.5	0.6
Prueba de corrosión EMCOR, ASTM D 6138 (agua destilada), calificación	0,1	0,1
Lavado con agua @ 79°C, ASTM D 1264, % masa	3.7	3.5
Vida útil de la grasa, DIN 51821 (FE-9), L50 horas @ 140°C	283	448

Fuente: <http://corporate.exxonmobil.com/en/>

**3.6.8 Calculo de la frecuencia de re-lubricación.** Para esto se utilizara la siguiente formula:

$$Fr = \left( \frac{14.000.000}{\sqrt{\text{rpm ID}}} - 4ID \right) \cdot \left( A \cdot B \cdot C \right)$$

Fr = Frecuencia de re-lubricación dada en horas de operación.

Rpm = revoluciones por minuto.

ID = Diámetro interno del cojinete dado en mm.

A = Constante de la clase del cojinete.

- ❖ 1 para cojinetes cónicos.
- ❖ 5 para cojinetes cilíndricos.
- ❖ 10 para cojinetes de bolas.

B = Constante de temperatura.

- ❖ 1 para operación por debajo de 70°C.
- ❖ 0,5 para temperaturas entre 70 a 75 °C.

- ❖ 0,25 para operación entre 75 y 80 °C.
- ❖ 0,12 para operación entre 80 y 90 °C.
- ❖ 0,6 para operación de más de 90 °C.

C = Constante de contaminación.

- ❖ 0,1, ambientes muy contaminados.
- ❖ 0,5, ambientes medianamente contaminados.
- ❖ 1, ambientes levemente contaminados.

0.8 = Factor de seguridad para equipos esenciales.

0.5 = Factor para equipo de trabajo en vertical.

### **NU315E**

5458 hras \* 0,8 \* 0,5 = +/- 2184 hras = 90 días.

### **NU312E**

6822 hras \* 0.8 \* 0.5 = +/- 2729 hras = 114 Días

Después de haber calculado la cantidad de grasa adecuada, la frecuencia correcta y la homologación de la grasa con la marca que se utiliza en la planta, se realizara el diseño de la re-lubricación predictiva, esto teniendo como soporte el equipo Ultra-pro 9000 de emisiones acústicas.

## **3.7 DISEÑO DE LUBRICACIÓN PREDICTIVA.**

La lubricación predictiva tiene como principal función, lubricar los equipos a tiempo, con el lubricante adecuado y la cantidad necesaria, además detectando posibles anomalías antes que cualquier otra técnica predictiva, permitiendo cumplir la lubricación de acuerdo al estado actual de la condición, reducir los costos de lubricación por menor volumen de aceites o grasas, reducir costos de mantenimiento y garantizar una vida útil más duradera de los equipos.

**3.7.1 Las emisiones acústicas como técnica predictiva.** Las emisiones acústicas en un grupo predictivo (CBM), se puede utilizar como la primera línea de defensa contra los síntomas de las fallas, las emisiones acústicas desde muy temprano dispara la alarma. Algunos técnicos siguen realizando análisis de vibraciones a profundidad en cientos de rodamientos que pudieran o no tener una condición de falla. Otros técnicos reconocen que su tiempo está mejor invertido primero identificando con emisiones acústicas aquellos equipos defectuosos con monitoreo en base a condiciones. Al utilizar emisiones acústicas para filtrar lo bueno de lo malo, ellos se permiten tener más tiempo para realizar análisis más profundo únicamente en aquellas máquinas designadas como “en falla” mediante la técnica.

Avances recientes extienden la utilidad de las emisiones acústicas como una tecnología de diagnóstico y análisis. Nuevamente sirviendo como un compañero simbiótico al análisis de vibraciones, el ultrasonido se desempeña extremadamente bien evaluando defectos en equipos rotatorios lentos, un área donde se sabe que tiene dificultades el análisis de vibraciones. Uno de estos avances incluye la capacidad de medir, almacenar y analizar datos dinámicos.

La lubricación acústica no es la cura del todo para finalizar la lubricación. Es, sin embargo, una metodología que puede ser aprendida y usada para estandarizar las mejores prácticas dentro de una planta. Como en cualquier programa nuevo, todo el personal debe estar a bordo, desde gerencia hasta la persona que engrasa el equipo. Lleva tiempo implementar. El tiempo es dinero y en estos días de ahorro, la fuerza de reducción y más por menos, pudiera ser difícil de implementar. Sin embargo, creo firmemente, que si un programa de lubricación acústica de ultrasonido es implementado, su organización verá un incremento en el tiempo y una significativa reducción en reparaciones.

### 3.7.2 Equipo Ultra probé 9000.

Figura 44. Ultra probe 9000.



El equipo de emisiones acústicas<sup>15</sup>, Ultraprobe 9000, es una herramienta versátil, con muchas características que harán la inspección, fácil, rápida y precisa. Es muy simple de usar y tiene funciones que proveerán muchas alternativas para su inspección y análisis de datos.

El Ultraprobe 9000, tiene muchas aplicaciones que van desde la detección de fugas hasta la inspección mecánica y puede ser usado para determinar tendencia, para análisis o simplemente detectar un problema. Los datos pueden ser leídos fácilmente en la pantalla, esta ofrece lecturas calibradas en decibeles y un gráfico de barras de 16 segmentos, que registra al instante los cambios en la intensidad del sonido y simultáneamente registra la retención de picos cuando escanea.

Los colectores de datos ultrasónicos detectan ondas de presión de sonido generalmente en el rango de frecuencia entre 35kHz a 40kHz. Las ondas actúan

---

<sup>15</sup> [www.uesystems.com](http://www.uesystems.com).

sobre un sensor resonante para crear una pequeña carga eléctrica. La carga se amplifica, mide y convierte (heterodionizada) a una frecuencia audible correspondiente que se escucha en un audífono de alta calidad y puede grabarse en la memoria del colector de datos. Los datos ultrasónicos pueden proporcionar una alarma inmediata en el campo o pueden analizarse posteriormente. Existen muchos síntomas de defectos y condiciones de defectos para detectarse en equipos dinámicos que son identificables primero por ultrasonido.

**3.7.3 Creación de rutas de re-lubricación.** Para dar comienzo con la re-lubricación de los motores de los aerofriadores, se debe crear las MST (Maintenance scheduled task), o tareas de mantenimiento programado, crear los SJ (Estándar Job) o estándar de trabajo con sus respectivas tareas y activarlas en el CMMS (Computerized Maintenance Management System), o sistema de gerencia de mantenimiento computarizado, con que cuenta la empresa, en este caso, sistema Ellipse, para esto a cada ruta se le da una descripción, un alcance con las tareas que debe de tener cada ruta (equipos que harán parte de cada ruta), se dará un estimado de horas hombre efectivas a cada tarea y con esto se da unas horas totales a cada ruta, una frecuencia que ya fue calculada y los recursos que se requiere para ejecutar esta actividad.

**Tabla 11. Estrategia predictiva, motores, aerofriadores de alta tren uno.**

Descripción de la MST	Standar Job	Tag Equipo	Horas Hombre	Recursos	Freq. Seman	Freq. Dias	Horas Total Anuales
Re-lubricación Motores Aerofriadores de Turbina Alta Presión Tren Uno	129	CA-HEM-1801A	1	2	12	90	56
		CA-HEM-1801B	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801C	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801D	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801E	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801F	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801G	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801H	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801I	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801J	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801K	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801L	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801M	1	2	12	90	
		CA-HEM-1801N	1	2	12	90	
<b>Total Horas MST</b>			<b>14</b>				

**Tabla 12. Estrategia predictiva, motores, aerofriadores de alta tren dos.**

Descripción de la MST	Standar Job	Tag Equipo	Horas Hombre	Recursos	Freq. Seman	Freq. Dias	Horas Total Anuales
Re-lubricación Motores Aerofriadores de Turbina Alta Presión Tren Dos	129	CB-HEM-2801A	1	2	12	90	56
		CB-HEM-2801B	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801C	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801D	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801E	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801F	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801G	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801H	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801I	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801J	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801K	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801L	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801M	1	2	12	90	
		CB-HEM-2801N	1	2	12	90	
<b>Total Horas MST</b>			<b>14</b>				

**Tabla 13. Estrategia predictiva, motores, aeroenfriadores de alta tren tres.**

<i>Descripción de la MST</i>	<i>Standard Job</i>	<i>Tag Equipo</i>	<i>Horas Hombre</i>	<i>Recursos</i>	<i>Freq. Seman</i>	<i>Freq. Dias</i>	<i>Horas Total Anuales</i>
<i>Re-lubricación Motores Aeroenfriadores de Turbina Alta Presión Tren Tres</i>	129	CC-HEM-3801A	1	2	12	90	56
		CC-HEM-3801B	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801C	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801D	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801E	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801F	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801G	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801H	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801I	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801J	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801K	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801L	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801M	1	2	12	90	
		CC-HEM-3801N	1	2	12	90	
<i>Total Horas MST</i>			14				

**Tabla 14. Estrategia predictiva, motores, aeroenfriadores de media presión.**

<i>Descripción de la MST</i>	<i>Standard Job</i>	<i>Tag Equipo</i>	<i>Horas Hombre</i>	<i>Recursos</i>	<i>Freq. Seman</i>	<i>Freq. Dias</i>	<i>Horas Total Anuales</i>
<i>Re-lubricación Motores Aeroenfriadores de Turbinas de Media Presión.</i>	129	CA-HEM-1802A	1	2	16	120	36
		CA-HEM-1802B	1	2	16	120	
		CA-HEM-1802C	1	2	16	120	
		CA-HEM-1802D	1	2	16	120	
		CB-HEM-2802A	1	2	16	120	
		CB-HEM-2802B	1	2	16	120	
		CB-HEM-2802C	1	2	16	120	
		CB-HEM-2802D	1	2	16	120	
		CC-HEM-3802A	1	2	16	120	
		CC-HEM-3802B	1	2	16	120	
		CC-HEM-3802C	1	2	16	120	
		CC-HEM-3802D	1	2	16	120	
		<i>Total Horas MST</i>			12		

#### **3.7.4 Procedimiento de re-lubricación con ayuda de emisiones acústicas.**

Para la implementación de cualquier técnica predictiva en una estrategia de mantenimiento, en este caso la ruta de re-lubricación con ayuda de un equipo de emisiones acústicas, es tomar una línea base para cada motor y cada rodamiento, a continuación se realizara un procedimiento para realizar la primera toma de datos:

Nota: Este procedimiento debe ser revisado y aprobado por el ingeniero de mantenimiento predictivo y divulgado a su equipo de trabajo.

- Título: Procedimiento para re-lubricación de rodamientos de los motores eléctricos de proceso de gas de las turbinas de reinyección del CPF Cupiagua por medio de emisiones acústicas.
- Objetivo: Mejorar las condiciones de funcionamiento mecánico y dinámico, para conservar la integridad de los equipos, mediante la aplicación de grasa lubricante con la técnica de emisiones acústicas, en los rodamientos de los motores eléctricos de proceso de gas de las turbinas de reinyección del CPF Cupiagua.
- Alcance: Realizar la aplicación de grasa lubricante, monitoreando con emisiones acústicas, en la caja de rodamientos de los motores eléctricos de los aeroenfriadores, reponiendo la cantidad de grasa adecuada, con la finalidad de evitar fallas tempranas en el sistema. Aplicando los estándares de seguridad, calidad y protección al medio ambiente.
- Herramientas y equipos:
  - ✓ Equipo de emisiones acústicas ultra-probe 9000.
  - ✓ Inyector de grasa.
  - ✓ Grasa lubricante (según homologación realizada).
  - ✓ Tela absorbente y bayetilla.
  - ✓ Escalera de tres pasos.
  - ✓ Bolsas rojas.

- Precauciones de salud y seguridad: Los riesgos que se puedan presentar en la tarea, relacionados con aspectos de seguridad industrial y salud ocupacional, serán analizados en detalle para la ejecución de la labor, en el análisis de riesgo anexo al permiso de trabajo, el cual efectúa en su valoración, un análisis de seguridad para la ejecución del trabajo, evaluando los riesgos de forma particular y definiendo los controles para minimizar su impacto.

El permiso de trabajo debe ser discutido por los ejecutantes antes de empezar la labor, con el fin de identificar los peligros, conocer los controles y evitar incidentes que puedan originar accidentes de trabajo o enfermedades profesionales a quien ejecuta la tarea. Los riesgos evaluados en las valoraciones de riesgo que puedan surgir en el análisis de permiso de trabajo y la forma de minimizarlo, son de obligatorio conocimiento y aplicación.

El personal involucrado en la tarea a ejecutar, debe de tener claro los conceptos de peligro y riesgo, para que el panorama anexo al permiso de trabajo sea lo más preciso, evaluando los riesgos en forma particular y definiendo los controles para minimizarlos.

Si se considera que el trabajo a realizar es inseguro, se está en la obligación y tiene la autoridad para detenerlo.

- Tener cuidado con superficies resbalosas e irregulares, residuos aceitosos, equipos y herramientas, dispuestos en sitio.
- Siempre que se encuentren peligros adicionales a los evaluados en la valoración de riesgos, se deben contemplar en el AST (análisis de trabajo seguro), con sus respectivos controles.
- Seguir recomendaciones del procedimiento y AST.
- Estar alerta ante los peligros biológicos que se puedan presentar en el área.
- Atender los controles que se contemplaron en el permiso de trabajo.
- Hacer uso de los elementos de protección personal (EPP) básicos, para la ejecución de la actividad. Por el riesgo de equipos rotando, no se debe utilizar

las prendas de vestir sueltas, ni objetos que puedan ser atrapados por las correas o poleas en movimiento.

- Seguir las recomendaciones de la ficha técnica de la grasa unirex 3.
- Descripción de actividades: Este procedimiento debe ser revisado y aprobado por el ingeniero de mantenimiento predictivo y cualquier cambio realizado debe tener la aprobación de él, su aplicación se debe realizar paso a paso y debe de ser divulgado a los ejecutantes antes de realizar la labor.
- Realice el alistamiento de equipos y herramientas, e inspecciónelas antes de trasladarlas al sitio de trabajo o hacer uso de ellas.
- Coordine con la autoridad de área, la apertura del permiso de trabajo.
- Realizar la charla de seguridad en sitio, previa a iniciar el trabajo.
- Verifique las condiciones del sitio de trabajo, trabajo sobre plataforma, riesgos biológicos, equipos rotando.
- Calibrar el equipo de emisiones acústicas a 40 KHz, colocar la boquilla que mejor se adapte para la toma de los datos. Figura 45.

**Figura 45. Calibrar el equipo a 40 KHz.**



- Después de elegir el punto más cerca al rodamiento para tomar el dato, sin correr el riesgo de sufrir atrapamiento, tomar la primera medición y anotar el

dato. Se debe de ser posible marcar el punto donde se toma el dato para realizar las próximas mediciones.

- Realizar la aplicación de un 40% de la cantidad de grasa que se calculó anteriormente, para esto con anterioridad se debe tomar la medida de a cuantos gramos equivale una aplicación (bombazo), de la engrasadora. Se debe revisar que la conexión de la manguera de la engrasadora con la grasera de la carcasa del motor, este correcta, revisar que no haya fugas de grasa para garantizar que el lubricante llegue al rodamiento.
  - Después de 5 minutos de haber aplicado la grasa lubricante, realizar una nueva medida y anotarla.
  - Comparar los datos, si el nivel de decibeles se mantuvo estable o se incrementó, se debe terminar el procedimiento para ese punto de toma de datos (En el caso de este modelo, se tomara en un solo punto por equipo, lado acoplado).
  - Si se observa un decremento de los decibeles en la segunda medida, se debe aplicar un 30% más de grasa, esperar 5 minutos y volver a medir.
  - Si continúa descendiendo el nivel de decibeles, se completara el 100% de grasa calculada, se esperara 5 minutos y se toma la última medida.
  - Realizar el procedimiento anterior para cada uno de los motores de la ruta.
  - Antes de retirarse del área, se debe dejar en correcto orden y aseo, asegurándose de limpiar el excedente de grasa de los motores y de partes de la estructura en donde pudo haber caído, además de avisar a la autoridad de área, la terminación del trabajo y la salida del sitio.
- Registro de revisión: Este procedimiento debe llevar un registro de revisión que contenga; la fecha de creado, la fecha de vencimiento, el autor, el revisor y el aprobador.

### 3.8 LÍNEA BASE.

La línea base es la regla que va a permitir analizar los resultados obtenidos y proceder a tomar las acciones necesarias, para obtenerla se va a tomar el método comparativo, en este caso en la ruta a re lubricar, se tienen varios equipos (12 y 14 en cada ruta), con las mismas características, rodamientos iguales, la misma carga, el mismo proceso y el mismo ambiente natural y las mismas revoluciones por minuto (rpm).

Luego de obtener los primeros datos de cada equipo de las rutas de re lubricación creadas (se toma como referencia la última medida tomada en cada punto), se comparan, la línea base será la lectura más baja de todos los equipos de la ruta. Después de realizar más de tres tomas, se puede volver a sacar una nueva línea base, basados en el histórico de los equipos (se promedian los datos de cada equipo y el resultado se compara con el de los restantes equipos, volviendo a ser la línea base, la menor lectura.

Luego de obtener la línea base, las demás tomas siguiendo la frecuencia calculada, se analizara siguiendo la tabla 15.

**Tabla 15. Análisis del comportamiento y acción a ejecutar.**

<b>MODO DE FALLA DEL RODAMIENTO</b>	<b>DECIBELES SOBRE LINEA BASE</b>	<b>ACCION</b>
<i>Pre-falla o falta de lubricación</i>	<i>De 8 a 10 Db</i>	<i>Re lubricar y retomar medidas</i>
<i>Comienzo de falla</i>	<i>De 10 a 12 Db</i>	<i>Seguimiento en el tiempo</i>
<i>Falla</i>	<i>16 Db</i>	<i>Programar el replazo</i>
<i>Falla Catastrófica</i>	<i>35 a 50 Db</i>	<i>Reemplazar de inmediato</i>

Fuente: <http://www.uesystem.com/guia de lubricación>.

## CONCLUSIONES

- Se dio un alcance inicial a los equipos del CPF, después de revisar, cantidad, mayor número de fallas y falta de estrategia preventiva de engrase.
- Se realizaron los cálculos pertinentes y se compararon con la frecuencia dada por el fabricante para obtener la frecuencia correcta de re-lubricación de los equipos, en este caso los motores eléctricos de los coolers de proceso de gas.
- Se investigó en el manual del equipo y en la placa del motor, el tipo de grasa que recomienda el fabricante y después de los estudios e investigaciones realizadas se homologó la grasa para cumplir con la teoría de lubricación basada en confiabilidad, esto con el fin de contribuir a la buena disponibilidad y operación de los equipos.
- Determinar la cantidad exacta de grasa que se debe aplicar a los rodamientos de estos equipos.
- Se realizaron cálculos para determinar la cantidad de grasa y la forma correcta de inyectarla a los rodamientos de los motores eléctricos.
- Se realizó un procedimiento basados en estudios de empresas que han implementado este método, de artículos, folletos y manual del equipo ultra-probe 9000, de la empresa uesystems, reconocida mundialmente por la tecnología y avance en temas de aplicación de ultrasonido y emisiones acústicas
- Realizar seguimiento al indicador de emergencias después de implementada esta estrategia para ver el resultado conseguido.

## BIBLIOGRAFÍA

ALBARRACÍN AGUILÓN, Pedro Ramón. Mantenimiento Predictivo: Análisis de Aceites. Universidad Industrial de Santander-UIS. Post Grado en Gerencia de Mantenimiento. Cartagena, 2007.

ALBARRACÍN AGUILÓN, Pedro Ramón. Tribología y Lubricación. Bucaramanga: Litochoa, 1993. 980 p.

ASME INTERNATIONAL. Análisis vibracional en equipos rotativos y mantenimiento Predictivo. Pag 1-11.

BERNAL MUÑOZ, Edgar. Mantenimiento y mecánica en mantenimiento predictivo. Junio, 2002. vol 3, no. 12; p. 63–69.

BORRAS PINILLA, Carlos, Mantenimiento Preventivo. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2013.

CASTILLO ARANGO, Ricardo. Análisis de aceites sintéticos en Predictiva. Quito, 1998. p.49-54.

Electric Power Research Institute (EPRI), Predictive Maintenance Self-Assessment Guidelines For Nuclear Power Plants, 2000. P 1-1.

GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ, Carlos Ramón. Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2006.

MANCILLA VIZCAYA, Javier Mauricio. Diseño e implementación del plan de lubricación productiva para la empresa Fliber Glass Colombia S.A planta Mosquera. Monografía de Grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2004. 181 p.

RODRÍGUEZ M, Orlando; TORRES BELTRÁN, Alexander y TURCA RODRÍGUEZ, Wilson. Estrategia de mantenimiento para la nueva planta de gas de Ecopetrol S.A en el CPF Cupiagua. Monografía de Grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2012. 108 p.

RUIZ ACEVEDO, Adriana María. Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo. Monografía de Grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, 2012. 130 p.

Technical Partner Group S.A. Ultrasonido I. Bogotá, 2013.

WHITE, Glen. Introducción al análisis de las vibraciones. Woburn MA: Azima DLI. 2010. 143 p.