



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción

“Implantación de Análisis de Aceite en Motores de Combustión
Interna de Ciclo Diesel”

TESIS DE GRADO

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Gabriel Alejandro Arellano Ortiz

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2009

A G R A D E C I M I E N T O

A Dios y a la Virgen María.

A la empresa REPSOL YPF
por brindarme la oportunidad
de desarrollar mi tesis.

Al Ing. Manuel Helguero G,
Director de Tesis.

Al Dr. Manuel Rojas N.

Al Ing. Jorge Félix N.

A mis familiares y amistades,
sin el apoyo de ustedes no
hubiese sido posible alcanzar
esta meta.

DEDICATORIA

A MI MADRE

A MI PADRE

A MIS FAMILIARES

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Manuel Helguero G.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Jorge Félix N.
VOCAL PRINCIPAL

Ing. Gonzalo Zavala O.
VOCAL ALTERNO

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Gabriel Alejandro Arellano Ortiz

RESUMEN

REPSOL YPF es una prestigiosa empresa petrolera multinacional, que opera en el Bloque 16, ubicado en el Oriente Ecuatoriano, en la Provincia de Orellana. La empresa cuenta con su propia Planta de Generación a Crudo que es la encargada de generar y suministrar Energía Eléctrica para la extracción, transporte y tratamiento de Crudos Pesados. La Planta opera en base a seis Motores de Combustión Interna de Ciclo Diesel de procedencia finlandesa.

Estos motores son considerados como equipos críticos por el rol fundamental que desempeñan en el proceso de extracción del crudo pesado. Como parte de la estrategia de mantenimiento de estos motores, se ha venido implantando el Mantenimiento Proactivo y Predictivo (Análisis de Vibraciones y Análisis de Aceite), además del Mantenimiento Basado en Condición mediante el monitoreo de varios parámetros operacionales. Se han tomado las muestras de aceite y se han llevado las tendencias de los Análisis de Aceite desde hace un año y los Datos Operacionales desde hace siete meses, en todos los motores. Sin embargo, estos no se han interpretado adecuadamente, ni existe formato de reportes para presentar los diagnósticos. Esta tesis tiene como objetivo principal implantar el Análisis de Aceite en un motor modelo, utilizando la Técnica SACODE para establecer los Límites Condenatorios.

La metodología se basa en recolectar las muestras de aceite cada 250 horas de funcionamiento. Las muestras son enviadas al laboratorio YPF de Argentina para su análisis. Posteriormente se reciben los resultados vía Internet, para luego tabularse en un formato donde se llevan las

tendencias. Los datos operacionales son recolectados de las pantallas del sistema de monitoreo del motor, con la misma frecuencia que el Análisis de Aceite. Asimismo se tabulan los datos y se analizan las tendencias.

Para la interpretación de tendencias del Análisis de Aceite se utilizan los Límites Condenatorios calculados y establecidos, considerándose los Análisis de Aceite de todos los motores. Para la interpretación de los Datos Operacionales seleccionados, se utiliza como referencia los valores nominales establecidos por el fabricante. La finalidad es comparar y complementar los resultados del Mantenimiento Predictivo y el Mantenimiento Basado en Condición para obtener conclusiones más precisas y confiables sobre el desempeño del motor y del lubricante durante el tiempo de monitoreo.

Al final de la Tesis se presentan los diagnósticos en los reportes diseñados para el Análisis de Aceite y el Mantenimiento Basado en Condición. Asimismo las conclusiones y recomendaciones respecto a las medidas que deben tomarse.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Generalidades del Motor de Combustión Interna Ciclo Diesel.....	2
1.2 Principio de Funcionamiento del Motor Diesel de Cuatro Tiempos.....	11
1.3 Lubricación del Motor.....	20
1.4 El Aceite para Motor.....	31
CAPÍTULO 2	
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	52

2.1 Generalidades del Mantenimiento Predictivo.....	52
2.2 Características del Análisis de Aceite.....	56
2.3 Metodología de la Técnica SACODE.....	66
2.4 Generalidades del Mantenimiento Basado en Condición.....	81
CAPÍTULO 3	
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	87
3.1 Descripción del Equipo Monitoreado y del Aceite Usado.....	87
3.2 Presentación de Tendencias del Análisis de Aceite.....	94
3.3 Interpretación de Tendencias del Análisis de Aceite según la Técnica SACODE.....	106
3.4 Presentación de Tendencias de los Parámetros Operacionales.....	110
3.5 Interpretación de Tendencias de los Parámetros Operacionales.....	118
CAPÍTULO 4	
4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	121
4.1 Presentación de Resultados en Motores y Lubricantes.....	121
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
APÉNDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

ABREVIATURAS

°C	Grados Centígrados
°F	Grados Fahrenheit
°	Grados
AA	Análisis de Aceite
AAF	Análisis por Árbol de Fallas
Al	Aluminio
API	Instituto Americano de Petróleo
ASTM	Sociedad Americana de Ensayos de Materiales
Ba	Bario
Ca	Calcio
CBM	Mantenimiento Basado en Condición
cm.	Centímetros
cm ³	Centímetros Cúbicos
CO	Contaminación
CPS	Ciclos por Segundo
Cr	Cromo
CRO	Crudo
cSt	Centistokes
Cu	Cobre
DE	Desgaste
dism.	Disminución
Fe	Hierro
Fig.	Figura
FMEA	Análisis de los Modos y Efectos de Fallos
FMECA	Análisis de Modos de Fallos y Efectos Críticos
FTIR	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier
HFO	Fuel Oil Pesado

ISO	Organización Internacional para la Estandarización
IV	Índice de Viscosidad
Kg/m ²	Kilogramos por Metro Cuadrado
KOH	Hidróxido de Potasio
KPa	Kilopascales
LB	Línea Base
m	Metros
m ³	Metros Cúbicos
MCI	Motor de Combustión Interna
mg	Miligramos
mm	Milímetros
Mo	Molibdeno
MPd	Mantenimiento Predictivo
Nm	Newton por Metros
Na	Sodio
Ni	Níquel
NO ₂	Bióxido de Nitrógeno
P	Fósforo
Pb	Plomo
PMI	Punto Muerto Inferior
PMS	Punto Muerto Superior
ppm	Partes por Millón
rad/s	Radianes por Segundo
RPM	Revoluciones Por Minuto
SA	Salud
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices
Sb	Antimonio
Si	Silicio
Sn	Estaño
TAN	Número Ácido Total
TBN	Número Básico Total
TGE	Temperatura de Gases de Escape
V	Vanadio
VG	Grado de Viscosidad
Visc.	Viscosidad
Zn	Zinc

SIMBOLOGÍA

D	Diámetro del Cilindro
J	Joules
K	Carrera Útil por Vuelta del Cigüeñal
L	Carrera del pistón
M	Par Motor en el Eje del Motor
mm ² /s	Milímetro Cuadrado por Segundo
N	Revoluciones por Minuto del Cigüeñal.
n	Número de Cilindros del Motor
η_E	Rendimiento Efectivo
η_i	Rendimiento Indicado
η_M	Rendimiento Mecánico
p	Presión de Compresión
ρ	Carga.
ρ_m	Presión en el Múltiple de Admisión
P_E	Potencia al Freno
P_i	Potencia Indicada
P_P	Potencia Perdida
Q	Calorías Disipadas por Hora
Q_{AP}	Calor Aportado
r_a	Relación Real de Compresión
V_1	Volumen Total del Cilindro
V_2	Volumen de la Cámara de Combustión.
V_T	Cilindrada del Motor
V_U	Cilindrada Unitaria o Volumen Desalojado.
W_E	Trabajo realizado por la Máquina en el Eje.
Z	Viscosidad del Aceite.
W_i	Trabajo Realizado en el Cilindro.

ΔT	Variación de Temperatura entre Salida y Entrada.
ρ	Relación Volumétrica de Compresión
ω	Velocidad Angular.
\dot{x}	Tasa de Cambio.
x_0	Parámetro de la Muestra Actual.
x_{-1}	Parámetro de la Muestra Anterior.
t_0	Horómetro de la Muestra Actual.
t_{-1}	Horómetro de la Muestra Anterior.
\bar{x}	Valor Promedio.
x_i	Valor de Cada Muestra.
n	Número Total de Muestras.
σ	Desviación Estándar.
t_s	Tiempo Estándar definido del Muestreo.
t_p	Tiempo de Uso del Aceite.
\dot{x}_t	Parámetro Normalizado por Tiempo.
N_m	Factor de Normalización por Compensación de Aceite.
V	Capacidad del Cáster.
V	Volumen total de aceite compensado.
\dot{x}_m	Tasa de Cambio Normalizada por Aceite Compensado.
\dot{x}_{tm}	Tasa de Cambio Normalizada por Aceite Compensado y por Tiempo.
x_{om}	Parámetro Normalizado por Aceite Compensado de la Muestra Actual.
x_{-1m}	Parámetro Normalizado por Aceite Compensado de la Muestra Anterior.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1** Rudolf Diesel.
- Figura 1.2** Bloque del Motor.
- Figura 1.3** Camisa y Aro Antipulido.
- Figura 1.4** Culata
- Figura 1.5** Cigüeñal
- Figura 1.6** Biela
- Figura 1.7** Cojinete
- Figura 1.8** Pistón y Anillos
- Figura 1.9** Válvula
- Figura 1.10** Árbol de Levas
- Figura 1.11** Turbocargador
- Figura 1.12** Carrera de Admisión.
- Figura 1.13** Carrera de Compresión.
- Figura 1.14** Carrera de Expansión.
- Figura 1.15** Carrera de Escape.
- Figura 1.16** Lubricación Hidrodinámica
- Figura 1.17** Desgaste Adhesivo.
- Figura 1.18** Desgaste Abrasivo.
- Figura 1.19** Desgaste por Fatiga Superficial.
- Figura 1.20** Desgaste Corrosivo.
- Figura 1.21** Desgaste Erosivo.
- Figura 1.22** Desgaste por Cavitación.
- Figura 1.23** Falla por Sobrecalentamiento.
- Figura 1.24** Falla por Fatiga.
- Figura 1.25** Falla por Fractura.
- Figura 1.26** Gráfica de la Degradación del Aceite Durante su Uso.
- Figura 1.27** Equipo para medir Visc. Cinemática a 40°C y 100°C.

- Figura 1.28** Tabla para Determinar Índice de Viscosidad.
- Figura 1.29** Equipo ISO 4406/1999 para Ferrografía Directa.
- Figura 1.30** Analizador Espectrográfico.
- Figura 1.31** Ensayador Copa Cerrada Pensky-Martens.
- Figura 1.32** Pruebas de Residuo de Carbono.
- Figura 1.33** Potenciómetro para Determinar el TBN.
- Figura 1.34** Equipo para Probar Formación de Espuma en el Aceite.
- Figura 1.35** Equipo para probar la Estabilidad a la Oxidación.
- Figura 1.36** Equipo de Prueba con Reactivo Karl Fischer.
- Figura 2.1** Ejemplo de Curva Típica de Vibración en un Cojinete.
- Figura 2.2** Formato SACODE para Reporte de Análisis de Aceite.
- Figura 2.3** Sistema Externo de Operación de un Motor-Generador.
- Figura 3.1** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Calcio.
- Figura 3.2** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Fósforo.
- Figura 3.3** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Zinc.
- Figura 3.4** Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio de la Viscosidad.
- Figura 3.5** Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio del TBN.
- Figura 3.6** Tendencias Normalizada y Tasa de cambio del Silicio.
- Figura 3.7** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Magnesio.
- Figura 3.8** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Sodio.
- Figura 3.9** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Vanadio.
- Figura 3.10** Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio del Hollín.
- Figura 3.11** Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio de la Oxidación.
- Figura 3.12** Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio de la Sulfatación.
- Figura 3.13** Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio del Agua.
- Figura 3.14** Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio de la Nitración.
- Figura 3.15** Tendencias normalizada y tasa de cambio del Hierro.
- Figura 3.16** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Cobre.
- Figura 3.17** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Aluminio.
- Figura 3.18** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Cromo.
- Figura 3.19** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Níquel.
- Figura 3.20** Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Molibdeno.
- Figura 3.21** Tendencia de Desgaste Total de Elementos del Motor.
- Figura 3.22** Tendencia de la Presión del Cáster y la Potencia Activa.
- Figura 3.23** Tendencia del Consumo de Aceite del Motor.
- Figura 3.24** Tendencia de Temperatura en Cojinetes.
- Figura 3.25** Tendencia de la Máxima Diferencia de Temperaturas entre Cojinetes.
- Figura 3.26** Tendencias de Temperatura de los Turbocargadores.
- Figura 3.27** Tendencia de Diferencia de Temperatura entre Turbocargadores.

- Figura 3.28** Tendencia de Velocidades en Turbocargadores.
Figura 3.29 Tendencia de la Diferencia de RPM entre Turbocargadores.
Figura 3.30 Tendencias de las TGE Lado A.
Figura 3.31 Tendencia de la Máxima Variación de TGE entre Cilindros A.
Figura 3.32 Tendencias de las TGE Lado B.
Figura 3.33 Tendencia de la Máxima Variación de TGE entre Cilindros B.
Figura 3.34 Temperaturas de Gases de Escape Lado A del 03/09/2009.
Figura 3.35 Temperaturas de Gases de Escape Lado A del 07/02/2009.
Figura 3.36 Temperaturas de Gases de Escape Lado B del 11/03/2009.

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.1** Grados de Viscosidad SAE para Aceite de Cáster.
- Tabla 1.2** Elementos y Origen en un Aceite para Motor.
- Tabla 1.3** Métodos Físico-Químico ASTM.
- Tabla 1.4** Clasificación API de Lubricantes para Motores Diesel.
- Tabla 2.1** Pruebas del Análisis de Aceite y su Enfoque.
- Tabla 2.2** Fórmulas para Establecimiento de Límites Estadísticos.
- Tabla 2.3** Criterios para Establecimiento de Límites.
- Tabla 2.4** Código de Colores.
- Tabla 2.5** Parámetros que pueden Monitorearse en un Motor
- Tabla 3.1** Características del Crudo que debe utilizar el Motor.
- Tabla 3.2** Análisis del Combustible Utilizado.
- Tabla 3.3** Características del Aceite Lubricante que debe utilizar el Motor.
- Tabla 3.4** Características del Aceite Lubricante Nuevo Utilizado.
- Tabla 3.5** Límites de Parámetros de Salud.
- Tabla 3.6** Límites de Parámetros de Contaminación.
- Tabla 3.7** Límites de Parámetros de Desgaste.
- Tabla 3.8** Límites de Parámetros Operacionales Establecidos.
- Tabla 3.9** Consumo de Aceite desde Marzo 2008 hasta Marzo 2009.
- Tabla 4.1** Reporte de Análisis de Aceite del Motor Diesel.
- Tabla 4.2** Reporte CBM del Motor Diesel.

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Sistema de Lubricación Motor Diesel.

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico de motores y mecanismos lubricados a partir del Análisis de Aceite (AA) es una herramienta ampliamente empleada en la industria moderna a nivel mundial. Actualmente en las diferentes industrias de nuestro país, esta práctica del Mantenimiento Predictivo (MPd) aún se encuentra en vías de desarrollo. Un motivo es por los altos costos que representa, ya que en muchas empresas es visto como un gasto y no como una inversión que ayudará a mejorar la confiabilidad de los equipos. Otro motivo es la falta de técnicos especializados en tribología y la falta de laboratorios químicos adecuados que presten sus servicios para este fin. Esta metodología empieza a partir de los diferentes ensayos de determinación de los parámetros físico-químicos del aceite donde es posible establecer tanto el grado de deterioro del fluido lubricante como el estado de los componentes de la máquina lubricada, a partir de la determinación de los metales de desgaste. En este caso se analiza un Motor de Combustión Interna de Ciclo Diesel utilizado para generación eléctrica, que puede funcionar con dos sistemas de combustible diferentes: crudo o diesel. Inicialmente se detalla la descripción del tipo de equipo monitoreado, luego las técnicas aplicadas en los análisis, y finalmente se presenta un caso práctico real.

CAPÍTULO 1

1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

1.1 GENERALIDADES DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CICLO DIESEL.

Definición de Motor Térmico.

El motor térmico es una máquina que tiene por objeto transformar la energía calorífica en energía mecánica directamente utilizable. La energía calorífica puede provenir de diversas fuentes como combustibles de origen vario, energía eléctrica y energía atómica.

Definición de Motor de Combustión Interna.

Una definición señala que los Motores Térmicos son de Combustión Interna (MCI), cuando:

El combustible es quemado en el mismo fluido, de manera que vienen a ser parte de este los productos de la combustión. Los MCI pueden transmitir la potencia al exterior mediante la transformación de un movimiento alternativo en rotativo a través de un mecanismo biela – manivela (1).

El Motor Diesel.

En 1892 el alemán Rudolf Diesel (Ver fig. 1.1), basado en que el trabajo de compresión rápida en un medio incrementa su energía interna y su temperatura, propuso comprimir sólo aire hasta alcanzar una temperatura lo suficientemente elevada para que lograra encender el combustible que se inyectaría hacia el final de la carrera de compresión (2).

(1) Definición del Libro Motores Endotérmicos, ESPOI.

(2) Definición del Libro Motores Térmicos, Tomo I, Agudelo John.

Este proceso original fue concebido lo más cercano posible al ciclo del motor de Carnot.



Figura 1.1 Rudolf Diesel.

Partes Principales del Motor Diesel.

Bloque del Motor.

El bloque del motor está forjado en una sola pieza. La cámara de aire de carga está conformada en el bloque del motor, así como el colector del agua de refrigeración. Las tapas del colector de aceite (cárter), cierran herméticamente contra el bloque del motor por medio de juntas de goma (Ver fig. 1.2).

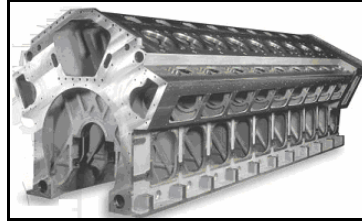


Figura 1.2 Bloque del Motor.

Camisa.

Las camisas de los cilindros, están diseñadas con una corona alta, taladrada para la refrigeración. Las camisas están provistas de un aro antipulido en la parte superior del hueco para reducir el riesgo de desgaste (Ver fig. 1.3).

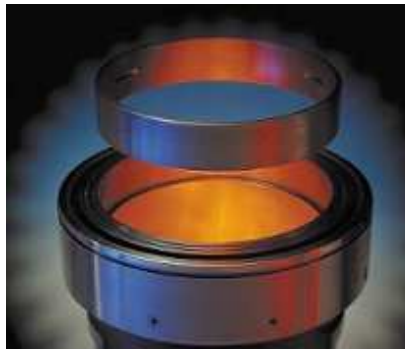


Figura 1.3 Camisa y Aro Antipulido

Culata.

Es la pieza que sella los cilindros y se fabrica en hierro fundido. Esta debe ser lo suficientemente fuerte y rígida para distribuir la fuerza de los gases que actúan de la manera más uniforme posible a través del bloque. El diseño de la culata es de doble pared y el agua de refrigeración es forzada desde la periferia hacia el centro, proporcionando una eficiente refrigeración en áreas importantes (Ver fig. 1.4).

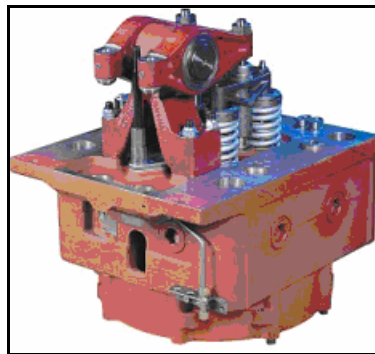


Figura 1.4 Culata

Cigüeñal.

El cigüeñal está forjado en una sola pieza de acero y equilibrado por contrapesos. Es un árbol con porciones excéntricas de las cuales se sujeta a la cabeza de la biela. (Ver fig. 1.5).

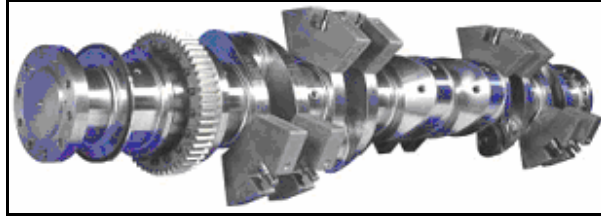


Figura 1.5 Cigüeñal

Biela.

Las bielas están forjadas por estampación. El extremo mayor está seccionado y las superficies de acoplamiento están estriadas. Los cojinetes de biela son bimetálicos o trimetálicos y son intercambiables, es decir que están contruidos con aleaciones de cobre, plomo y/o aluminio (Ver fig. 1.6).

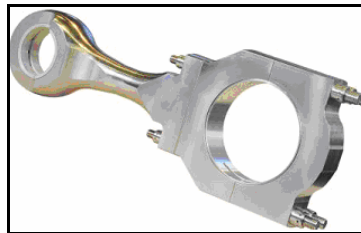


Figura 1.6 Biela

Cojinetes

Los cojinetes principales son bimetálicos o trimetálicos. Están diseñados para soportar grandes cargas y altas temperaturas (Ver fig. 1.7).

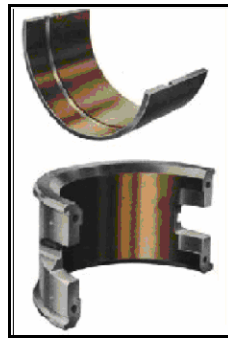


Figura 1.7 Cojinete

Pistones y Anillos.

Los pistones se fabrican de fundición gris. Su función consiste tanto en sellar el cilindro como en transmitir la presión generada por la combustión de los gases al cigüeñal a través de la biela. Las ranuras para los aros superiores están templadas. El aceite refrigerante se introduce en la cámara de refrigeración a través de la biela. Los anillos están conformados por tres anillos de compresión cromo-plateados y un aro rascador también cromado y cargado por resorte (Ver fig. 1.8).



Figura 1.8 Pistón y Anillos

Válvulas.

Las válvulas de admisión, están recubiertas de estellite (aleación con cobalto) y los vástagos cromados. Los aros de asiento de las válvulas son de una aleación de hierro fundido. Las válvulas de escape, también con asientos recubiertos de estellite y vástagos cromados, cierran contra los anillos de asiento directamente refrigerados. (Ver fig. 1.9)

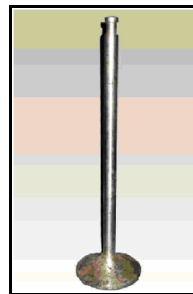


Figura 1.9 Válvula

Árbol de Levas.

El árbol de levas, formado por piezas, que integran las levas para cada cilindro, cumple la función de abrir y cerrar las válvulas. Está construido de acero forjado (Ver fig. 1.10).



Figura 1.10 Árbol de Levas

Turbocargador

Los turbocargadores están situados normalmente en el extremo libre del motor. En un motor en V hay dos turbocargadores, uno para cada línea de cilindros. Es usual el turbocargado en los Motores Diesel. La turbina accionada por los gases de escape da lugar a una expansión más completa de los gases de la combustión que la que se obtiene en los cilindros del motor (Ver fig. 1.11).

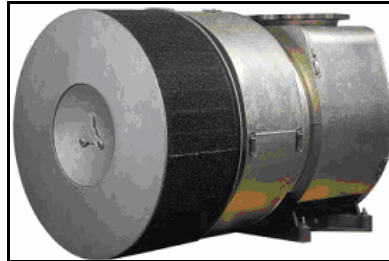


Figura 1.11 Turbocargador

1.2 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIESEL DE CUATRO TIEMPOS.

El Motor Diesel requiere de cuatro carreras del pistón o dos revoluciones del cigüeñal (720°) por cada ciclo, estas son:

Carrera de Admisión: Inicia con el pistón en el Punto Muerto Superior (PMS) y termina con el pistón en el Punto Muerto Inferior (PMI). Se arrastra mezcla rica al interior del cilindro. Con el fin de incrementar la masa succionada, la válvula de admisión abre ligeramente antes del PMS y cierra después del PMI (Ver fig. 1.12).

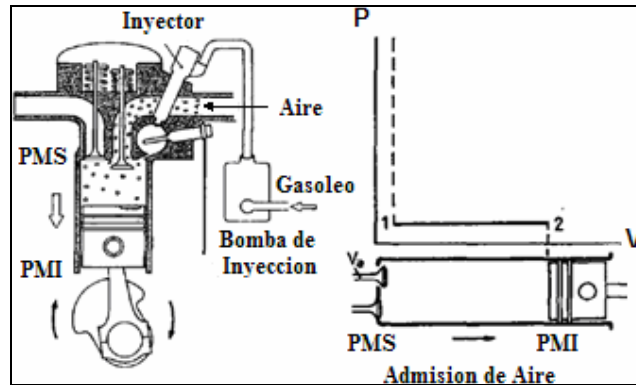


Figura 1.12 Carrera de Admisión.

Carrera de Compresión: Ocurre cuando las dos válvulas están cerradas y la mezcla al interior del cilindro es comprimida hasta una pequeña fracción de su volumen inicial. Hacia el final de la carrera de compresión, se inicia la combustión y la presión en el cilindro incrementa más rápidamente (Ver fig. 1.13).

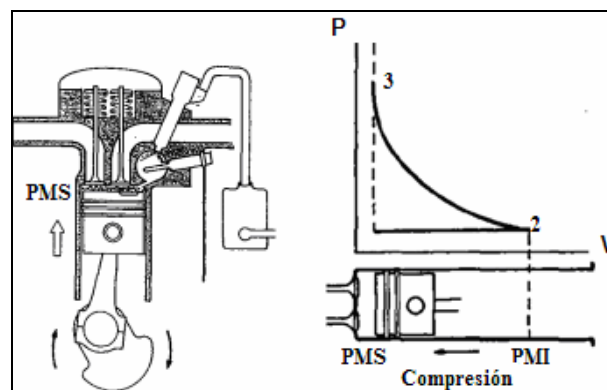


Figura 1.13 Carrera de Compresión.

Carrera de Expansión: Inicia con el pistón en el PMS y termina en el PMI en la medida que los gases a elevada temperatura y presión empujan el pistón hacia abajo forzando a girar la manivela. Durante ésta carrera se logra aumentar considerablemente el trabajo realizado por el pistón durante la compresión. En la medida en que el pistón se aproxima al PMI la válvula de escape se abre para iniciar el proceso de escape y cae la presión en el cilindro hasta un valor cercano a la presión en el escape (Ver fig. 1.14).

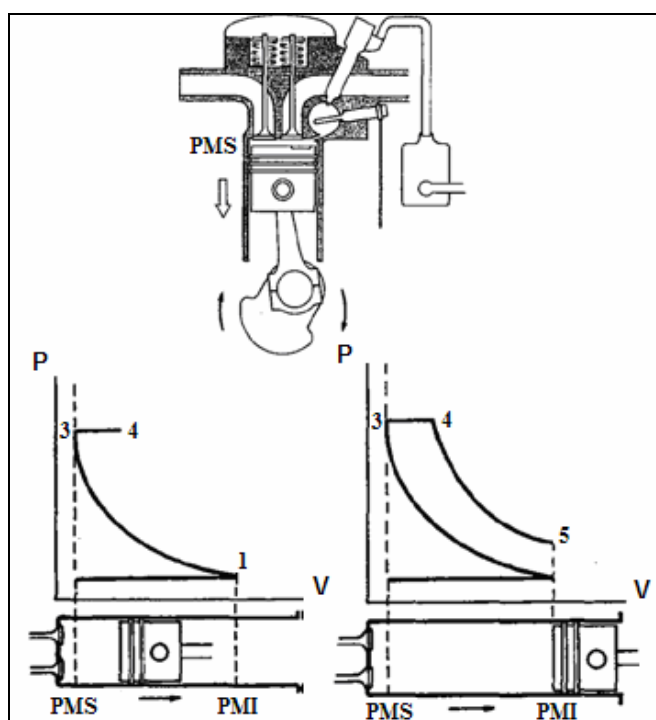


Figura 1.14 Carrera de Expansión.

Carrera de Escape: Los gases quemados salen del cilindro porque la presión en el cilindro puede ser sustancialmente más alta que la presión en el escape y luego porque son barridos por el propio movimiento del pistón hacia el PMS. A medida que el pistón se aproxima al PMS abre la válvula de admisión. Justo después del PMS se cierra la válvula de escape y el ciclo inicia de nuevo (Ver fig. 1.15).

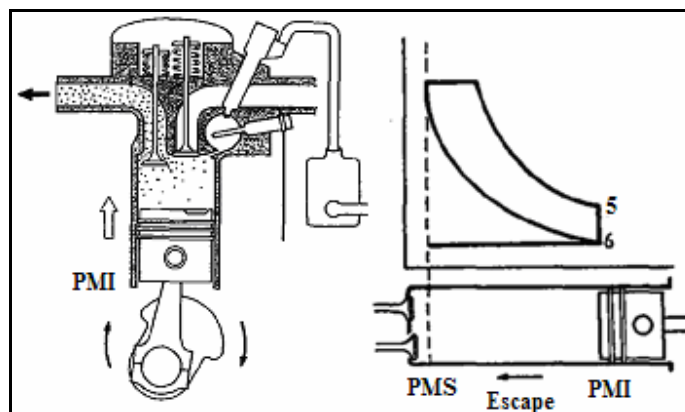


Figura 1.15 Carrera de Escape.

Parámetros de los Motores Diesel.

Presión de Compresión.

La presión de compresión se estima como:

$$p = r_a^{1.33} p_m \quad (\text{Ec. 1.1) donde,}$$

p_m Presión en el múltiple de admisión.

r_a Relación real de compresión.

Esta presión de compresión puede medirse con un manómetro mediante una válvula de retención q atrapa los gases. La relación de compresión nominal es el desplazamiento más el espacio muerto, divididos entre este último.

PMS: Posición del pistón más próxima a la culata.

PMI: Posición del pistón más alejada de la culata.

Carrera: Comprende la distancia entre el PMS y PMI es igual, salvo raras excepciones, al doble del radio de la manivela del eje de cigüeñales. Se expresa generalmente en mm.

Diámetro Interior del Cilindro: Expresado generalmente en mm.

Volumen Total del Cilindro: Es el espacio comprendido entre la culata y el pistón cuando este se halla en el PMI. Viene expresado en cm^3 .

Volumen de la Cámara de Combustión: Está comprendido entre la culata y el pistón cuando este se halla en el PMS. Viene expresado en cm^3 .

Cilindrada Unitaria: Representa el volumen barrido por el pistón al pasar desde el PMS al PMI en un cilindro, es decir, es el volumen barrido en una carrera.

$$V_U = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \quad (\text{Ec. 1.2) donde,}$$

Donde:

V_U Cilindrada Unitaria (cm^3).

D Diámetro Interior del Cilindro (cm).

L Carrera del Pistón (cm).

Cilindrada Total (V_T): Representa el volumen útil total de los cilindros del motor.

$$V_T = n \cdot V_u \quad (\text{Ec. 1.3) donde,}$$

n Número de cilindros del motor.

V_u Volumen del cilindro (cm^3)

Relación volumétrica de compresión (ρ) Se entiende por tal la que hay entre el volumen total del cilindro (V_1) y el volumen de la cámara de combustión (V_2) En general, para abreviar es llamado simplemente relación de compresión.

$$\rho = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Potencia indicada (P_i)

Es la potencia desarrollada en el interior del cilindro.

$$P_i = \frac{V_T \cdot p_i \cdot N}{K \cdot 60 \cdot 75} \quad (\text{Ec. 1.5) donde,}$$

p_i Presión media indicada, representa la potencia media que se desarrolla en un cilindro (Kg/m^2).

V_T Cilindrada total en metros cúbicos (m^3)

N Revoluciones por minuto del cigüeñal (RPM)

L Carrera (m).

K Representa las carreras útiles por vuelta del cigüeñal.

K= 2 Para motores de cuatro tiempos.

1/60 Constante para pasar los minutos de RPM a RPS.

1/75 Constante para pasar los Kg.m a CV.

CV Caballos Vapor.

Potencia al Freno (P_E)

Potencia desarrollada en el eje de salida del motor.

$$P_E = M \cdot \omega \quad (\text{Ec. 1.6) donde,}$$

M Par motor en el eje del motor (N.m)

ω Velocidad angular (rad/s)

Potencia Perdida (P_p)

$$P_p = P_I - P_E$$

Rendimiento indicado (η_i)

Representa la relación entre el trabajo realizado en el interior del cilindro y el calor aportado.

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_{AP}} \quad (\text{Ec. 1.7) donde,}$$

W_i Trabajo realizado en el cilindro (J).

Q_{AP} Calor aportado (J).

Rendimiento Efectivo (η_E)

$$\eta_E = \frac{W_E}{Q_{AP}} \quad (\text{Ec. 1.8) donde,}$$

W_E Trabajo realizado por la máquina en el eje (J).

Rendimiento mecánico (η_M)

Representa la relación entre el rendimiento efectivo y rendimiento indicado. Da una idea de las pérdidas por rozamientos que posee la máquina.

$$\eta_M = \frac{\eta_E}{\eta_i} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

1.3 LUBRICACIÓN DEL MOTOR.

El lubricante y el sistema de lubricación desempeñan las siguientes funciones principales:

- Reducir las pérdidas de fricción y asegurar el máximo rendimiento mecánico del motor.
- Proteger el motor contra el desgaste.
- Contribuir a la refrigeración de los pistones, los cojinetes, los cilindros y demás partes por las cuales se disipa el trabajo de fricción.
- Remover las impurezas de las zonas lubricadas.
- Mantener las fugas de gas y de aceite a un nivel mínimo aceptable, especialmente en la región de los anillos.

Tribología

La Tribología se centra en el estudio de tres fenómenos: La fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste como efecto natural de este

fenómeno y la lubricación como un medio para evitar el desgaste. Las raíces griegas de Tribología provienen de tribos = fricción y logos = tratado, formando así el significado en español estudio o tratado de la fricción.

Lubricación Forzada.

El aceite se pone en circulación por medio de una bomba y es dirigido, mediante canales y tuberías, a los puntos que han de lubricarse. El aceite que fluye de las partes lubricadas se recoge en el cárter, desde el cual es puesto de nuevo en circulación por medio de la bomba. La lubricación forzada tiene la gran ventaja de asegurar a las distintas partes un grado de lubricación proporcional a la velocidad.

Lubricación Hidrodinámica.

Los tipos de lubricación según la viscosidad del aceite son: Lubricación Hidrostática que consiste en bombear aceite a presión entre las dos superficies con el fin de separarlas. Lubricación Elastohidrodinámica, donde la carga deforma elásticamente la superficie irregular aumentando la superficie de contacto y la película lubricante interpuesta entre metales (Ver Apéndice D).

La Lubricación Hidrodinámica genera una cuña de aceite que proporciona la elevación y es directamente proporcional a la viscosidad del aceite (Z), la velocidad de rotación (N) e inversamente proporcional a la carga a la que está sometido el árbol (p). Se aplica en: Cojinetes, chumaceras, Anillo-pistón-cilindro, Cigüeñal y Árboles Deslizantes (Ver fig. 1.16).

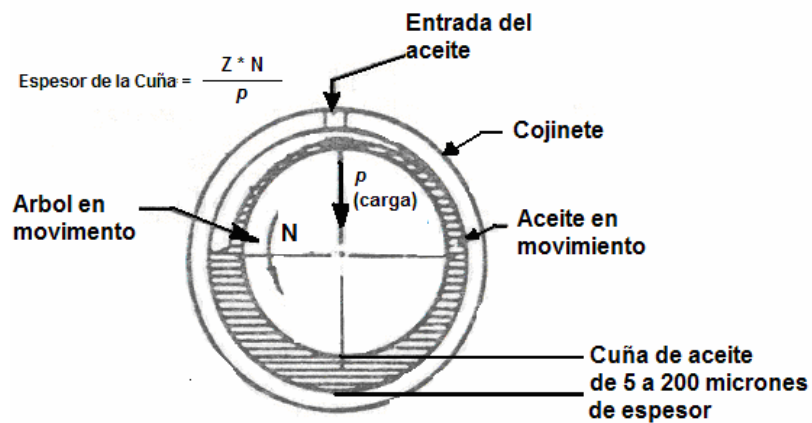


Figura 1.16 Lubricación Hidrodinámica

Las condiciones que favorecen la Lubricación Hidrodinámica son:

La operación a velocidad constante, el lubricante a la temperatura adecuada, el régimen de carga adecuado y la selección de la viscosidad correcta.

Fallas que pueden presentarse por Lubricación.

Las fallas involucran alguna forma de esfuerzo mecánico. Aún cuando la causa del problema sea el calor excesivo o la lubricación inadecuada.

Estas son:

- Falla por Desgaste.
- Falla por Sobrecalentamiento.
- Falla por Fatiga.
- Falla por Fractura.

Falla por Desgaste.

El desgaste consiste en la formación y posterior ruptura de uniones metálicas existentes entre dos superficies que están en contacto. Puede darse por sobrecarga, presencia de impurezas en el lubricante, lubricación inadecuada, sobrecalentamiento y aceite en servicio por mucho tiempo.

Desgaste Adhesivo.

Se produce por la adhesión o cohesión entre las estructuras atómicas de los materiales en las zonas de contacto real por falta de una película lubricante de suficiente espesor. Se evita la falla manteniendo el grado de viscosidad y reduciendo la contaminación en el aceite (Ver fig. 1.17).

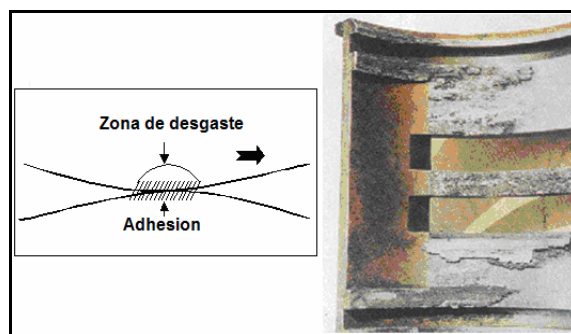


Figura 1.17 Desgaste Adhesivo.

Desgaste Abrasivo.

Rayas y surcos paralelos a la dirección del movimiento es el patrón de desgaste. Usualmente los surcos están bien definidos y son producidos por la deformación del material (Ver fig. 1.18).

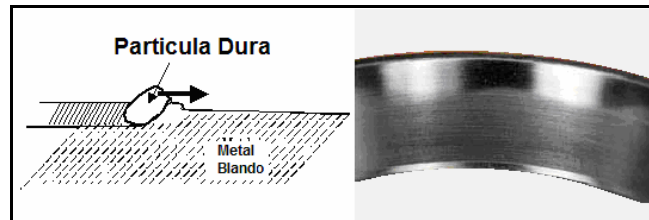


Figura 1.18 Desgaste Abrasivo.

También se observan rebabas y virutas. Es el resultado de partículas duras presentes en el lubricante, que se ubican entre las dos superficies de trabajo, incrustándose en una y realizando deformaciones en la otra.

Desgaste por Fatiga Superficial.

Las superficies de trabajo presentan fisuras y excoiraciones de bordes filosos e irregulares. Esta falla puede comenzar como abolladuras y progresar a deslustrado, picado y finalmente astillado y desescamamiento. (Ver fig. 1.19).

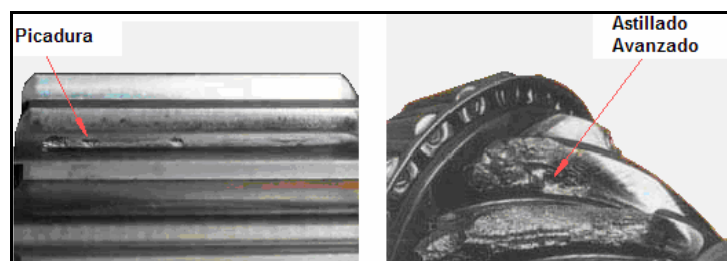


Figura 1.19 Desgaste por Fatiga Superficial.

Se evita esta falla eliminando las concentraciones de presiones verificando las alineaciones y distorsiones de las partes.

Desgaste Corrosivo.

La coloración más oscura de las partes indica que el inicio de las excoりaciones es la corrosión. Es causado por una reacción química que mueve material de la superficie de un componente, y generalmente es un resultado directo de la oxidación. La presencia de agua o de productos de la combustión fomenta el desgaste corrosivo. (Ver fig. 1.20).

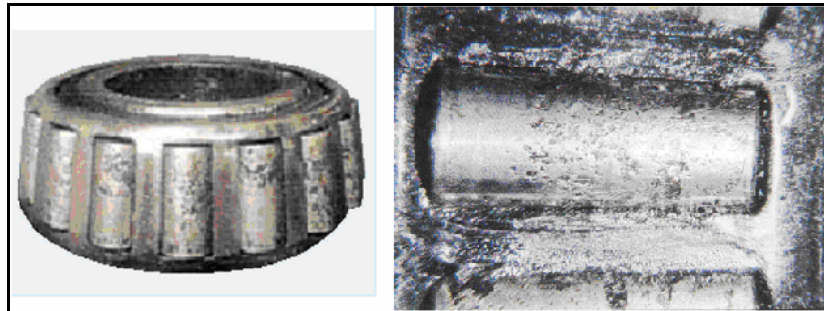


Figura 1.20 Desgaste Corrosivo.

Desgaste Erosivo.

Suaves y amplios canales pueden tener forma de "V" en la dirección del flujo del lubricante. Ocurre principalmente por el uso de aceites de mayor viscosidad a la necesaria o una elevada presión del lubricante sobre las

superficies de los elementos. Se evita utilizando el grado de viscosidad adecuado de lubricante. (Ver fig. 1.21).

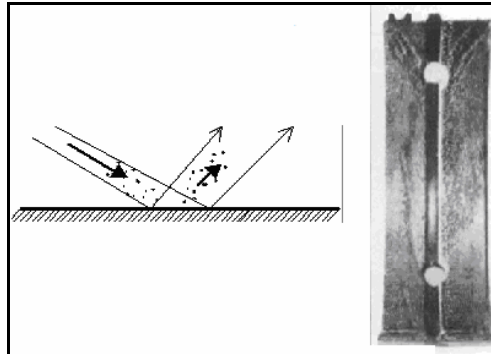


Figura 1.21 Desgaste Erosivo.

Desgaste por Cavitación.

Puede ocasionarse por la presencia de espuma en el lubricante debido a una alta o baja viscosidad del mismo o por entradas de aire al sistema. En componentes como turbinas y rotores, puede ser causada por la formación de burbujas de vapor en el lubricante cuando este alcanza presiones inferiores a la presión de vapor. La cavitación se reduce si se controla la característica espumosa del aceite con un aditivo especial. (Ver fig. 1.22).



Figura 1.22 Desgaste por Cavitación.

Desgaste por Interferencia.

Es consecuencia de errores en el diseño, montaje y/o fabricación de los elementos de la máquina, ocasionando sobrepresiones que rompen o impiden la formación de la película lubricante. Se lo evita controlando el montaje y la manufactura de los elementos.

Falla por Sobrecalentamiento.

Es la rotación excesiva de la rueda, lo cual ocasiona un calor dañino. Las altas temperaturas debilitan la película de lubricante, permitiendo el contacto metal con metal. El sobrecalentamiento en el diferencial principal ocurre cuando una de las ruedas se mantiene estática mientras la otra rueda está girando (Ver fig. 1.23).

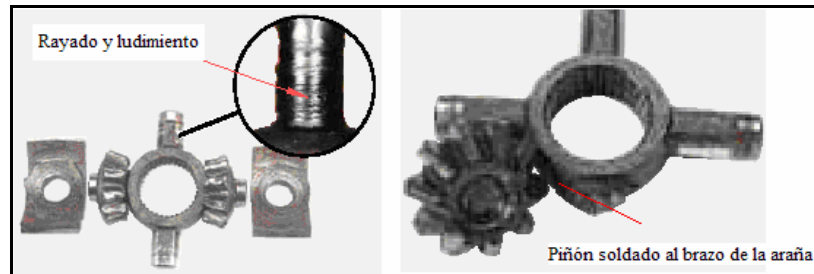


Figura 1.23 Falla por Sobrecalentamiento.

Falla por Fatiga.

Es una consecuencia de los esfuerzos cíclicos ya sean de tensión, compresión, esfuerzo cortante o una combinación de estos, los cuales dan como resultado la aparición de pequeñas grietas que avanzan hasta convertirse en picaduras y escamas sobre el material. Son causadas por la presencia de partículas sólidas mayores o iguales al juego dinámico en el lubricante, que al ser atrapadas deforman el material en ambos lados de la superficie en contacto (Ver fig. 1.24).

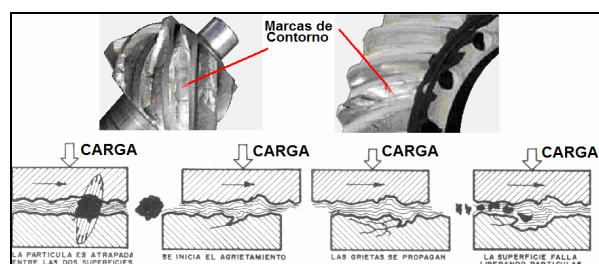


Figura 1.24 Falla por Fatiga.

Falla por Fractura.

Esta falla puede ser causada al esforzar el elemento mecánico más allá de la resistencia del material o por el fenómeno de fatiga, quedando la pieza totalmente inservible. La falla podría ser inmediata por un golpe súbito o progresivo por cuarteadoras de la superficie que pueden aparecer después de un golpe (Ver fig. 1.25).

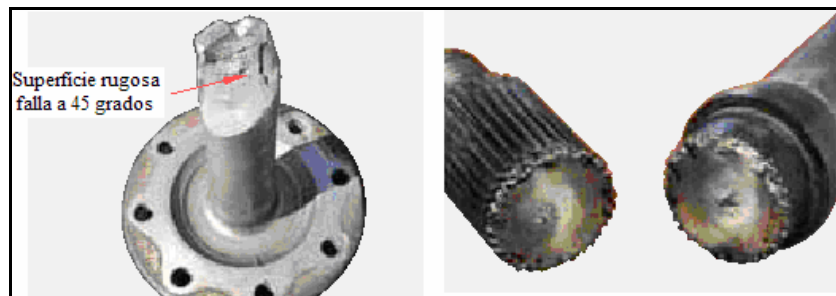


Figura 1.25 Falla por Fractura

Gripado

Avería que se produce cuando dos piezas que tienen rozamiento se sueldan por efecto de las altas temperaturas alcanzadas por una deficiente lubricación.

1.4 EL ACEITE PARA MOTOR.

El aceite en el MCI debe desempeñar numerosas funciones a fin de suministrar lubricación adecuada. El aceite para cárter, además de reducir la fricción y el desgaste, debe mantener limpio el motor y libre de herrumbre y corrosión, debe actuar como enfriador y sellador y debe servir como aceite hidráulico en un motor que tenga levantadores hidráulicos para las válvulas. El lubricante puede funcionar dentro de límites amplios de temperaturas y en presencia de suciedad, agua y otras condiciones atmosféricas adversas, así como con los materiales formados como resultado de la combustión; debe ser resistente a la oxidación y a la formación de lodos.

Composición.

El aceite derivado del petróleo o sintético, a menudo se mezcla con los aditivos que son productos químicos que sirven para modificar y resaltar ciertas características relacionadas con el rendimiento. El aceite al entrar en uso inmediatamente empieza a experimentar cambios diversos: la viscosidad del aceite cambia, los aditivos inician a agotarse, las condiciones de alta temperatura, aire y humedad favorecen la oxidación

del aceite, así como la presencia de partículas metálicas catalíticas. (Ver Fig. 1.26).

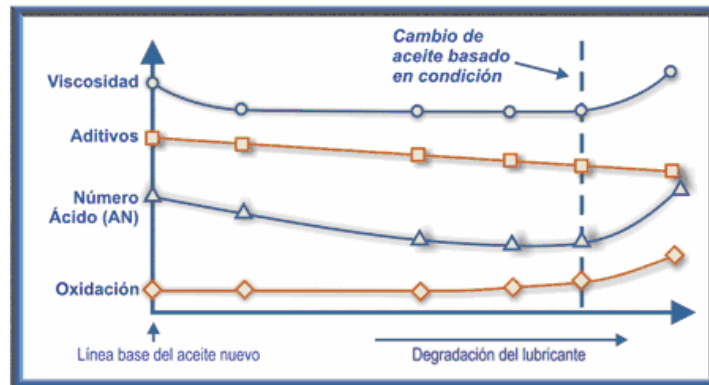


Figura 1.26 Gráfica de la degradación del aceite durante su uso.

El Aceite Básico.

El aceite derivado del petróleo se prepara mediante procesos disponibles para refinación a partir de hidrocarburos naturales. Los tipos principales de crudos son parafínico y nafténico, términos que se refieren a la estructura molecular de los componentes preponderantes.

Propiedades Importantes.

Viscosidad e Índice de Viscosidad.

Viscosidad es la propiedad de un fluido en oponer resistencia a fluir. La viscosidad del aceite es dependiente de la temperatura, presión y

movimiento del fluido. El índice de viscosidad da la medida de la variación de viscosidad con la temperatura confrontada con la de dos aceites de referencia, dotados de la misma viscosidad a 100°C. Se asigna a un aceite tipo Pensilvania (base parafínica) el índice 100 y a un aceite del Golfo de México (base nafténica) el índice 0.

Punto de Inflamabilidad y Grado de Carbonización.

En los MCI el aceite se quema cuando pasa a la cámara de combustión. Conviene por tanto, que sea elevada su temperatura de inflamabilidad (temperatura a la cual despiden vapores inflamables). Es importante que deje pocos depósitos carbonosos porque se formarían incrustaciones en la cámara y las válvulas favoreciendo el autoencendido y la detonación.

Grado de Acidez y Oxidación.

La acidez tiende a atacar y corroer las superficies metálicas. Esta aumenta con el uso por efecto de la oxidación, que es favorecida por la elevada temperatura, el movimiento y la presencia de los diversos metales que actúan de catalizadores. La oxidación produce también los llamados barnices o gomas constituidos por sustancias asfálticas

alquitranosas y resina dotadas de propiedades corrosivas, que alteran las propiedades lubricantes.

Aditivos Tipos y Función.

El aceite para cárter se fortifica intensamente con aditivos y pueden contener los siguientes:

Detergentes.

La función de los aditivos detergentes, es de mantener la limpieza del motor al evitar la acumulación de hollín y otros productos de la combustión, así como productos de la oxidación del aceite.

Dispersantes.

Mantienen finamente dividida y dispersas las partículas de carbón en el aceite motor para que no se adhieran al motor y queden retenidas en el filtro de aceite.

Inhibidores de la Oxidación.

La oxidación aparece por el calor, por la agitación y por la presencia de contaminantes que pueden actuar como catalizadores. Viene

acompañada por la formación de productos de degradación soluble e insoluble. Suelen depositarse en el fondo en forma de barro.

Inhibidores de Corrosión.

Los inhibidores de corrosión son capaces de adherirse fuertemente a las superficies metálicas, aislándolas del aire y de la humedad del aceite mineral. A veces este aditivo tiene efectos secundarios al actuar como emulsificador del agua presente en el aceite.

Inhibidores de Herrumbe.

Estos inhibidores evitan el ataque sobre superficies de acero, al condensar la humedad y productos ácidos corrosivos, los cuales aumentan por el funcionamiento intermitente a baja temperatura.

Depresivos del Punto de Fluidez y Mejoradores del Punto de Viscosidad.

Aseguran el flujo adecuado a bajas temperaturas y suficiente viscosidad a altas temperaturas.

Aditivos contra el Desgaste.

Minimizan el desgaste en condiciones límites de lubricación que se presentan en la barra de levas y también en las superficies en contacto de las paredes de los cilindros y los anillos de los pistones.

Agentes Antiespumantes.

Permiten que el aire disuelto en el aceite (8 a 10% en un ambiente normal) se desprenda con facilidad, para mejorar la eficiencia del aceite al reducir la fricción entre las superficies en contacto en el motor.

Clasificación de los Lubricantes.

Los lubricantes se clasifican tomando como base su viscosidad. En América se sigue el sistema SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices). Según SAE estos se clasifican en 3 tipos de lubricantes:

Regular: Aceites aptos en general para emplearse en motores endotérmicos en moderadas condiciones de servicio.

Premium: Aceites cuyas características de estabilidad a la oxidación y resistencia a la corrosión de los cojinetes los hacen idóneos para

utilizarse en motores que trabajan en condiciones de servicio más severas que las del tipo normal.

Heavy Duty: Estos aceites poseen características de estabilidad a la oxidación, resistencia a la corrosión de los cojinetes y propiedades detergentes tales que los hacen aptos para usarse en motores Diesel en severas condiciones de servicio.

La clasificación de los lubricantes para los MCI más común es la de SAE. Ésta depende únicamente de la viscosidad del aceite a 100°C. Hay 10 clasificaciones SAE: 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W, 20, 30, 40 y 50. Cada número corresponde a un rango de viscosidad (Ver TABLA 1.1).

TABLA 1.1

Grados de viscosidad SAE para aceite de cárter (3).

Grado de viscosidad SAE	Viscosidad,* cP, a la temperatura, °C/°F, máx.	Temperatura límite de bombeo, † °C/°F, máx.	Viscosidad, ‡ cSt, a 100°C	
			Mín.	Máx.
0W	3250 a -30/-22	-35/-31	3.8	
5W	3500 a -25/-13	-30/-22	3.8	
10W	3500 a -20/-4	-25/-13	4.1	
15W	3500 a -15/+5	-20/-4	5.6	
20W	4500 a -10/+14	-15/+5	5.6	
25W	6000 a -5/+23	-10/+14	9.3	
20			5.6	Menos de 9.3
30			9.3	Menos de 12.5
40			12.5	Menos de 16.3
50			16.3	Menos de 21.9

*Medida por la ASTM D2602, modificada para operar a las temperaturas que se indican.
†Medida por la ASTM D3829.
‡Medida por la ASTM D445.

Según la clasificación SAE para los aceites, los números seguidos por la letra W son empleados en climas fríos, su viscosidad se determina en laboratorio a una temperatura de -18°C .

Sin W indica que son aceites propios para climas cálidos. Éstos se basan en viscosidad medida a 99°C . Los aceites multigrados satisfacen condiciones de servicio a bajas y altas temperaturas. Éstos tienen índices de viscosidad mayores que los aceites de un solo grado, lo cual los hace más convenientes para usarse en los MCI.

Análisis Físicos (ASTM).

Se utilizan para caracterizar a los aceites de petróleo, porque el rendimiento del lubricante a menudo depende también de las propiedades físicas. Las pruebas físicas usuales incluyen mediciones de la viscosidad, densidad, punto de fluidez, gravedad específica, punto de inflamación y de combustión, olor y color (Tabla 1.3).

Viscosidad Cinemática.

En la Viscosidad Cinemática según la norma ASTM D-445, se mide el

(3) Tabla del Manual del Ingeniero Mecánico Tomo I, Marks.

tiempo para que un volumen fijo de líquido pueda fluir a través de un capilar de vidrio calibrado. La viscosidad cinemática se calcula mediante el tiempo de flujo y el factor de calibración del viscosímetro. Se expresa en centistokes ($\text{cSt} = \text{mm}^2/\text{s}$) (Ver fig. 1.27).



Figura 1.27 Equipo para medir Visc. Cinemática a 40°C y 100°C.

Grado de Viscosidad SAE.

Para esta medición se ha introducido un concepto nuevo, el de temperatura máxima de bombeo (ASTM D-3829) hecha con un miniviscosímetro rotatorio, intenta definir la temperatura por debajo de la cual no puede asegurarse el flujo adecuado hacia la admisión de la bomba del aceite en un motor.

Grado de Viscosidad ISO.

La Internacional Standards Organization (ISO) ha publicado un sistema para designar los grados de viscosidad de los aceites industriales y la ASTM lo ha aceptado. Como se establece en la ASTM D 2422, cada grado se especifica por ISO VG, (Viscosity Grade) seguido por un número que es la viscosidad cinemática nominal, en cSt, a 40°C (104°F).

El Índice de Viscosidad (IV)

El procedimiento para calcular el IV de un aceite es determinar su viscosidad a 40°C y 100°C (104°F y 212°F). Para realizar los cálculos del índice de viscosidad se aplican el método estándar ASTM D-2270 y las tablas de viscosidad ASTM (Ver fig. 1.28).

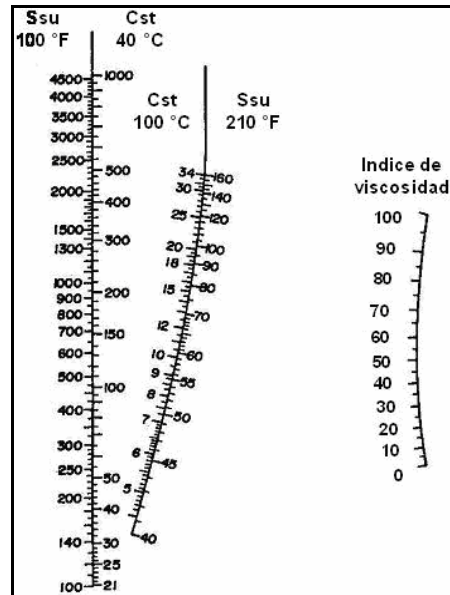


Figura 1.28 Tabla para Determinar Índice de Viscosidad.

Análisis Químicos (ASTM).

Las pruebas químicas dilucidan la composición, incluyendo la medición de varios elementos que se encuentran en los aditivos, así como pruebas de acidez y el residuo de carbono (Ver Tabla 1.3).

Ferroggrafía Directa.

Consiste en una medición cuantitativa de la concentración de las partículas ferrosas en una muestra de fluido a través de la precipitación de esas partículas en un tubo de vidrio sometido a un fuerte campo

magnético. Dos rayos de luz transportados por fibra óptica impactan sobre el tubo en dos posiciones correspondientes a la localización en la cual las partículas grandes ($> 5\text{micras}$) y las pequeñas ($< 5\text{micras}$) serán depositadas por el campo magnético. El método estándar utilizado para conteo de partículas es la ISO 4406/1999 (Ver fig. 1.29).



Figura 1.29 Equipo ISO 4406/1999 para Ferrografía Directa.

Analizador Espectrográfico.

Se utiliza el equipo para Análisis Espectrográfico, método ASTM D-5185 (Tabla 1.2). Con este tipo de unidad se determina el contenido de metales en una muestra de aceite de motor. Este instrumento mide en partes por millón (ppm) las cantidades de metales de desgaste del motor que se

encuentran en el aceite usado. Un aceite puede ser aceptable desde el punto de vista físico-químico, pero si el contenido de metales está por encima de la tendencia normal de desgaste, será necesario cambiar de aceite (Ver fig. 1.29).

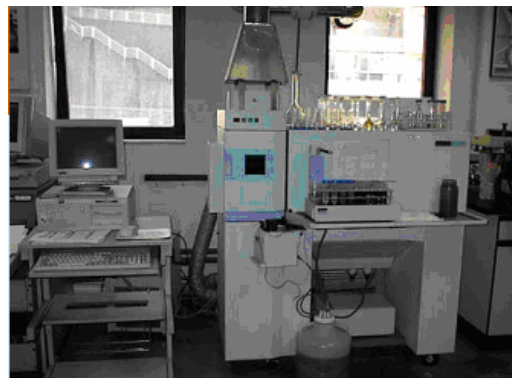


Figura 1.30 Analizador Espectrográfico.

Análisis FTIR

Por su sigla significa Espectroscopía Infrarroja por Transformadas de Fourier, esta práctica realiza el análisis cualitativo de muestras de sólidas, líquidas y vapores, por técnicas infrarrojas; se determinan parámetros (en %) como el Hollín, Oxidación, Sulfatación, Agua, Nitración y Fuel.

TABLA 1.2

ELEMENTOS Y ORIGEN EN UN ACEITE PARA MOTOR.

Elementos	Origen
Silicio	Polvo del ambiente/Aditivo antiespumante.
Calcio	Aditivos detergente.
Zinc, Fósforo	Aditivos antidesgaste.
Hierro	Pistones y camisas.
Cromo	Anillos del pistón
Aluminio	Cojinetes principales/Combustible.
Estaño, Cobre y Plata	Cojinetes de biela y cojinetes principales.
Plomo	Cojinetes del árbol de levas.
Vanadio	Combustible.
Sodio	Combustible/Aditivo agua de enfriamiento
Boro	Aditivo agua de enfriamiento
Magnesio	Contaminación agua.
Níquel	Vástago de válvulas y cigüeñal/ Combustible

Puntos de Inflamación y de Combustión.

El punto de inflamación de un aceite es la temperatura a la cual se debe calentar hasta que se desprendan superficies de vapores inflamables,

que se inflaman al ponerlos en contacto momentáneo con una llama. El punto de combustión es la temperatura más alta a la cual continuarán ardiendo los vapores de aceite, una vez que se han encendido. El método estándar ASTM D-93 se utiliza para probar los puntos de inflamación y de combustión por medio del ensayador de copa cerrada Pensky-Martens (Ver fig. 1.31).



Figura 1.31 Ensayador Copa Cerrada Pensky-Martens.

Residuo de Carbono.

Se define como el porcentaje de depósitos carbonosos que se obtienen al someter a una muestra de aceite a evaporación y pirólisis en las condiciones normales de ensayo. La determinación se hace con mayor frecuencia por el procedimiento de Conradson (ASTM D-189). O por el método de Ramsbottom (ASTM D-524) (Ver fig. 1.32).

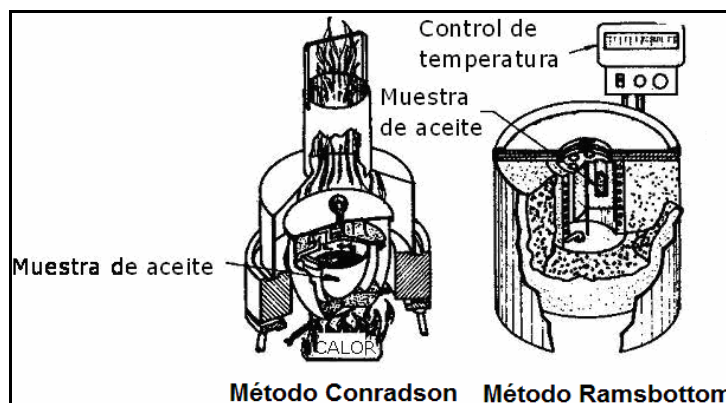


Figura 1.32 Pruebas de Residuo de Carbono.

Contenido de Ceniza.

Para evaluar el Contenido de Ceniza, en una muestra de un aceite nuevo o usado, se emplean dos métodos. El ASTM D-482 para aquellos aceites formulados con aditivos sin cenizas y el ASTM D-874 para los que contienen aditivos con cenizas. Los aditivos que mayor cantidad de cenizas producen son los detergentes, por lo cual esta prueba proporciona el contenido aproximado de aditivos detergentes, especialmente aquellos derivados del Bario (Ba) y Calcio (Ca).

El Número Base Total (TBN).

El TBN es básicamente una medida del potencial que tiene el aceite para neutralizar los ácidos que se vayan formando con el Azufre (S) y Cloro

(CI). El método ASTM D-2896, indica la cantidad de miligramos de ácido perclórico, necesaria que debe añadirse a un gramo de la muestra de aceite para neutralizar todos sus componentes básicos (Ver fig. 1.33).



Figura 1.33 Potenciómetro para determinar el TBN.

Antiespumante.

La espuma consiste en burbujas de aire que ascienden rápidamente hacia la superficie del aceite, pero debe ser diferenciada del atrapamiento de aire que es el ascenso lento de burbujas dispersas a través de todo el aceite. Las características de la formación de espuma en el aceite de cárter, se verifica con la prueba de formación de espuma ASTM D-892. (Ver Fig. 1.34)



Figura 1.34 Equipo para Probar Formación de Espuma en el Aceite.

Prueba de la Oxidación.

Se suelen aplicar las pruebas ASTM D-943 y ASTM D-2272. (Ver fig. 1.35).



Figura 1.35 Equipo para probar la Estabilidad a la Oxidación.

Demulsibilidad.

Es la propiedad del aceite para separar el agua y así evitar la formación de herrumbre. Se puede medir con base en la ASTM D-1401, como se aplica a aceites de viscosidad ligera a moderada, y por la ASTM D-2711, en aceites muy viscosos. Esta propiedad es deseable donde el agua debe separarse fácilmente del aceite. Los factores que favorecen la estabilidad de las emulsiones son: una tensión interfacial suficientemente baja, viscosidad muy elevada del aceite, pequeña diferencia de densidad entre ambos líquidos y la presencia de sulfonatos por oxidación del aceite (Ver fig. 1.36).

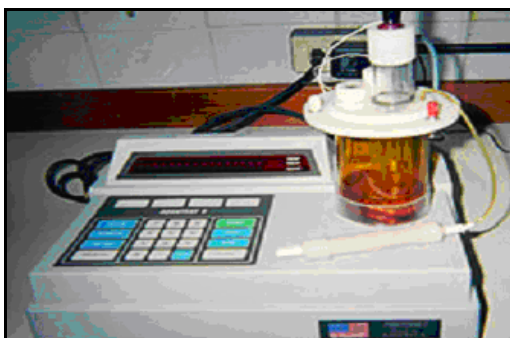


Figura 1.36 Equipo de Prueba con Reactivo Karl Fischer.

TABLA 1.3

METODOS FÍSICO-QUÍMICO ASTM

PRUEBA	MÉTODO ASTM
Gravedad específica y API	D – 287
Viscosidad	D – 88 y D – 445
Índice de viscosidad	D – 2270
Color	D – 1500
Punto de inflamación o de chispa	D – 92 y D – 93
Punto de fluidez	D – 97
Residuos de carbón Conradson	D – 189
Residuos de carbón Ramsbottom	D – 524
Número de neutralización o TAN	D – 664 y D – 974
Número básico total (TBN)	D – 664 y D – 2896
Insolubles en pentano y en benceno	D – 893
Dilución por combustible	D – 322
Demulsibilidad	D – 1401 y D – 2711
Resistencia la formación de espuma	D – 892
Agua y sedimentos (BSW)	D – 95, D – 96 y D – 1744
Corrosión al cobre	D – 130
Herrumbe	D – 665
Contenido de cenizas	D – 482 y D – 874
Punto anilina	D – 611
Rigidez dieléctrica	D – 877 y D – 1816
Estabilidad a la oxidación	D – 943
Contenido de inhibidor de oxidación	D – 2668
Contenido de azufre	D – 1266, D – 129, D – 1662
Azufre corrosivo	D – 1275
Contenido de Cloro	D – 808 y D – 1317

Clasificación Servicio API.

La designación API de calidad para aplicaciones del tipo automotriz consta de la letra C (para motores de encendido por compresión) seguida de una segunda letra que se cambia según lo exige la necesidad de mejoras en la calidad. Por el momento, CD representa el nivel más alto de calidad y se recomienda para la mayor parte de los motores turbocargados (4) (Ver Tabla 1.4).

(4) Manual del Ingeniero Mecánico Tomo I, Marks.

TABLA 1.4

CLASIFICACIÓN API DE LUBRICANTES PARA MOTORES DIESEL.

TIPO	APLICACIÓN
CC	Motores Diesel en servicio medio. Típico de motores diesel ligeramente sobrealimentados trabajando en condiciones severas. Aceites introducidos en 1961 y utilizados en muchos camiones, motores industriales y tractores. Unen a la protección de los depósitos a alta temperatura, a las propiedades anticorrosivos contra las borras en frío.
CD	Motores Diesel en servicio pesado. Típico de los motores sobrealimentados que trabajan a altas velocidades, altas prestaciones de potencia que requieren un riguroso control de desgaste y de los depósitos, y que usan combustibles de varias calidades.
CE	Típico servicio para satisfacer las exigencias de motores Diesel turbocomprimidos y sobrecargados construidos desde 1983 y que funcionan tanto en condiciones de baja velocidad y alta carga como a alta velocidad y alta carga. Supera ampliamente las prestaciones previstas para los servicios CC y CD.
CF	Motores Diesel en servicio muy pesado. Típico de los motores diesel de inyección directa y de los motores diesel en general que funcionan incluso con gasóleos con alto contenido de azufre. Introducida en 1994, supera ampliamente las prestaciones previstas para las categorías CD y CE.
CF-4	Motores Diesel en servicio muy pesado. Esa categoría fue introducida en 1990 y describe aceites utilizados en motores diesel a alta velocidad. Los aceites CF-4 superan las prestaciones previstas para la categoría CE y garantizan un mejor control sobre el consumo de lubricante y sus depósitos.
CG-4	Motores Diesel en servicio muy pesado. Esta categoría fue introducida en 1994 y describe aceites utilizados en motores diesel de vehículos industriales que funcionan con gasóleos con un contenido mínimo de azufre > 0,05%. Los aceites CG-4 superan las prestaciones previstas para los aceites CF-4.
CH-4	Introducida desde el 01/12/98, diseñada para superar las limitaciones de normas de emisión para motores de alta velocidad. Los aceites CH4 están preparados especialmente para ser utilizados con carburantes diesel con un contenido de azufre no superior a 0,5% y pueden ser usados cuando se requieran los lubricantes CD-CE-CF4-CG4.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1 GENERALIDADES DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO (MPd)

Definición.

El MPd es una técnica para pronosticar los puntos futuros de falla de una máquina, de tal forma que pueda reemplazarse el componente, justo antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza.

(5)

El MPd consiste en establecer una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente. Esto se logra mediante la toma de lecturas en intervalos periódicos hasta que el componente falle (Ver fig. 2.1).

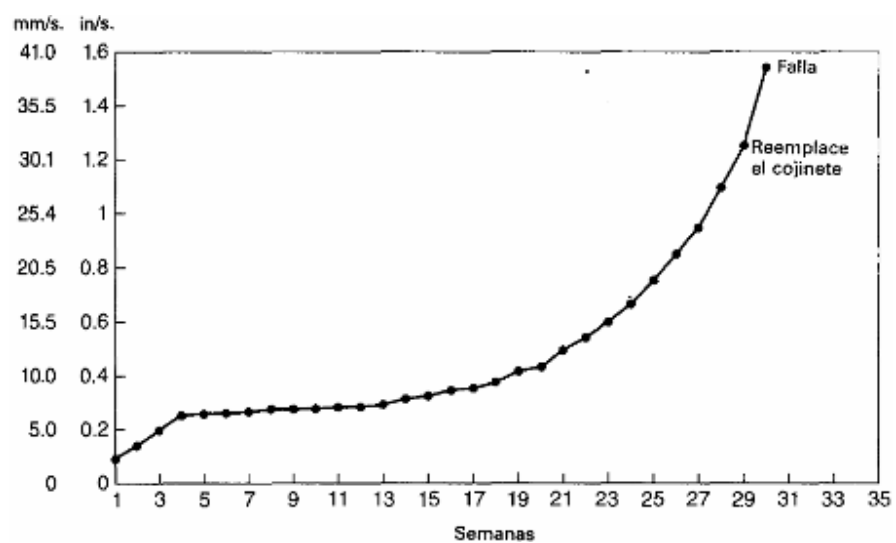


Figura 2.1 Ejemplo de Curva Típica de Vibración en un Cojinete.

Técnicas Aplicadas.

Existen varias técnicas aplicadas para el MPd entre las cuales están las siguientes:

(5) Definición del Manual del Ingeniero de Planta, Rosales Robert.

Análisis de Vibraciones.

El objetivo principal es la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en la máquina o elemento, la determinación de sus causas y la corrección del problema. Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos, las tensiones, pérdidas de energía, desgaste y daños por fatiga de los materiales.

Análisis de Aceite.

En el subcapítulo 2.2 se detalla sobre esta técnica del MPd.

Termografía.

La Termografía Infrarroja es una técnica que permite, a distancia y sin ningún contacto, medir y visualizar temperaturas de superficie con precisión.

Análisis por Ultrasonido.

Esta técnica estudia las ondas de sonido de baja frecuencia producidas por los equipos y que no son perceptibles al oído humano.

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL ANÁLISIS DE ACEITE (AA).

Definición.

El AA consiste en una serie de pruebas de laboratorio que se usan para evaluar la condición de los lubricantes usados. Al estudiar los resultados del análisis se obtiene la información suficiente que permite tomar decisiones en cuanto a la necesidad de cambiar el lubricante o de someterlo a un proceso de filtración o de diálisis. Con este análisis también se puede elaborar un diagnóstico sobre la condición de desgaste del equipo y sus componentes.

Objetivo.

- Control de la degradación del lubricante.
- Monitorear daño mecánico de componentes (desgaste).
- Control de contaminantes por sólidos, fluidos o gases.
- Verificar que se está usando el lubricante adecuado.

Consideraciones para el Muestreo.

- Las muestras de aceite lubricante deben ser tomadas del aceite en circulación y con el motor en operación.
- La muestra debe ser tomada en el puerto de muestreo ubicado después del equipo de separación y filtrado, antes del motor.
- Es recomendable tomar la muestra antes de refrescar con aceite nuevo al motor.
- La primera muestra de aceite que se tome al abrir la válvula no debe considerarse, sino la siguiente, porque de lo contrario se estaría analizando el aceite acumulado en esa sección de la tubería.
- Utilizar botellas de muestras limpias y limpiar la línea de muestra antes de tomar la muestra, la cantidad adecuada de la muestra es de 0,75 a 1 litro.
- Las frecuencias de muestreo comienzan desde las 250 horas.
- El recipiente empleado para la muestra debe ir debidamente marcado para su completa identificación. Los datos que se deben especificar con la muestra de aceite son:

Nombre y marca del aceite, volumen de aceite que utiliza el equipo, compensación y fecha de toma de la muestra de aceite. Las muestras deben enviarse inmediatamente.

- Calibración de instrumentos y el uso de reactivos y solventes de alta pureza.

- Los resultados deben ser interpretados por un Técnico Certificado.

Interpretación del AA y Límites Condenatorios.

Numero Básico Total.

El TBN mide la reserva alcalina del aceite lubricante. El azufre en el combustible es convertido en productos acídicos, durante su combustión. Niveles bajos de TBN pueden conllevar a una corrosión acídica, esto incrementa la tasa de desgaste del motor y reduce la vida útil de sus componentes. Niveles altos de número base, pueden formar depósitos en el motor. Se recomienda el uso de aceites con TBN entre 50-55 cuando se opera con combustibles pesados con niveles de azufre >2% por peso. El nivel máximo permitido cuando se opera en HFO (Fuel Oil Pesado) es de 50% del nivel original del aceite.

Viscosidad

La viscosidad es un factor importante para predecir el desempeño, la fatiga de cojinetes y engranajes. La viscosidad típica para un aceite SAE 40 es de 13,5 a 15,0 cSt a 100 °C. Los Límites Máximo y Mínimo son del -20% y +25% de los niveles del aceite fresco. Y la viscosidad típica a 40°C. es de 135 a 150 cSt. Con Límite Mínimo -25% y Límite Máximo +45%.

Índice de Viscosidad.

La mayor parte de los motores de velocidad media tienen un aceite con un índice de viscosidad (IV) entre 95 y 110. Los cambios de viscosidad del aceite recomendados para el desempeño óptimo del motor son: máximo $\pm 15\%$ de los niveles originales del aceite fresco a 100°C. y máximo $\pm 25\%$ de los niveles originales del aceite fresco a 40°C.

Agua.

Si se incrementa el número de moléculas de agua en el aceite, este se satura tomando un aspecto turbio y agua libre aparece en el aceite. Productos de la corrosión también pueden contribuir a la formación de desperdicios sólidos y a la formación de picaduras en las superficies del

metal. Los efectos de estas reacciones son productos indeseables, tales como barnizado, laqueado, lodos, ácidos orgánico e inorgánicos, depósitos en las superficies y espesado del lubricante (polimerización). El contenido máximo de agua en el aceite es de 0,3% por volumen o peso.

Insolubles.

Pueden estar presentes en el lubricante partículas sólidas duras, como arena, arcilla, materiales de desgaste, etc. Si su tamaño es casi el mismo que la película de aceite estos se pueden adherir o desgastar las superficies que entran en contacto con ellas. Contaminantes semisólidos son generalmente productos de la oxidación y polimerización, productos secundarios del carbón, microorganismos y productos. De la reacción de aditivos del aceite con agua. El nivel máximo de insolubles permitido es de 2% por peso (insolubles de n-pentano).

Punto de Inflamación.

En el aceite nuevo se emplea como parámetro de referencia para determinar la temperatura máxima hasta la cual se pueden emplear sin riesgo alguno; y en el aceite usado, si ha disminuido, puede indicar que el aceite está diluido con un solvente o con un combustible, está

contaminado con un aceite de menor viscosidad, o se ha craqueado debido a temperaturas de trabajo excesivamente altas; un valor alto respecto al inicial indica que ha habido pérdidas por evaporación. Estos incrementan la posibilidad de una explosión en el cárter. El punto de inflamación mínimo permitido es de 190°C si se utiliza el método de Copa Abierta Cleveland. Cuando el punto de inflamación llega al límite se establece una alerta con búsqueda de la falla en la inyección.

Nitración.

El aceite absorbe el bióxido de nitrógeno (NO_2) del NO_x que se encuentra en los gases de combustión que se escapan de la cámara de combustión al cárter, en consecuencia degradará al aceite y formarán depósitos excesivos de barniz lo que aumentará la viscosidad del aceite.

TABLA 2.1
PRUEBAS DEL AA Y SU ENFOQUE.

ANÁLISIS DE ACEITE	OBJETIVO	RESULTADO ESPERADO
Viscosidad	Salud del lubricante	Estable
Numero de Neutralización	Degradación del lubricante	Tendencia Decreciente
Punto de Inflamación	Contaminación	Estable
Análisis de Elementos por Emisión Atómica	Degradación de aditivos Contaminación Metales de Desgaste	Decremento suave Negativo Negativo-Tendencia
FTIR – Análisis Infrarrojo	Degradación de aditivos Contaminación	Decremento suave Negativo
Resistencia a la Oxidación RPVOT	Salud del lubricante	Estable

Metales de Desgaste.

La concentración de los elementos en el aceite usado también depende de la calidad y la composición del combustible. Los metales de desgaste más comunes en el aceite son Hierro (Fe), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Cobre (Cu) y Estaño (Sn). También hay pequeñas cantidades de Aluminio (Al), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni) y Antimonio (Sb) presentes en el motor.

Hierro (Fe).

El contenido de hierro indica desgastes de los pistones, camisas del cilindro, sistemas de válvulas y cigüeñal. El aceite fresco también puede contener pequeñas cantidades de hierro (<15ppm) que puede proceder de los mezcladores, carros cisterna o bidones de aceite.

Cromo (Cr) y Níquel (Ni).

El contenido de Cr y Ni en el aceite indica desgaste de los anillos del pistón.

Plomo (Pb).

El Pb puede estar presente en las capas superiores de los casquillos del bulón, cojinetes del eje de levas, casquillos de los extremos del eje de levas y de las arandelas de empuje.

Cobre (Cu).

El Cu puede contaminar el aceite por medio del desgaste de los cojinetes de las bombas de lubricación, los cojinetes de bronce de los balancines, los rodillos en los botadores y de los casquillos del cojinete del bulón. Si

el contenido de Cu es alto la causa probable es la presencia de gases de escape del aire de admisión.

Estaño (Sn).

Las posibles fuentes de Sn son los cojinetes mayores de la biela, cojinetes principales, los casquillos del cojinete del bulón, cojinetes del eje de levas, casquillos de los cojinetes de los extremos del eje de levas y las arandelas de empuje.

Aluminio (Al).

Las fuentes más probables de Al es el combustible HFO.

Elementos que se Originan del Combustible.

Vanadio (V) y Níquel (Ni).

El combustible pesado HFO es normalmente la fuente de V y Ni en el aceite. Estos elementos generalmente llegan a un equilibrio, el cual es dos veces el contenido de V y Ni en el combustible.

Aluminio (Al) y Silicio (Si).

El origen del Al y Si generalmente es el combustible pesado. Ocasionalmente algunos residuos del catalizador de las refinerías pueden estar presentes en el combustible y estos contaminan el aceite durante la operación. El Si también es utilizado como un antiespumante en los aceites de lubricación.

Sodio (Na).

La fuente principal de Na en el aceite es el combustible pesado, aunque su presencia también puede indicar que hay una fuga en el circuito cerrado del sistema de enfriamiento. Los aditivos más comunes para el agua de enfriamiento son productos formulados a base de Nitritos de Sodio + Borato de Sodio y Molibdato de Sodio.

Aditivos del Aceite.**Calcio (Ca), Fósforo (P) y Zinc (Zn).**

Se utilizan como aditivos del aceite. La cantidad de Ca es dependiente del TBN, es directamente proporcional. En la mayoría de los aceites lubricantes utilizados en motores Diesel de velocidad media el contenido

de Fósforo es de 200 a 1000 ppm y el contenido de Zn es de 200 a 1100 ppm. El Zn ayuda a inhibir la oxidación, la nitración y a neutralizar los ácidos. Este está unido metalúrgicamente a las paredes de la camisa formando así una capa entre los anillos y la camisa, manteniéndolos separados.

2.3 METODOLOGÍA DE LA TÉCNICA SACODE.

Definición.

Es una técnica que a través del seguimiento sistemático de un método de interpretación, da las bases necesarias para realizar una correcta interpretación de los resultados del AA.

La sigla SACODE indica el orden con el cual se revisarán las 3 categorías del AA: SA para "salud", CO para "contaminación" y DE para "desgaste".

SALUD: Son aquellos cambios relacionados con el aceite en sí, por ejemplo: viscosidad, contenido de aditivos (P, Zn, Ca, Mg), oxidación, sulfatación, nitración, punto de inflamación, índice de viscosidad, TBN, etc.

CONTAMINACIÓN: Son todos aquellos contaminantes presentes en el lubricante, tales como: partículas de tierra y polvo (Si), agua, solventes, combustibles, materiales del proceso (cemento, plástico, etc.), otros aceites lubricantes, hollín, refrigerante, etc.

DESGASTE: Partículas procedentes de la maquinaria, como Fe, Cu, Sn, Al, Cr, etc.

Definición de los Límites Condenatorios.

Línea Base (LB): Son las características originales del aceite nuevo que se utilizará en la lubricación del equipo como viscosidad, el TBN, el contenido de aditivos P, Zn, Ca, Mg, B, Si (este elemento puede ser un aditivo cuando el aceite contiene un antiespumante a base de metilsilicona o bien, puede ser un contaminante procedente de la tierra y el polvo), etc. Es fundamental contar con la información de la LB para poder implementar un programa de AA efectivo.

Límites Objetivos: Son aquellos que se establecen como un valor predeterminado que se está buscando obtener.

Límites de Precaución: Señalan una condición por sobre la cual se tiene una situación anormal y una acción es necesaria.

Límites Críticos: Señalan una condición por sobre la cual se tiene una situación crítica y se requiere tomar una acción inmediata.

Límites de Envejecimiento: Grado máximo de acidez, de oxidación, de sulfatación, de nitración, de nivel de aditivos, etc.

Límites de Tasa de Cambio: Miden el cambio de una característica respecto al tiempo o al uso, por ejemplo: ppm Fe/hora, ppm Cu/hora, etc.

Análisis Estadísticos y Establecimiento de Límites.

Tasa de Cambio

Se utiliza para los parámetros que dependen del tiempo y que en la LB empiezan desde cero o que durante el uso del aceite estos tienden a cero, como es el caso de los aditivos. La tendencia de la Tasa de Cambio normalizada permite visualizar con mayor claridad los cambios que sufre cada parámetro con respecto al tiempo. Para calcular la Tasa de Cambio de un parámetro se utiliza la siguiente fórmula:

$$\dot{x} = \frac{x_o - x_{-1}}{t_o - t_{-1}} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

- \dot{x} Tasa de Cambio.
- x_0 Parámetro de la muestra actual.
- x_{-1} Parámetro de la muestra anterior.
- t_0 Horómetro de la muestra actual.
- t_{-1} Horómetro de la muestra anterior.

Esta fórmula tiene limitaciones cuando se aplica para la primera muestra luego del cambio de aceite, en este caso para X_{-1} se deberá considerar el valor de la LB.

Límites Estadísticos

Son límites basados en desviaciones de los promedios históricos en condiciones normalizadas. Se los obtiene calculando el valor promedio y la desviación estándar de los análisis anteriores del equipo o equipos de idénticas características y condiciones de monitoreo. Se establece el límite de precaución como el valor promedio +1 desviación estándar y el límite crítico como el valor promedio +2 desviaciones estándar.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{Ec. 2.2) donde,}$$

\bar{x} Media Muestral.

x_i Valor de cada muestra.

n Número total de muestras.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (\text{Ec. 2.3) donde,}$$

σ Desviación Estándar Muestral.

TABLA 2.2

**FÓRMULAS PARA ESTABLECIMIENTO DE LÍMITES
ESTADÍSTICOS.**

Valor Normal	\bar{x}
Límite Alarma	$\bar{x} \pm \sigma$
Límite Crítico	$\bar{x} \pm 2 \cdot \sigma$

Normalización

Existen dos situaciones en las que se debe normalizar los datos originales del AA: cuando las muestras han sido recolectadas en intervalos de tiempo distintos al objetivo y cuando se han realizado compensaciones de aceite en el motor entre muestras. Es conveniente hacer estos ajustes para evitar llegar a conclusiones erróneas.

La normalización para intervalos de tiempo distintos al objetivo se obtiene aplicando una regla de tres, si las muestras fueron tomadas fuera del rango de +/- 10 % del período establecido. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$N_t = \frac{t_s}{t_p} \quad (\text{Ec. 2.4) donde,}$$

t_s Tiempo estándar definido del muestreo.

t_p Tiempo que el aceite ha estado en uso.

$$\dot{x}_t = x_o \cdot N_t \quad (\text{Ec. 2.5) donde,}$$

\dot{x}_t Parámetro Normalizado por Tiempo.

La normalización para compensaciones de aceite se obtiene relacionando la capacidad del cárter y sumando todas las compensaciones realizadas entre la última muestra tomada y la muestra actual. Se utiliza la siguiente formula:

$$N_m = 1 + \frac{V}{V} \quad (\text{Ec. 2.6) donde,}$$

N_m Factor de normalización por Compensación de Aceite.

V Capacidad del Cárter (litros).

V Volumen Total de Aceite Compensado (litros).

$$x_m = x_o \cdot N_m \quad (\text{Ec. 2.7) donde,}$$

x_m Parámetro Normalizado por Compensación de Aceite.

Al valor x_m se le puede calcular la Tasa de Cambio de la siguiente manera:

$$\dot{x}_m = \frac{x_{om} - x_{-1m}}{t_o - t_{-1}} \quad (\text{Ec. 2.8) donde,}$$

\dot{x}_m Tasa de Cambio de Parámetro Normalizado por Compensación de Aceite.

x_{om} Parámetro Normalizado por Compensación de Aceite Muestra Actual.

x_{-1m} Parámetro Normalizado por Compensación de Aceite Muestra Anterior.

Para normalizar un mismo dato por compensación de aceite y por tiempo se utiliza:

$$\dot{x}_{tm} = x_o \cdot N_t \cdot N_m \quad (\text{Ec. 2.9) donde,}$$

\dot{x}_{tm} Parámetro normalizado por compensación de aceite y por tiempo.

Criterios para el Establecimiento de Límites.

Para establecer los límites, es necesario determinar primero si el parámetro es independiente o dependiente del tiempo. Si en condiciones normales de operación, este valor no aumenta ni disminuye proporcionalmente con el tiempo de uso, entonces es independiente del tiempo. El parámetro es dependiente del tiempo si su aumento o disminución es proporcional al tiempo.

- Para los parámetros dependientes del tiempo se utiliza el análisis estadístico y donde sean aplicables las normalizaciones por tiempo y por compensación de aceite.

- Los parámetros de desgaste son dependientes del tiempo y sus límites pueden establecerse normalizando por tiempo y por compensación de aceite. Sin embargo en lugar de estos límites se puede establecer los límites por Tasa de Cambio.

- Para los parámetros independientes del tiempo se consideran los límites establecidos por el fabricante de la máquina y/o del lubricante, hay técnicas que permiten mejorar estas especificaciones basadas en la experiencia de vida útil del aceite y de la máquina.

- Los parámetros independientes del tiempo proactivos, y que están fuera de los límites normales, (como la contaminación por agua y las partículas contaminantes) indican que se deben tomar acciones tempranas que ayuden a prevenir algún deterioro en el aceite o en la máquina.

- Para los parámetros independientes del tiempo reactivos, y que están fuera de los límites normales (como el TBN, la viscosidad y los aditivos) se toman acciones inmediatas como el refrescamiento con aceite nuevo o cambio del aceite.

- Todos los parámetros se pueden analizar con los límites de Tasa de Cambio. Sin embargo primero es necesario normalizar por compensación de aceite a los parámetros que sea posible.

- Hay parámetros que pueden tener a la vez un límite dependiente y un límite independiente del tiempo. Por ejemplo, la viscosidad tiene un límite de acción reactiva establecido por el fabricante y un límite de Tasa de Cambio que controla las variaciones anormales en el tiempo.

En la Tabla 2.3 se resumen los criterios para establecer los límites para cada tipo de parámetro.

TABLA 2.3

CRITERIOS PARA ESTABLECIMIENTO DE LÍMITES

	LÍMITES			
	INDEPENDIENTE DEL TIEMPO		DEPENDIENTE DEL TIEMPO	
	Usar Límites del Fabricante		Usar Límites Estadístico	
Descripción	Proactivo	Reactivo	Tasa de Cambio	Normalización por Tiempo
TBN/TAN		X	X	
Viscosidad		X	X	
Aditivos		X	X	
Contaminantes	X	X	X	
Metales de Desgaste			X	X

Procedimiento.

a) Leer y considerar toda la información referente al equipo que proporcione el reporte de análisis.

b) Tomar nota de todos los detalles referentes al muestreo, el lugar por donde se toma la muestra, las condiciones, describir si la máquina estaba en operación, describir forma en que fue tomada la muestra: por puerto o por válvula de muestreo, en un codo en línea de retorno, antes o después de los filtros, describir si se purgó la cantidad suficiente, etc.

Deberá tomarse en consideración toda la información disponible a objeto de incluirla en el momento de obtener conclusiones.

c) Observar el tipo de maquinaria, la industria en la que opera y el ambiente de trabajo del equipo.

d) Normalizar la información si hace falta.

e) Identificar cada parámetro, con el Código SACODE: Salud (S), Contaminación (C) y Desgaste (D). Poner letra a la izquierda de cada dato de la Línea Base y la última muestra reportada.

f) Revisar en el siguiente orden: La información de la LB, la data del último análisis y la data de las diferentes muestras a lo largo del tiempo.

g) Considerar la información de la LB, los datos del fabricante, las fórmulas estadísticas y los criterios para identificar los parámetros dependientes e independientes del tiempo, luego calcular y establecer los límites de precaución y críticos para cada parámetro utilizando los datos disponibles.

h) Anotar los límites de precaución y crítico a la derecha de cada parámetro.

i) Iniciar lectura primero en cuanto a las propiedades de SALUD, segundo los datos de CONTAMINACIÓN y al final, los datos correspondientes al DESGASTE.

j) Clasificar los datos en:

- Dato normal, dentro de límites precautorios.

- Datos con tendencia, aún está dentro de límites normales o críticos, pero muestra una especial tendencia, ya sea de incremento o de disminución.

- Dato anormal y crítico: denominados “pivotes” que servirán como puntos base de referencia para la calificación del reporte. Son los que están fuera del límite crítico o por encima del límite de 2 desviaciones estándar o cuando se tienen 3 valores consecutivos por encima del límite de una desviación estándar (aunque esté por debajo del límite de 2 desviaciones estándar). En este proceso debe detenerse en el primer valor anormal que resulte y resaltarlos.

k) Leer el historial para tal propiedad (información de muestras anteriores). Continuar este proceso, de tal forma que primero se recorrerán todos los datos de salud, después los de contaminación y al

final los de desgaste. Es posible, dependiendo del estado de la muestra, el obtener varios pivotes en cada una de las dimensiones (SA-CO-DE).

l) Anotar en el formato las conclusiones parciales: en cada dato y continúese en el orden establecido (Ver Fig. 2.2).

m) Reunir anotaciones y analizar si los pivotes o datos con tendencia se relacionan entre sí y se emite un diagnóstico de lo encontrado.

Recomendaciones.

- Las conclusiones deben mantenerse siempre en el contexto de los hechos; si es necesario se debe recomendar hacer una investigación de campo.

- Se debe plantear acciones sobre qué hacer con el lubricante y qué hacer con el equipo.

- No debe dirigir la atención directamente en los datos de desgaste.

- Utilizar el código de colores.

TABLA 2.4

CÓDIGO DE COLORES

CÓDIGO	CONDICIÓN	ACCIÓN
VERDE	Normal	No
AMARILLO	Anormal	Sí
ROJO	Crítica	Inmediata

REPORTE DE ANALISIS DE ACEITE												
MAQUINA:		PUNTO DE MUESTREO:			LITROS DE ACEITE COMPENSADOS:			FECHA DE MUESTREO:				
MARCA/MODELO:		HOROMETRO MAQUINA:			FRECUENCIA DE MUESTREO:							
LUBRICANTE:		CAPACIDAD CARTER: 4000 Litros			HORAS ACEITE:			EMISION DE RESULTADO:				
DESCRIPCION DEL ANALISIS: LOS ELEMENTOS ANALIZADOS SON: Fe, Cu, Pb, Sn, Cr, Al, Ni, Ti, Ag, V, Mg, S, B, Na, Ba, Ca, P, Zn, Mo por (RES) ANALISIS ESPECTROSCOPICO (elementos desueltos en ppm), Analisis FTIR, Prueba de Viscosidad a 100°C (ASTM D-445), TBN (mg KOH/g aceite) (ASTM D-2896, D-4739)												
SACODE	PARAMETROS ANALIZADOS	Linea Base	Dato Original		Normalizado		Tasa de Cambio		Lmites		CÓDIGO	DIAGNOSTICO
			Muestra Anterior	Muestra Actual	Muestra Anterior	Muestra Actual	Muestra Anterior	Muestra Actual	Precaucion	Crítico		
D	HIERRO (ppm)											
D	COBRE (ppm)											
D	ALUMINO (ppm)											
D	CRONIO (ppm)											
D	NIQUEL (ppm)											
D	WOLBENIO (ppm)											
C	SILICIO (ppm)											
B	MAGNESIO (ppm)											
C	SODIO (ppm)											
B	CALCIO (ppm)											
B	FOSFORO (ppm)											
B	ZINC (ppm)											
C	VANADIO (ppm)											
C	MOLIBDENO (%)											
B	OXIDACION (%)											
B	SULFATACION (%)											
C	AGUA (%)											
B	NITRACION (%)											
B	VISCOSIDAD @100C (cSt)											
B	TBN (mg KOH/g)											

Figura 2.2 Formato SACODE para Reporte de AA.

2.4 GENERALIDADES DEL MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN.

Definición

Una definición de Mantenimiento Basado en Condición refiere lo siguiente:

Las tareas a condición consisten en chequear si hay fallas potenciales, para que se pueda actuar para prevenir la falla funcional o evitar las consecuencias. Esto también se conoce como Mantenimiento Basado en Condición porque la necesidad de acciones correctivas o para evitar las consecuencias se basa en una evaluación de la condición del elemento (6).

En la realidad los métodos de mantenimiento basado en condición han existido siempre en la forma del sentido humano (vista, oído, tacto y olfato). Sin embargo, las desventajas de emplear estos, es su imprecisión porque las pequeñas desviaciones tienden a estar mas allá del rango sensitivo humano y solo podrían detectarse con instrumentos.

(6) Definición del libro Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, John Moubray.

Objetivos.

- Balancear el tiempo entre mantenimientos.
- Minimizar los tiempos de parada programados y no programados.
- Optimizar el rendimiento del motor.
- Maximizar la seguridad de la instalación y su disponibilidad.

El CBM promueve el cambio del Mantenimiento Preventivo a uno más preciso y flexible que es el MPd.

Descripción del Sistema de Monitoreo del Motor.**Módulos de Monitoreo.**

Los módulos de monitoreo son grupos de sensores que reducen los juegos de cables en el motor. Las señales monitoreadas por estos, se transmiten al módulo de control principal y su función es garantizar el control y la seguridad del motor. Estos valores se transfieren al sistema externo de los operadores donde son visualizados.

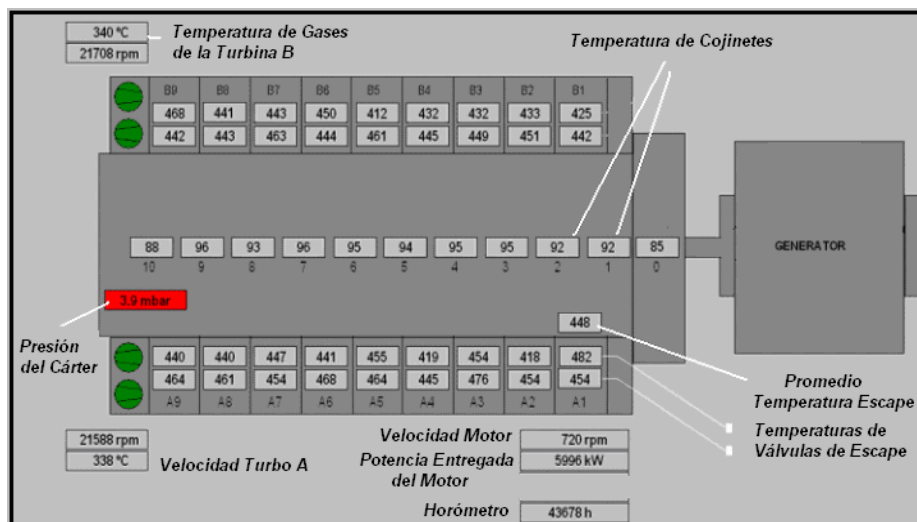


Figura 2.3 Sistema Externo de Operación de un Motor-Generador.

En la siguiente tabla se muestran varios parámetros que se pueden monitorear en un motor.

TABLA 2.5

PARÁMETROS QUE PUEDEN MONITOREARSE EN UN MOTOR.

PARÁMETROS	UNIDADES	SISTEMA
Potencia Generada	KW	Motor
Temperatura Cojinetes	°C	Lubricación
Temperatura Aceite Ingreso al Motor	°C	Lubricación
Temperatura Agua de Enfriamiento	°C	Enfriamiento
Presión Agua de Enfriamiento	bar	Enfriamiento
Presión Combustible	bar	Combustible
Temperatura de Gases de Escape	°C	Combustible
Velocidad Turbocargadores	RPM	Turbo

Metodología.

Se establece un intervalo de tiempo para la captura de datos y se seleccionan los parámetros operacionales más representativos de cada sistema. Estos datos capturados se tabulan por fecha y por máquina en un formato donde se almacenan y se grafican las tendencias de cada uno (Ver Apéndice J).

Luego se comparan con los valores del último monitoreo, verificando si existen variaciones considerables en la tendencia. Estos valores deben compararse con los valores objetivos que ya están especificados por el fabricante.

Después se anotan por orden de sistema las novedades que presenta cada parámetro dando una explicación de las posibles causas que originan las anomalías.

Finalmente se elabora un reporte sobre las principales novedades encontradas en cada sistema. Además de sugerir las acciones que deberán tomarse para corregir las anomalías.

Se debe asignar un color del código de colores a cada sistema, de acuerdo al criterio del técnico analista. (Ver fig. 2.4).

Color verde, indica que el motor opera en condiciones normales.

Color amarillo, indica que existe un alto riesgo de que el motor opere en condiciones críticas, se deben tomar medidas de precaución.

Color rojo, indica que el motor opera fuera de los límites normales y existe una alta probabilidad de falla, requiere de acción inmediata.

REPORTE DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICION					
MÁQUINA:		NUM. CILINDROS:		CILINDRADA:	
MARCA/MODELO:		DIÁMETRO S CILINDRO S:		POTENCIA SALIDA:	
LUBRICANTE:		CARRERA:		TURBOCARGADORES:	
CONFIGURACIÓN:		VELOCIDAD DECLARADA:		COMBUSTIBLE:	
RELACION COMPRESION:		PERIODO MONITOREO:	Desde:	Hasta:	
PARÁMETROS DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE					
PARÁMETROS DEL SISTEMA DE LUBRICACION					
PARÁMETROS DE LOS TURBOCOMPRESORES					

Figura 2.4 Formato de Reporte CBM.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO MONITOREADO Y DEL ACEITE USADO.

- El motor analizado es de operación continua a Fuel Oil Pesado (CRO) o Fuel Oil Liviano (HFO). De cuatro tiempos, de inyección directa, diseño interenfriado y turbocargadores. El consumo de aceite lubricante es de 0.8 ± 0.3 g/Kwh al 100% de carga. La capacidad del cárter es de 4020 litros de aceite.
- Cuenta con 18 cilindros configurados en V, cada uno de 320 mm. de diámetro, carrera de 350 mm. y cilindrada de 28.15 dm^3 . La velocidad declarada del cigüeñal es de 720 RPM y la relación de compresión es de

13,8:1. Cada cilindro tiene 2 válvulas de admisión y 2 válvulas de escape. La máxima potencia de generación es de 6300 KWh. Se ejecutan planes de mantenimiento (en horas) de: 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 12000, 16000, 24000, 32000, 36000, 40000 y 48000.

TABLA 3.1

CARACTERISTICAS DEL CRUDO QUE DEBE UTILIZAR EL MOTOR.

PARÁMETRO	UNIDAD	MÁXIMO
Viscosidad (a 100°C)	cSt	65
(a 50°C)	cSt	957
Densidad (a 15°C)	g/ml	0,991
Conradson carbon	% masa	22
Sulfuro, S	% masa	5
Vanadio, V	mg/Kg	428
Sodio, Na*	mg/Kg	20-50
Ceniza	% masa	0,12
Agua antes del motor	% Vol.	0,3
Aluminio + Silicón	% masa	30
Punto de fluidez	°C	30

* Se relaciona con el contenido de V en el combustible.

A continuación se muestra en la siguiente tabla el análisis del combustible utilizado.

TABLA 3.2
ANÁLISIS DEL COMBUSTIBLE UTILIZADO.

ANÁLISIS	UNIDAD	MÉTODO	VALORES
Densidad a 15°C	g/ml	D-1298	0,9594
Agua	% Vol.	D-4006	0,4
Sedimentos	% Vol.	D-473	0,02
Azufre	% Peso	D-4294	2,51
Cenizas	% Peso	D-482	0,034
Asfaltenos	% Peso	D-3279	9,7
Carbón Conradson	% Peso	D-189	8,2
Punto de Inflamación	°C	D-93	89
Viscosidad a 50°C	cSt	D-445	548,4
Vanadio	ppm	D-5863	200
Sodio	ppm	D-5863	22,5
Aluminio+Silicio	ppm	D-5184	79,2

Descripción del Sistema de Lubricación.

La función principal del Sistema de Lubricación es proporcionar al motor una cantidad suficiente de aceite lubricante limpio a la presión y temperatura necesarias. Es importante mantener una velocidad de flujo adecuada en todo el sistema. El aceite lubrica el motor y elimina el calor y los contaminantes generados por el proceso de combustión (escape de gases del pistón). El funcionamiento adecuado del sistema protege al

motor de averías causadas por una presión demasiado baja, temperaturas excesivas, presión de prelubricación demasiado baja o impurezas en el aceite. La bomba de aceite de lubricación succiona el aceite del recipiente de aceite del motor y lo fuerza a través de un intercambiador de calor. La temperatura del aceite se regula con una válvula termostática. El aceite se desviará del enfriador si la temperatura cae por debajo del valor de la válvula termostática (60 °C). Después del enfriador, el aceite lubricante pasa a través del filtro fino antes de ingresar al motor. El separador opera de forma continua separando el sedimento y el agua del aceite lubricante. El sistema de lubricación está compuesto por: bomba de aceite, módulo de tuberías, bomba de aceite de prelubricación, filtro fino de aceite de 0,015 mm, enfriador de aceite, unidad separadora, unidad de bomba de transferencia de aceite, unidad de bomba de descarga de aceite lubricante, tanque de aceite nuevo, tanque de aceite de mantenimiento y tanque de aceite usado (Ver Plano 01).

TABLA 3.3
CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE LUBRICANTE QUE DEBE
UTILIZAR EL MOTOR.

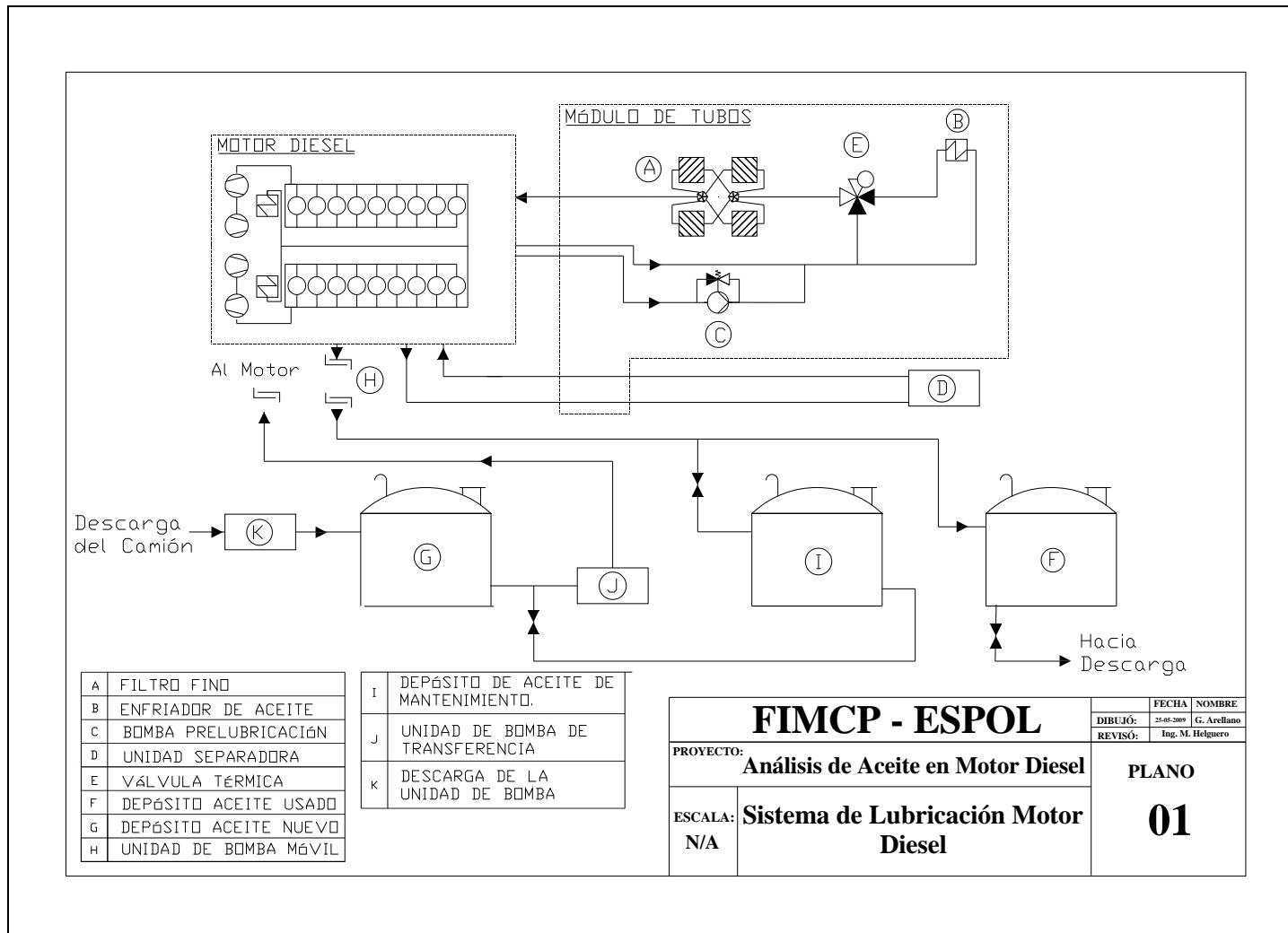
PARÁMETROS	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
Viscosidad, (a 40 °C)	cSt	110	212
(a 100 °C)	cSt	11	17
Punto de inflamación	°C	170	50
PARÁMETROS	UNIDAD	ALARMA	CRÍTICO
Agua	% masa	0,3	0,5
TBN	% dism. del valor original	20	50
Insolubles en n-pentano	% masa	1,5	2

A continuación se describe el aceite lubricante utilizado en el motor: Lubricante marino API CF para Motores Diesel de velocidad media (Ver Tabla 3.4). Sus características son:

- Buenas propiedades dispersantes a baja temperatura.
- Buena resistencia de la película lubricante frente a las altas presiones.
- Buen comportamiento en el centrifugado, en la separación de agua y compuestos insolubles.
- Buena neutralización de los componentes ácidos.

TABLA 3.4
CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE LUBRICANTE NUEVO UTILIZADO.

ENSAYOS	UNIDAD	MÉTODO ASTM	VALOR
Grado SAE	----	----	40
Viscosidad a 100°C	cSt	D-445	14
Índice de Viscosidad	----	D-2270	95
Punto de Inflamación, Mínimo.	°C	D-92	230
Punto de Escurrimiento, Máximo.	°C	D-97	-12
TBN	mg KOH/g	D-2896	55



3.2 PRESENTACIÓN DE TENDENCIAS DEL AA.

Consideraciones.

La frecuencia de muestreo se realiza cada 250 horas, el puerto de muestreo se encuentra antes del filtro fino de aceite. El control de envío de muestras al laboratorio, la actualización del horómetro de la máquina y las horas del aceite usado son llevadas en formatos (Ver Apéndices F y I). Las pruebas realizadas al aceite son:

- Análisis Espectroscópico (elementos descubiertos en ppm) los elementos analizados son: Fe, Cu, Sn, Cr, Al, Ni, V, Mg, Si, Na, Ca, P, Zn, Mo.
- FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier) se determinan los niveles de: hollín, sulfatación, oxidación, nitración y contaminación por glicol y agua (unidad abs / 0,1 mm).
- Prueba de Viscosidad a 100°C (ASTM D-445) y TBN (en mg. KOH/g aceite) ASTM D-2896, D-4739.
- Los resultados de los análisis de laboratorio se publican vía internet a los 21 días de tomada la muestra. Luego estos datos se tabulan por

fecha y por máquina en un formato elaborado en una hoja de cálculo, donde automáticamente se calculan los límites condenatorios y se grafican las tendencias.

- Se aplica la técnica SACODE descrita en el numeral 2.3 y los resultados son presentados en el formato de reporte de AA.

- En el mismo formato de reporte se presenta la Línea Base del aceite nuevo utilizado en el motor.

- Para la Tasa de Cambio no se establecen límites. En este caso se considera la magnitud de las variaciones, si aumentan abruptamente es indicativo de alguna anomalía.

- Para el cálculo de los límites se consideran los datos de AA de otros 5 motores de características idénticas y que operan en las mismas condiciones que el motor analizado. Aquí se consideran los reportes de análisis desde Marzo 2008 hasta Marzo 2009 (Ver Apéndice E).

Cálculo de Límites de Precaución y Crítico.

En el Apéndice E se muestran dos ejemplos de cálculo de límites.

TABLA 3.5
LÍMITES DE PARÁMETROS DE SALUD

PARÁMETROS DE SALUD	LÍMITE ESTADÍSTICO NORMALIZADO		LÍMITE ESTADÍSTICO DE DATO ORIGINAL		LÍMITE DE FABRICANTE	
	Precaución	Crítico	Precaución	Crítico	Precaución	Crítico
MAGNESIO, Mg (ppm)	93	59				
CALCIO, Ca (ppm)	12653	4805				
FOSFORO, P (ppm)	274	194				
ZINC, Zn (ppm)	498	366				
OXIDACIÓN, O (%)			0,09	0,12		
SULFATACIÓN, S (%)			0,94	1,22		
NITRACIÓN, N (%)			0,21	0,28		
* VISCOSIDAD @100C (Cst)					11,04	17,25
NUMERO BASE TOTAL (mg KOH/g aceite)					44	27,5

* En lugar de Límite de Precaución y Crítico se aplica Límite Mínimo y Límite Máximo respectivamente.

TABLA 3.6
LÍMITES DE PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN

PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN	LÍMITE ESTADÍSTICO NORMALIZADO		LÍMITE ESTADÍSTICO DE DATO ORIGINAL		LÍMITE DE FABRICANTE	
	Precaución	Crítico	Precaución	Crítico	Precaución	Crítico
MOLIBDENO, Mo (ppm)	4	6				
SILICIO, Si (ppm)	25	32				
SODIO, Na (ppm)	522	627				
VANADIO, V (ppm)	1184	1541				
HOLLÍN, C (%)			0,08	0,10		
AGUA, H ₂ O (%)					0,25	0,30

TABLA 3.7
LÍMITES DE PARÁMETROS DE DESGASTE

PARÁMETROS DE DESGASTE	LÍMITE ESTADÍSTICO NORMALIZADO		LÍMITE ESTADÍSTICO DE DATO ORIGINAL		LÍMITE DE FABRICANTE	
	Precaución	Crítico	Precaución	Crítico	Precaución	Crítico
HIERRO, Fe (ppm)	42	51				
COBRE, Cu (ppm)	21	30				
ALUMINO, Al (ppm)	39	47				
CROMO, Cr (ppm)	2	3				
NÍQUEL, Ni (ppm)	458	585				

Las tablas que contienen los datos tabulados de los AA se encuentran en los Apéndices F, G, H.

A continuación se presentan las gráficas de tendencia para cada parámetro.

Parámetros de SALUD.

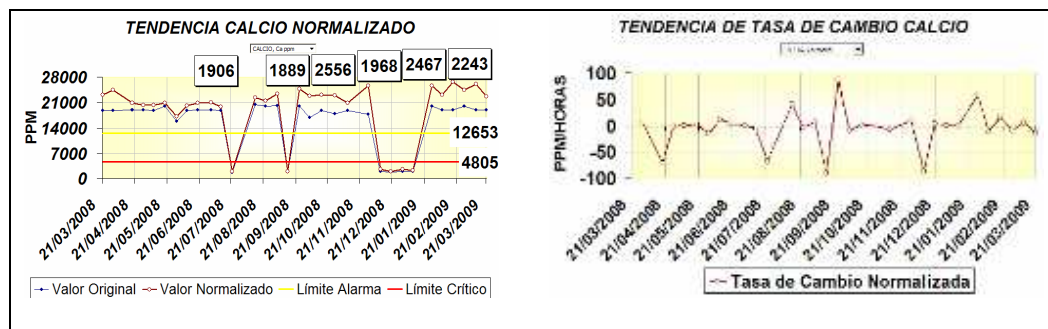


Figura 3.1 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Calcio.

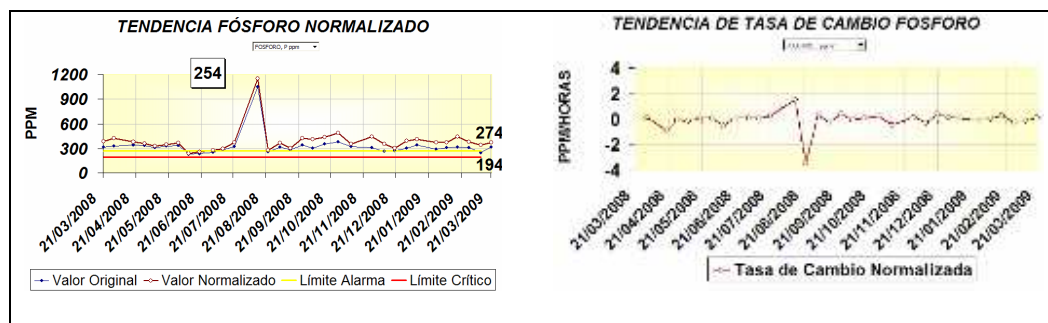


Figura 3.2 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Fósforo.

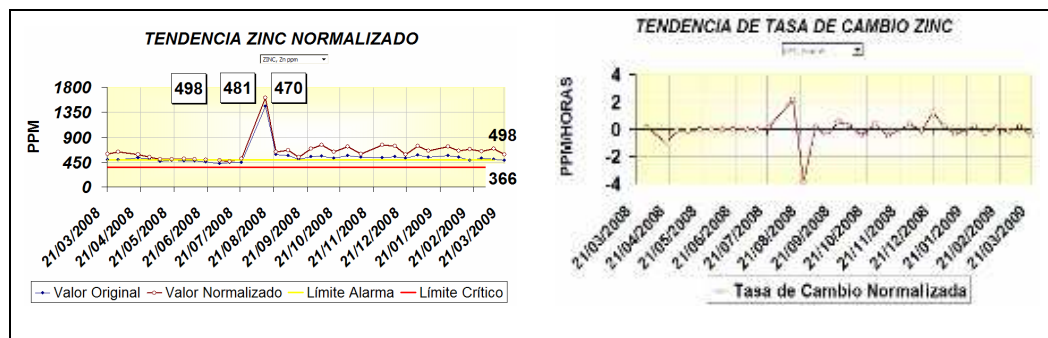


Figura 3.3 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Zinc.

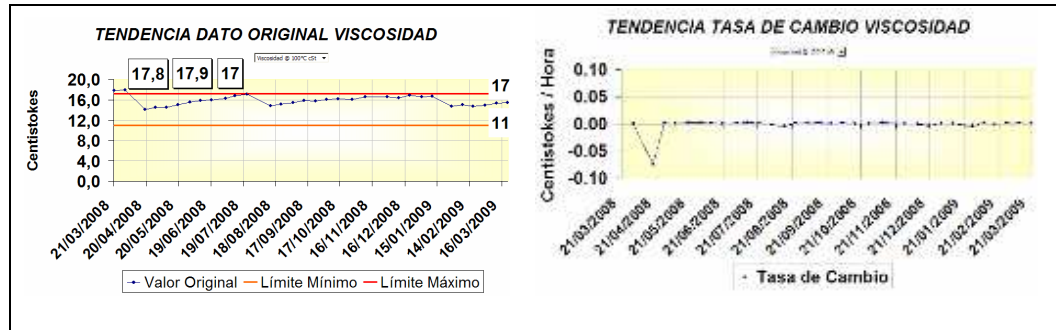


Figura 3.4 Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio de la Viscosidad.

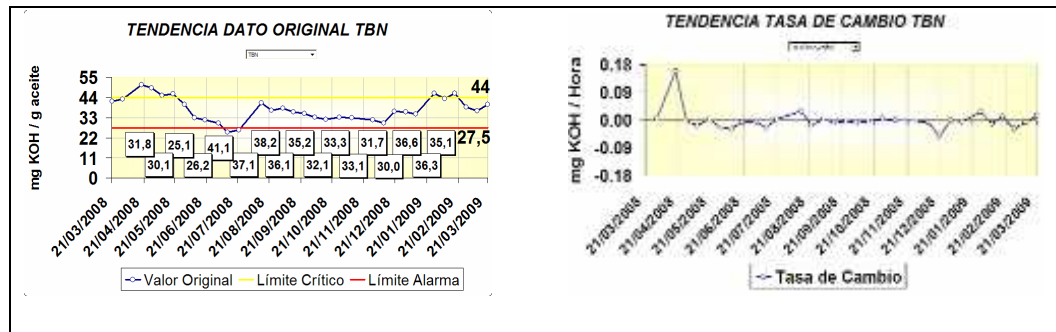


Figura 3.5 Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio del TBN.

Parámetros de CONTAMINACIÓN.

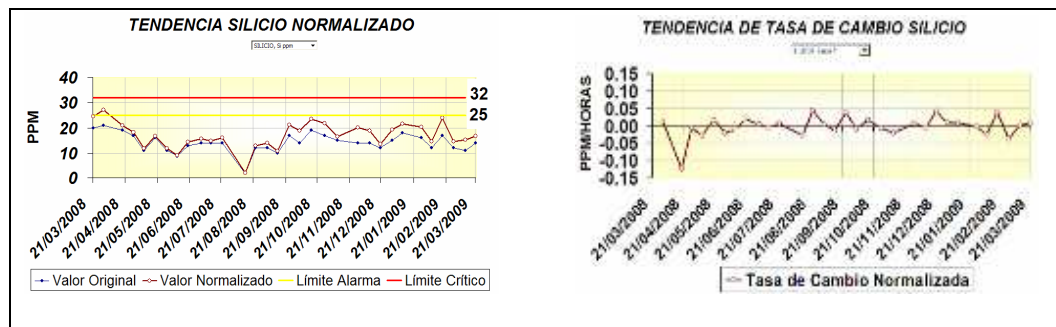


Figura 3.6 Tendencias Normalizada y Tasa de cambio del Silicio.

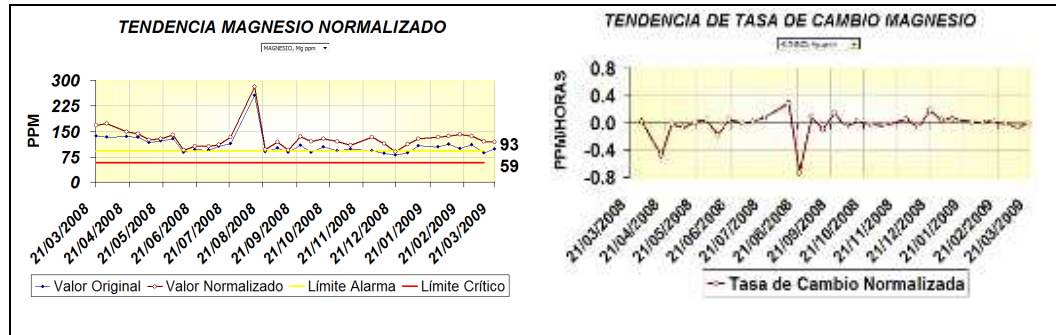


Figura 3.7 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Magnesio.

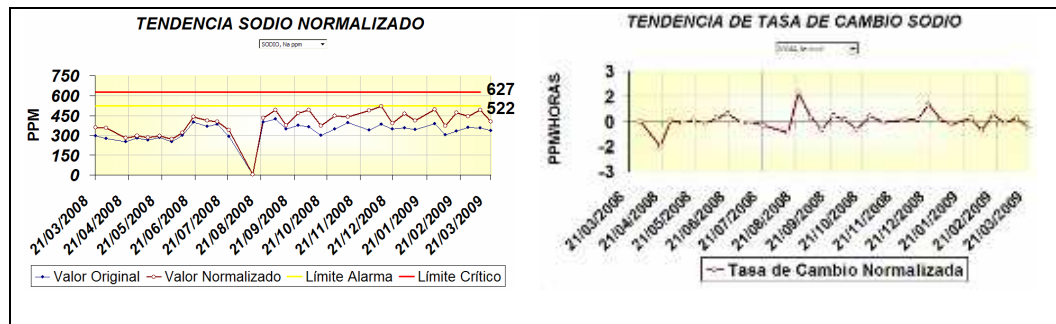


Figura 3.8 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Sodio.

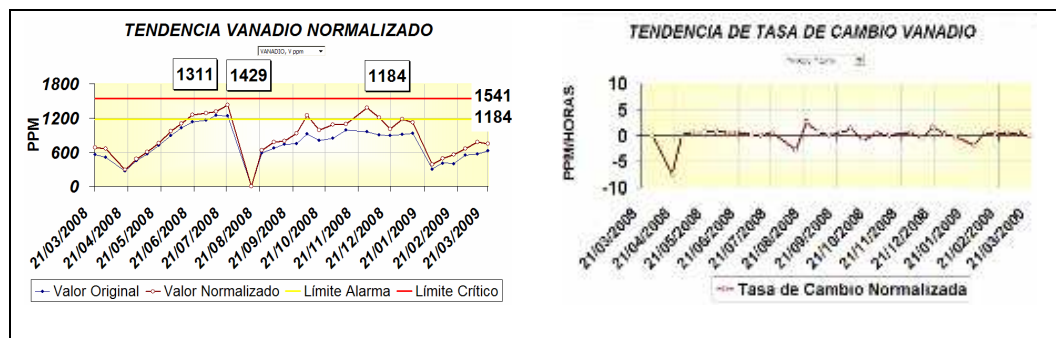


Figura 3.9 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Vanadio.

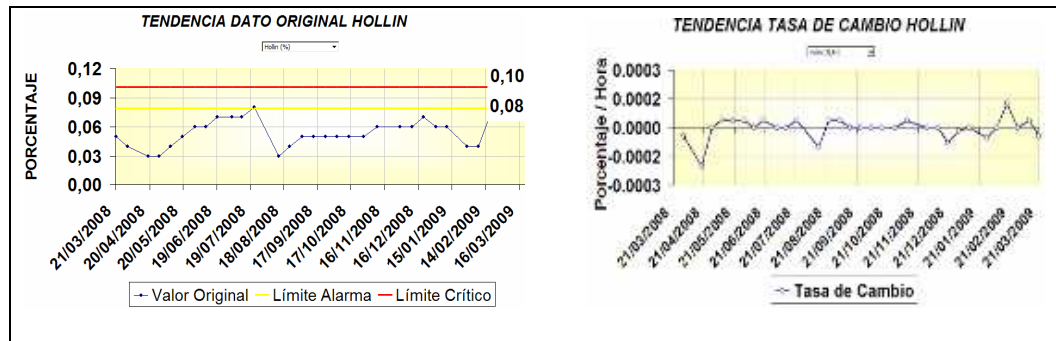


Figura 3.10 Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio del Hollín.

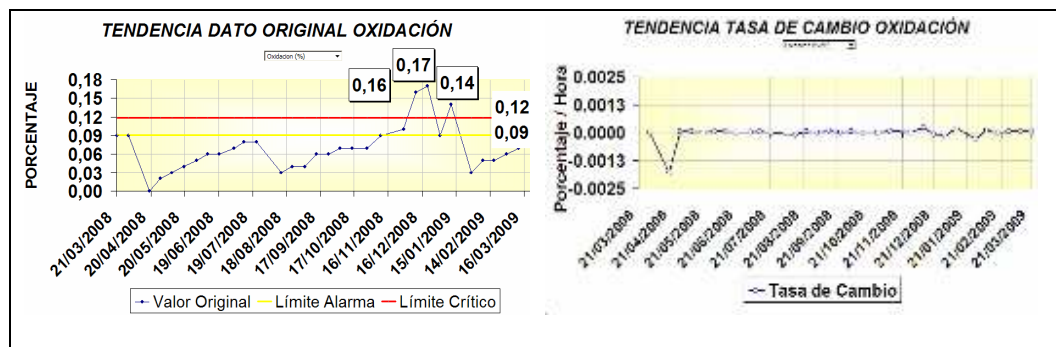


Figura 3.11 Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio de la Oxidación.

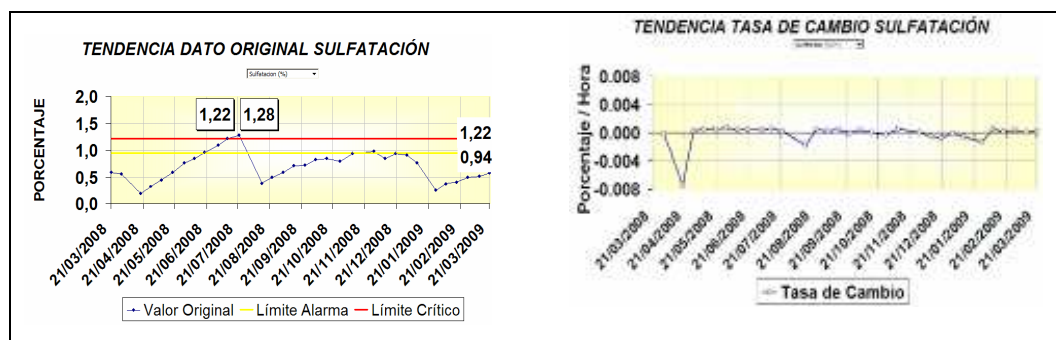


Figura 3.12 Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio de la Sulfatación.

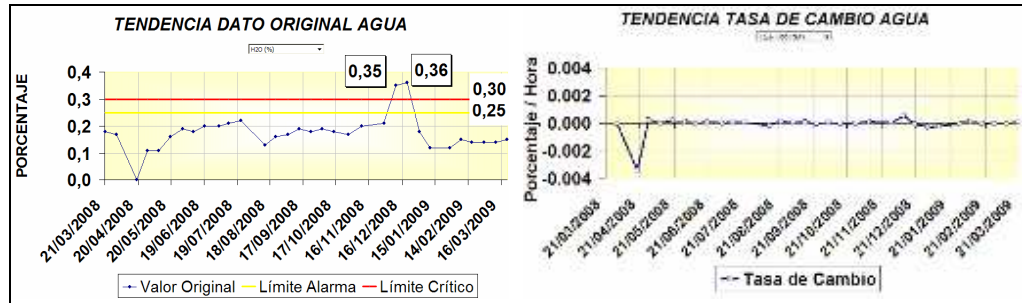


Figura 3.13 Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio del Agua.

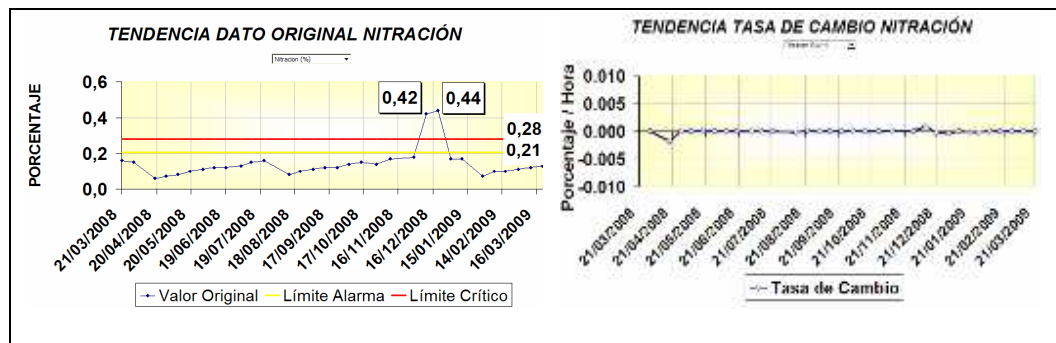


Figura 3.14 Tendencias Dato Original y Tasa de Cambio de la Nitración.

Parámetros de DESGASTE.

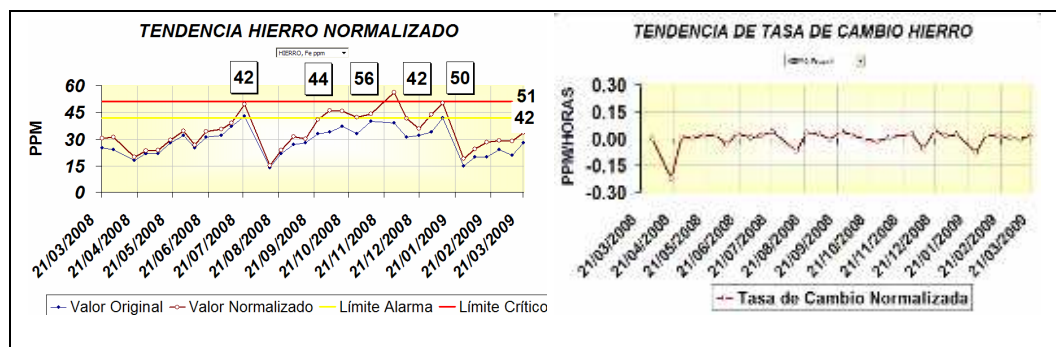


Figura 3.15 Tendencias normalizada y tasa de cambio del Hierro.

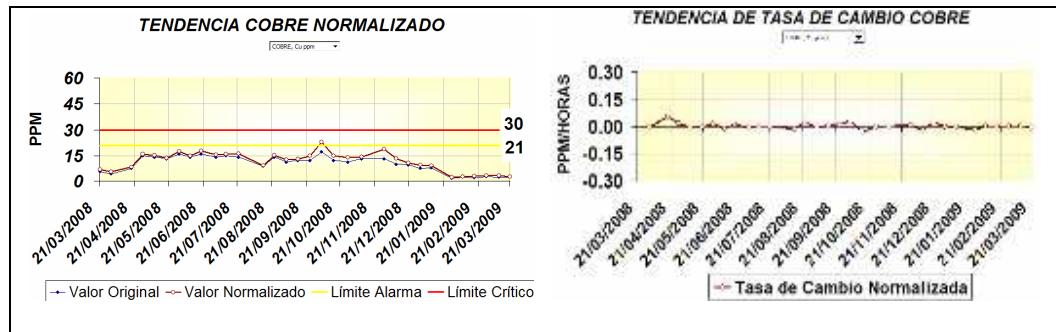


Figura 3.16 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Cobre.

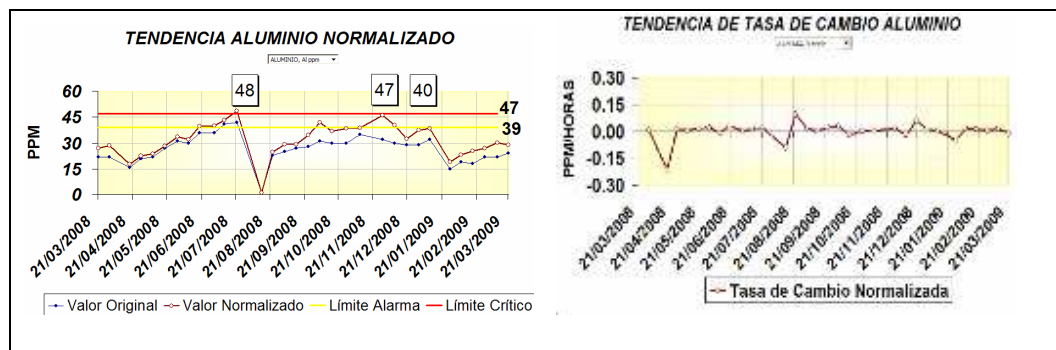


Figura 3.17 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Aluminio.

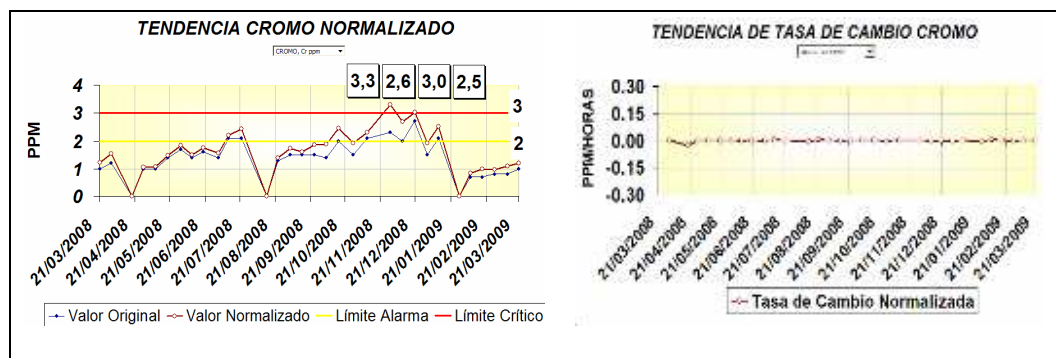


Figura 3.18 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Cromo.

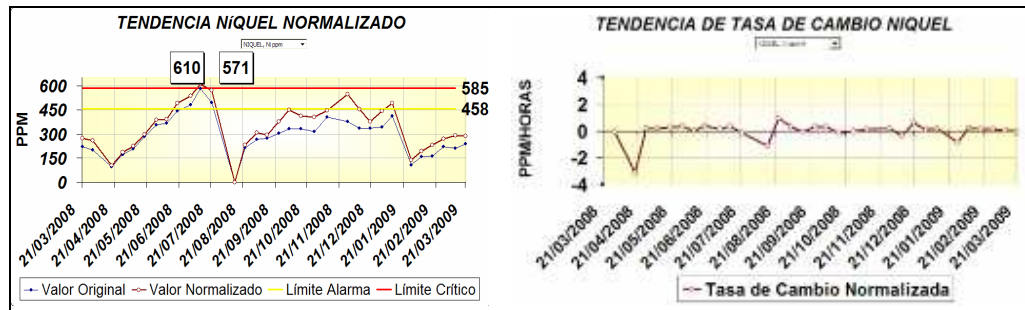


Figura 3.19 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Níquel.

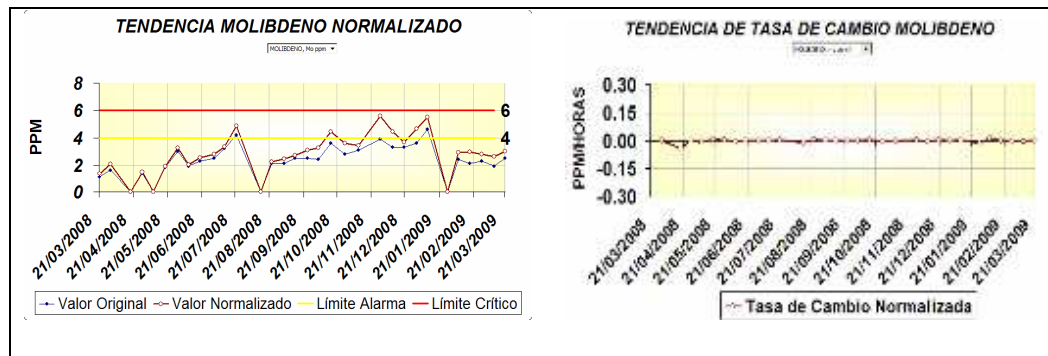


Figura 3.20 Tendencias Normalizada y Tasa de Cambio del Molibdeno.

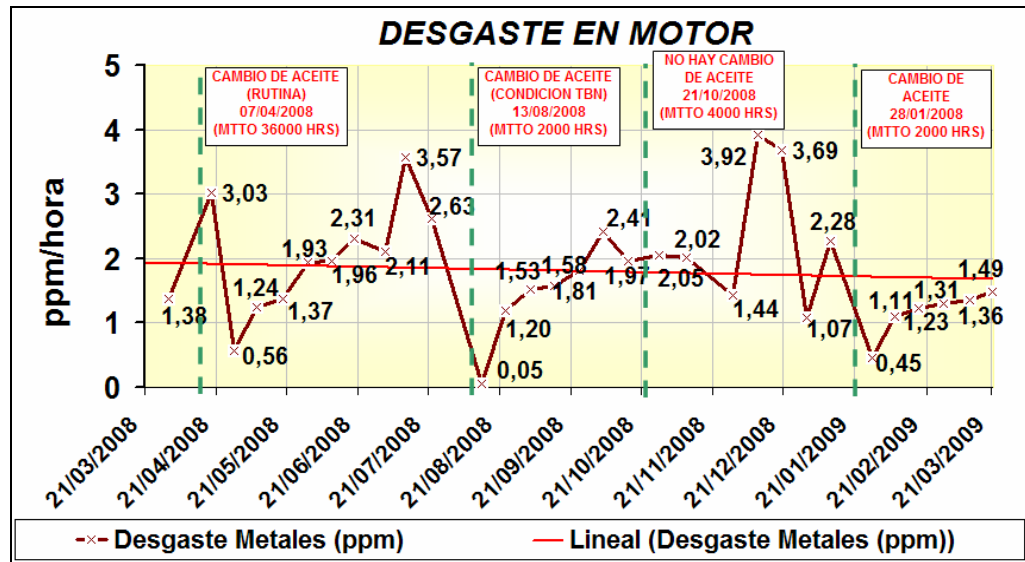


Figura 3.21 Tendencia de Velocidad de Desgaste del Motor

3.3 INTERPRETACIÓN DE TENDENCIAS DEL AA SEGÚN LA TÉCNICA SACODE.

Al inicio de este capítulo se han descrito las características del motor diesel, del combustible y del lubricante, además se han establecido los límites de alarma y crítico de los datos experimentales obtenidos. A continuación se describen las anomalías observadas en las tendencias.

En los parámetros de SALUD (Ca, P, Zn, Viscosidad, TBN):

La tendencia del TBN presentó 17 pivotes es decir que superó el límite crítico en 17 ocasiones (Ver fig. 3.5). La tendencia del Ca presentó 6

pivotes (Ver fig. 3.1). La tendencia de la Viscosidad presentó 3 pivotes (Ver fig. 3.4). La tendencia del Fósforo presentó 1 pivote (Ver fig. 3.2) y la tendencia del Zn (Ver fig. 3.3) presentó 3 pivotes.

Se observa que este motor operó en varias ocasiones con niveles bajos de TBN, lo que debió producir corrosión acídica y en consecuencia el incremento de la tasa de desgaste del motor, reduciendo la vida útil de los componentes. El TBN se disminuye principalmente por el alto contenido de azufre, vanadio y sodio del combustible y/o por el sobrecalentamiento del motor.

El Ca compone el paquete de aditivos y es dependiente del TBN, mientras más alto sea su valor, mayor será el contenido de Ca. Su bajo valor indica que está fallando la lubricación en los cilindros lo que provoca mayor desgaste en el grupo cilindro-pistón.

Se observa un incremento gradual de la viscosidad sobrepasando el límite crítico. Esto como consecuencia de la oxidación por aumento de temperatura del aceite y la polimerización de los compuestos del aceite lubricante. Esto incrementa el contenido de sólidos en el aceite formando depósitos en el motor. La disminución de los aditivos antidesgaste como el fósforo y el zinc desprotegen al motor aumentando el desgaste.

En los parámetros de CONTAMINACIÓN (Si, Na, Mg, Ni, V, Hollín, Agua, Sulfatación, Nitración, Oxidación):

Las tendencias del Mg (Ver fig. 3.7), Si (Ver fig. 3.6) y del Na (Ver fig. 3.8) no presentaron pivotes. La tendencia del Vanadio (Ver fig. 3.9) y la Oxidación (Ver fig. 3.11) presentaron 3 pivotes. Las tendencias de la Sulfatación (Ver fig. 3.12), Agua (Ver fig. 3.13) y la Nitración (Ver fig. 3.14) presentaron 2 pivotes. Las tendencia del Hollín no presentó pivotes (Ver fig. 3.10).

Se observa constantes variaciones en la Tasa de Cambio del Silicio en el aceite a pesar de no tener pivotes, lo que indica que en el sistema de lubricación está ingresando polvo del medio ambiente, y a su vez se está degradando el aditivo antiespumante del aceite. La presencia de Na en el aceite está vinculada a la contaminación con combustible HFO, pero también indica que existen fugas de agua del sistema de enfriamiento al sistema de lubricación ya que los aditivos del agua de enfriamiento llevan productos formulados con Na. La contaminación con agua en el sistema se corrobora con la presencia del Mg. La contaminación con combustible se corrobora con la presencia de V en el sistema de lubricación.

En los parámetros de DESGASTE (Fe, Cu, Al, Cr, Mo):

La tendencia del Fe presentó 5 pivotes. La tendencia del Cr (Ver fig. 3.18) presentó 4 pivotes y la tendencia del Al (Ver fig. 3.17) presentó 3 pivotes. La tendencia de Mo no presentó pivotes (Ver fig. 3.20). La tendencia del Ni presentó 2 pivotes (Ver fig. 3.19). La tendencia del Cu no presentó anomalías (Ver fig. 3.16). La presencia de Fe en el aceite resulta principalmente del desgaste de pistones y camisas del motor. El contenido de Al indica el desgaste de los cojinetes y pistones. Además de la contaminación por contenido de combustible. El contenido de Ni, Cr y Mo en el aceite indica el acelerado desgaste que están sufriendo los anillos de compresión de los pistones.

En la tendencia del total de los elementos de desgaste del motor se observa un rango entre 0,05 ppm/h y 3,92 ppm/h, el cual debería reducirse ya que son altos niveles de desgaste, en 250 horas. A pesar de ello la pendiente de la tendencia es ligeramente negativa (Ver fig. 3.21).

3.4 PRESENTACIÓN DE TENDENCIAS DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES.

La metodología consiste en copiar y registrar las pantallas con los parámetros operacionales de la computadora central de control, cada 250 horas con el muestreo de aceite. Los datos considerados para esta tesis son a partir del 30 de Agosto de 2008 hasta el 30 de Marzo de 2009. Se aplica la metodología desarrollada en el numeral 2.4.3.

TABLA 3.8

LÍMITES DE PARÁMETROS OPERACIONALES ESTABLECIDOS.

PARÁMETROS	UNIDAD	SISTEMA	VALOR OBJETIVO
POTENCIA GENERADA	MW	Motor	6,1
PRESIÓN CÁRTER	Milibar	Lubricación	2
CONSUMO DE ACEITE	Litros/Hora	Lubricación	3,5 – 4,5
TEMPERATURA COJINETES	°C	Lubricación	95-99
VELOCIDADES TURBOS	RPM	Gases de Escape	21000
TEMPERATURAS TURBOS	°C	Gases de Escape	320
TEMPERATURA DE GASES DE ESCAPE	°C	Gases de Escape	444

Tendencias.

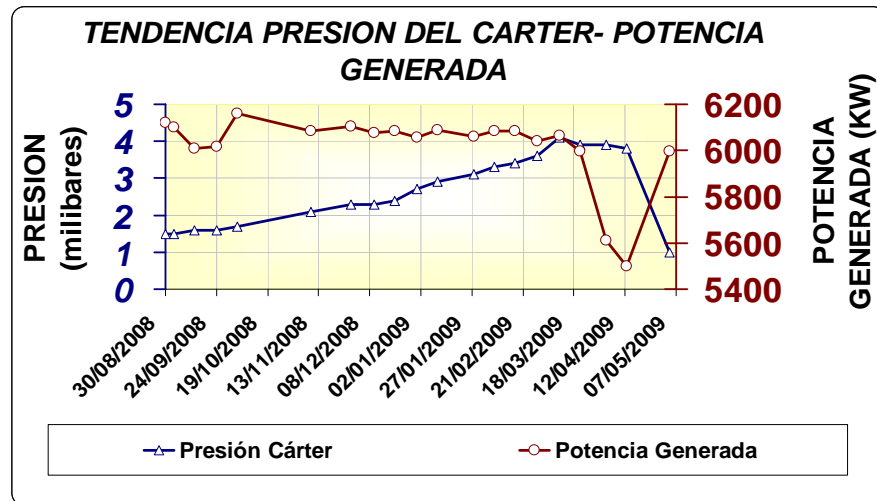


Figura 3.22 Tendencia de la Presión del Cáster y la Potencia Activa.

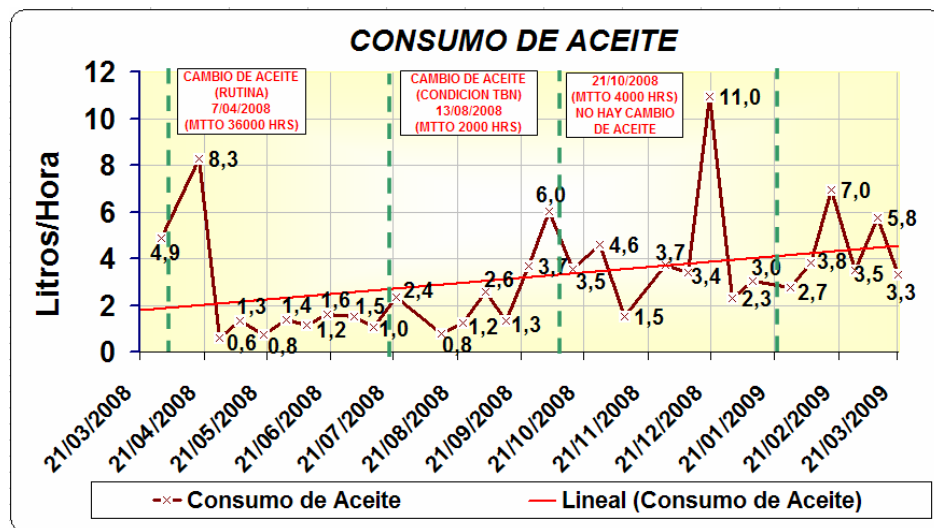


Figura 3.23 Tendencia del Consumo de Aceite del Motor.

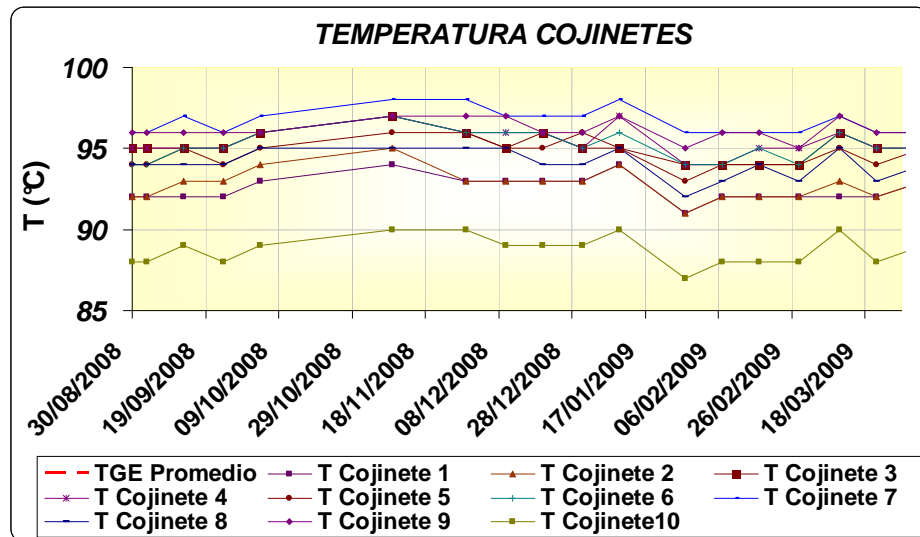


Figura 3.24 Tendencia de Temperatura en Cojinetes.

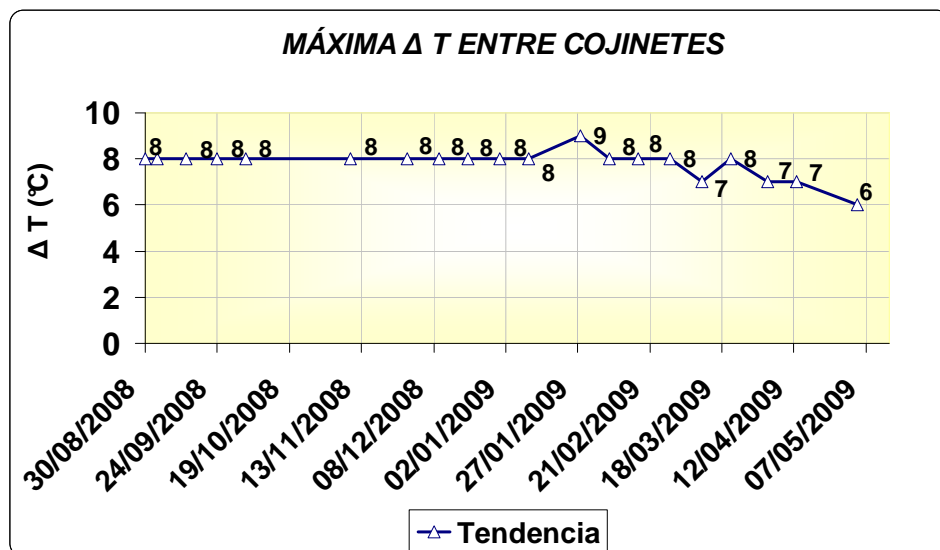


Figura 3.25 Tendencia de la Máxima Diferencia de Temperaturas entre Cojinetes.

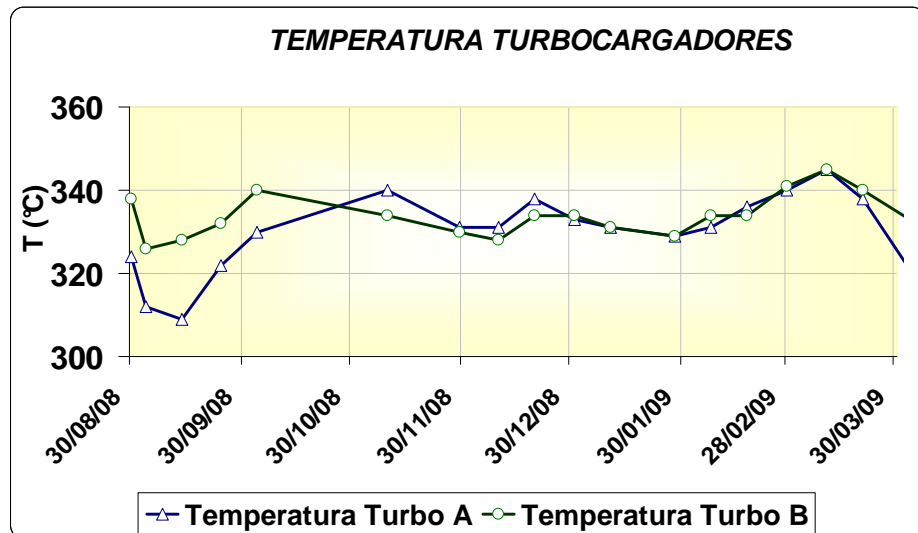


Figura 3.26 Tendencias de Temperatura de los Turbocargadores.

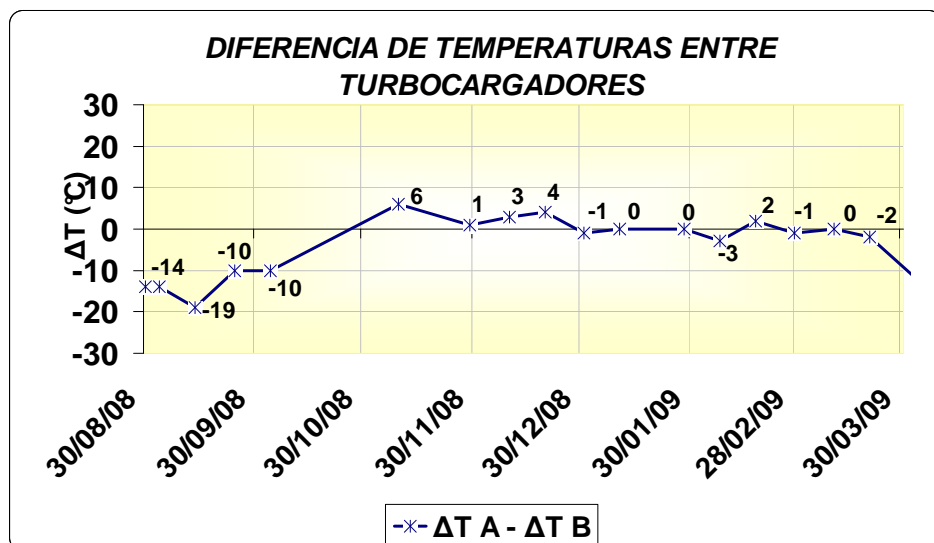


Figura 3.27 Tendencia de Diferencia de Temperatura entre Turbocargadores.

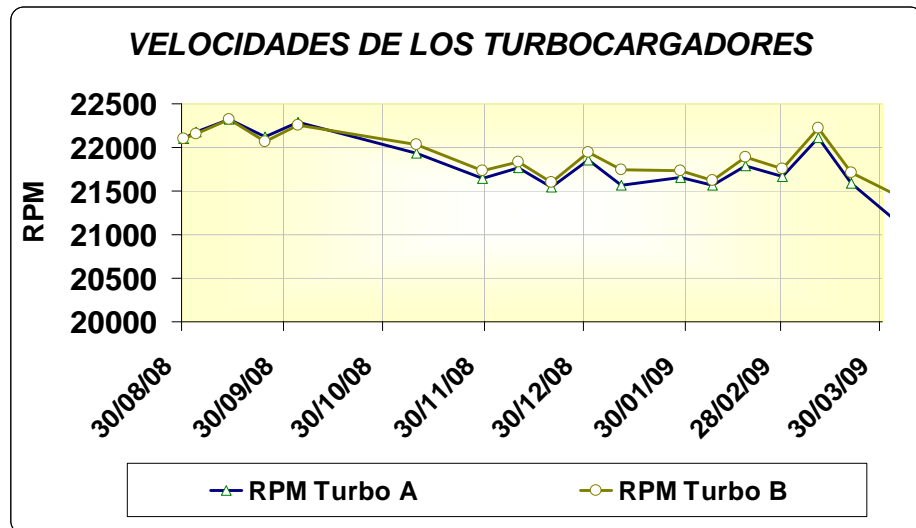


Figura 3.28 Tendencia de Velocidades en Turbocargadores.

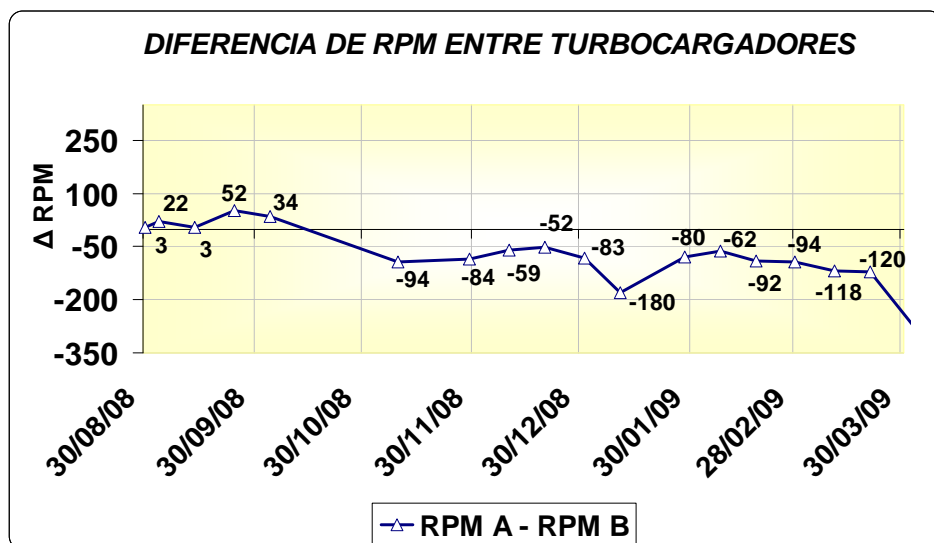


Figura 3.29 Tendencia de la Diferencia de RPM entre Turbocargadores.

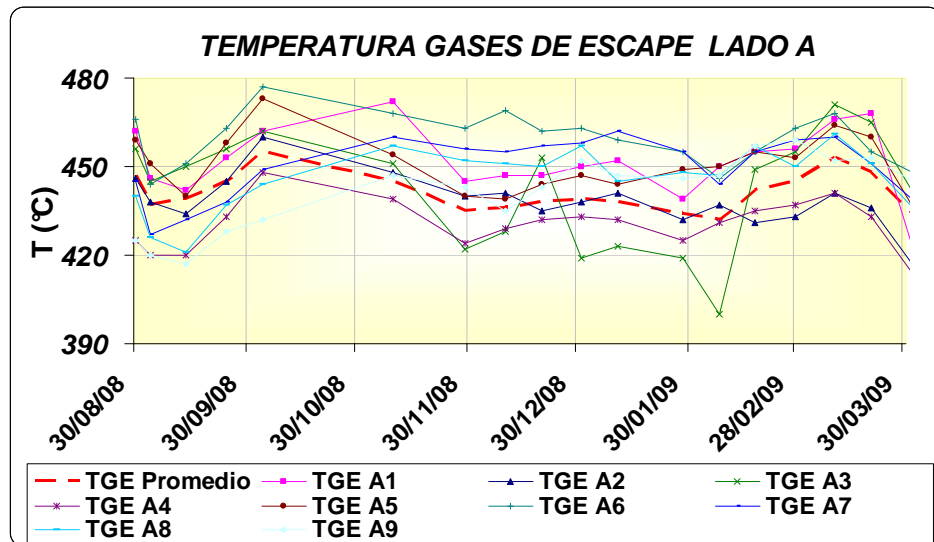


Figura 3.30 Tendencias de las TGE Lado A.

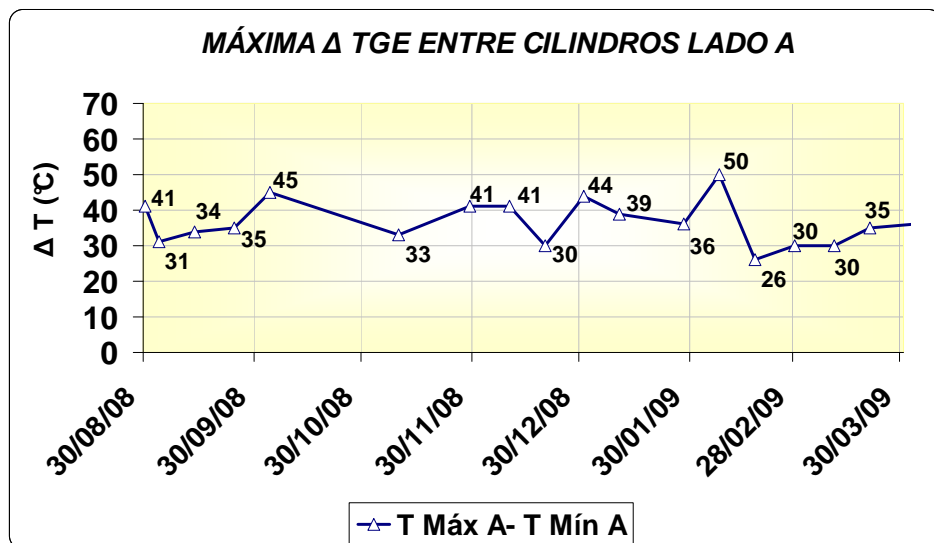


Figura 3.31 Tendencia de la Máxima Variación de TGE entre Cilindros A.

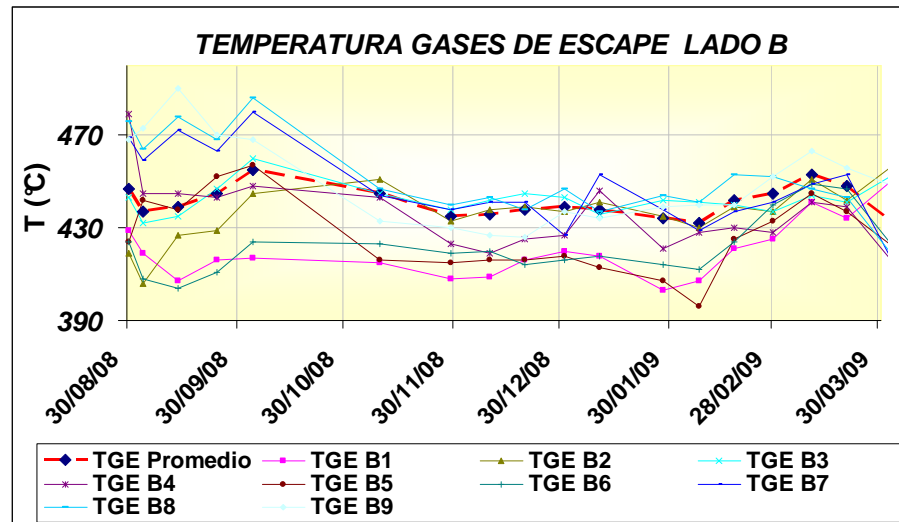


Figura 3.32 Tendencias de las TGE Lado B.

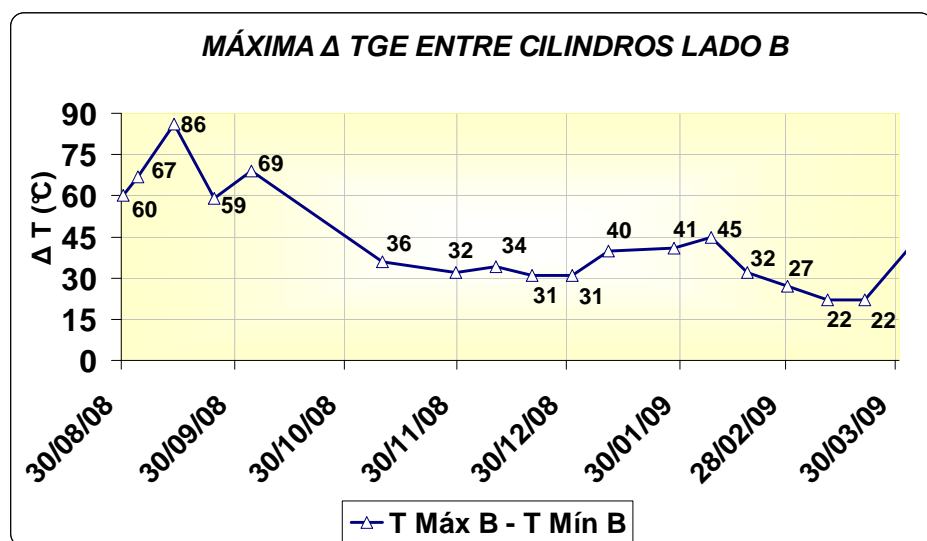


Figura 3.33 Tendencia de la Máxima Variación de TGE entre Cilindros B.

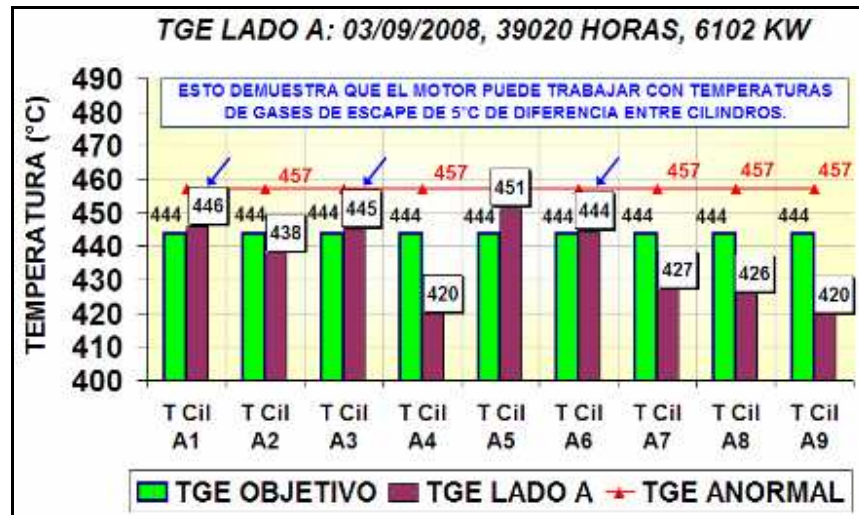


Figura 3.34 Temperaturas de Gases de Escape Lado A del 03/09/2009.

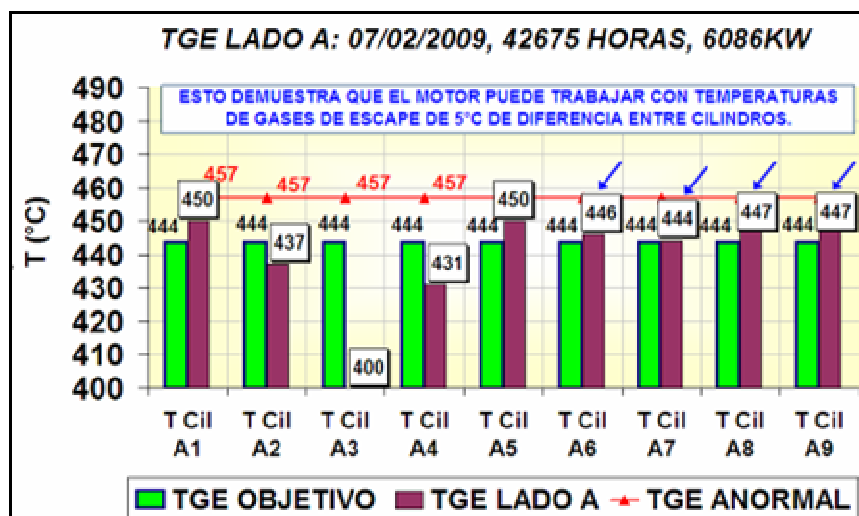


Figura 3.35 Temperaturas de Gases de Escape Lado A del 07/02/2009.

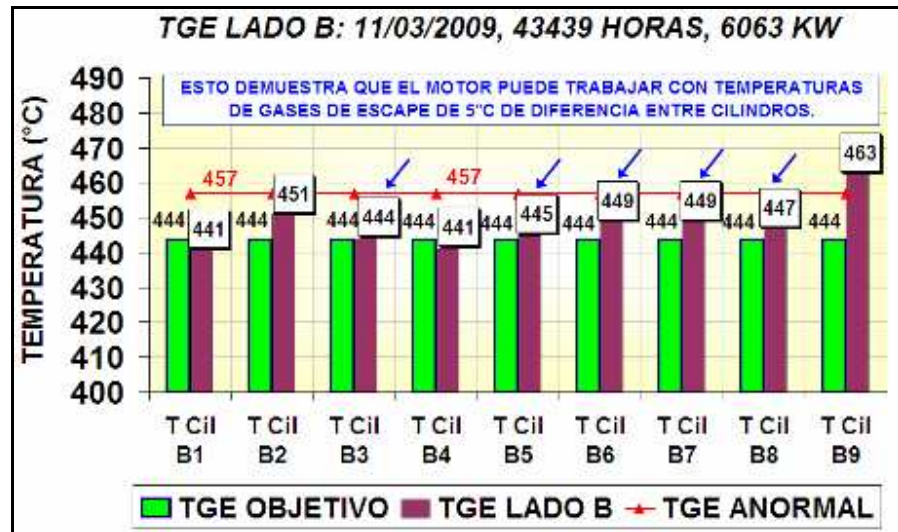


Figura 3.36 Temperaturas de Gases de Escape Lado B del 11/03/2009.

3.5 INTERPRETACIÓN DE TENDENCIAS DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES.

- En la gráfica conjunta de Potencia Activa y Presión del Cáster se observa que el motor generó 6100 KW de energía eléctrica en forma estable durante 8 meses (Agosto 2008 hasta Marzo 2009). En este tiempo la presión del cárter aumentó de 1.5 mbar a 4 mbar, luego de esto la potencia decayó en 400 KW (Ver fig. 3.22).
- El consumo de aceite en el motor ha sido alto y muy variable. El consumo normal de aceite debería estar entre 3,5 - 4,5 lts/hr aceite según las especificaciones del fabricante (Ver fig. 3.23).

TABLA 3.9

CONSUMO DE ACEITE DESDE MARZO 2008 HASTA MARZO 2009.

	Litros	Galones	Costo por Galón	TOTAL
Compensación de Aceite	24540	6458	\$ 14	\$ 90.412
Cambios de aceite por Condición (2 veces)	8040	2116	\$ 14	\$ 29.624
Cambios de aceite por Mantenimiento (2 veces)	8040	2116	\$ 14	\$ 29.624
GASTO TOTAL POR ACEITE AL AÑO				\$ 149.660

- Los cojinetes de bancada del cigüeñal han trabajado a temperatura estable sin presentar variaciones considerables (Ver fig. 3.24).
- Los gases de escape de los turbocargadores han trabajado a diferentes temperaturas en periodos distintos llegando a los 19°C de diferencia entre ellos. Entre Noviembre del 2008 y Marzo del 2009 se registraron los diferenciales de temperatura más bajos (de 0°C a 6° C). (Ver fig. 3.26 y Ver fig. 3.27)
- Asimismo entre ambos turbocargadores se han presentado diferenciales de 3 a 287 RPM. Presentando mayores diferenciales entre Noviembre 2008 y Marzo 2009 (Ver fig. 3.29).

- Se evidencia considerable inestabilidad y excesiva diferencia de temperaturas en los gases de escape entre los cilindros de ambos lados del motor (A y B). Las diferencias de temperatura máxima y mínima entre cilindros oscilan entre los 65°C y 26°C para el lado A, y entre 86°C y 22°C para el lado B (Ver fig. 3.30, fig. 3.31, fig. 3.32 y fig. 3.33).

- En las últimas tres gráficas se demuestra que para ambos lados del motor, los cilindros pueden operar a una temperatura promedio estable de $444 \pm 5^\circ\text{C}$ entre cilindros. Por lo que se demuestra que el motor opera en desbalance térmico. Este problema causa el gripado de las camisas y de los pistones por las altas temperaturas de los gases de escape. Si existe paso de gases de combustión al cárter por desgaste de anillos de pistones y camisas, entonces esto causa la oxidación del aceite por alta temperatura. Este problema se vincula con la mala dosificación de combustible del sistema de inyección a los cilindros del motor (Ver fig.3.34, fig.3.35 y fig.3.36).

CAPÍTULO 4

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN MOTOR Y LUBRICANTE

A continuación se muestran los formatos con los resultados del último AA, último monitoreo de los datos operacionales y además se mencionan las anomalías presentadas durante el tiempo de monitoreo.

**TABLA 4.1
 REPORTE DE AA DEL MOTOR DIESEL.**

REPORTE DE ANÁLISIS DE ACEITE												
MAQUINA: MOTOR DIESEL		PUNTO DE MUESTREO: Antes del Filtro Fino				LITROS DE ACEITE COMPENSADOS: 800			FECHA DE MUESTREO:			
MARCA/MODELO: WARTSILA 18V 32LN		HORÓMETRO MÁQUINA: 43668				FRECUENCIA DE MUESTREO: 250 Horas			Marzo 21 de 2009			
LUBRICANTE: Aurelia XL 4055		CAPACIDAD CÁRTER: 4020 Litros				HORAS ACEITE: 487			EMISION DE RESULTADO:			
DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS: LOS ELEMENTOS ANALIZADOS SON: Fe, Cu, Pb, Sn, Cr, Al, Ni, Ti, Ag, V, Mg, Si, B, Na, Ba, Ca, P, Zn, Mo por (AES) ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO (elementos descubiertos en ppm), Análisis FTIR, Prueba de Viscosidad a 100°C (ASTM D-445), TBN (mg KOH /g aceite) ASTM D-2896, D-4739										Abril 4 de 2009		
SACODE	PARÁMETROS ANALIZADOS	Línea Base	Dato Original		Normalizado		Tasa de Cambio		Límites		CÓDIGO	DIAGNÓSTICO
			Muestra Anterior	Muestra Actual	Muestra Anterior	Muestra Actual	Muestra Anterior	Muestra Actual	Precaución	Crítico		
			11/03/2009	21/03/2009	11/03/2009	21/03/2009	11/03/2009	21/03/2009				
D	HIERRO (ppm)	8.5	21	28	29	34	-0.002	0.019	42	51		El TBN del aceite usado aumentó por refrescamiento del cárter con aceite nuevo, sin embargo se mantiene en el L. Precaución. La tendencia del hierro aumentó Los aditivos antidesgaste y La reserva alcalina decaen rápidamente pero mantienen un nivel aceptable. Contaminación con Hollín verificar sistema de inyección Aumento de ppm de Silicio. Evitar contaminación con polvo ambiental. Verificar contaminación con agua y combustible. El desgaste interno del motor debe disminuirse hasta tener una mayor tendencia negativa.
D	COBRE (ppm)	0	2	2	3	3	0	-0.002	21	30		
D	ALUMINO (ppm)	8.2	22	24	30	29	0.013	-0.006	39	47		
D	CROMO (ppm)	0	1	1	1	1	0	0	2	3		
D	NIQUEL (ppm)	0	213	241	293	289	0.083	-0.019	458	585		
D	MOLIBDENO (ppm)	0	2	3	3	3	-0.001	0.002	4	6		
C	SILICIO (ppm)	28	11	14	15	17	0.002	0.007	25	32		
S	MAGNESIO (ppm)	134	88	99	121	119	-0.055	-0.011	93	59		
C	SODIO (ppm)	347	358	338	493	405	0.19	0.36	522	627		
S	CALCIO (ppm)	20031	18932	18896	26080	22656	5.963	-14.269	12653	4805		
S	FOSFORO (ppm)	306	249	315	343	378	-0.132	0.144	274	194		
S	ZINC (ppm)	523	507	489	698	586	0.199	-0.467	498	366		
C	VANADIO (ppm)	0	570	628	785	753	0.435	-0.134	1184	1541		
C	HOLLÍN (%)	0	0,08	0,08	-----	-----	0	0	0.08	0.1		
S	OXIDACIÓN (%)	0	0,07	0,08	-----	-----	0	0	0.09	0.12		
S	SULFATACIÓN (%)	0	0,52	0,58	-----	-----	0	0	0.93	1.20		
C	AGUA (%)	0	0,14	0,15	-----	-----	0	0	0.23	0.3		
S	NITRACIÓN (%)	0	0,12	0,13	-----	-----	0	0	0.21	0.29		
S	VISCOSIDAD @100C (cSt)	13.83	15,3	15,4	-----	-----	0	0.001	<11.04	>17.25		
S	TBN (mg KOH/g)	59.8	37	40	-----	-----	-0.008	0.014	44	27.5		

TABLA 4.2
REPORTE CBM DEL MOTOR DIESEL.

REPORTE DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN					
MÁQUINA:	Motor	NUM. CILINDROS:	18	CILINDRADA:	507dm ³
MARCA/MODELO:	18V 32LN	DIÁMETROS CILINDROS:	320 mm	POTENCIA SALIDA:	6600 KW
LUBRICANTE:	Aurelia XL4055	CARRERA:	350 mm	TURBOCARGADORES?	2
CONFIGURACIÓN:	en V	VELOCIDAD DECLARADA:	720 RPM	COMBUSTIBLE:	CRUDO
RELACIÓN COMPRESIÓN:	13.8 : 1	PERIODO MONITOREO:	Desde: 30/08/2008. Hasta: 4/05/ 2009.		
PARÁMETROS DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE					
<p>Se evidencia desequilibrio térmico en las cámaras de combustión por las exageradas diferencias de temperatura de los gases de escape. El Lado A presenta diferencias de TGE entre cilindros en el rango de 65 °C y 26 °C, mientras el rango del Lado B está entre 86°C y 22 °C. Las excesivas TGE producen el gripado de las camisas y de los pistones del motor. Este problema se debe a la descalibración del sistema de inyección. Se recomienda realizar un análisis tribológico más profundo al Motor Diesel por parte de especialistas en la rama.</p>					
PARÁMETROS DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN					
<p>Se evidencia alto consumo de aceite (4,5 lts/hora) con una tendencia de pendiente positiva es decir que sigue en aumento. Aumento acelerado de la presión del cárter (blow by) (1,5 mbar - 4,1 mbar en menos de 4000 horas) por desgaste acelerado de las camisas y los anillos de presión. Los cojinetes de la bancada y del cigüeñal trabajan a temperaturas adecuadas y estables.</p>					
PARÁMETROS DE LOS TURBOCOMPRESORES					
<p>La diferencia de RPM entre turbocompresores llega hasta 287. La diferencia de temperaturas de gases de escape llega hasta 19 °C, en el mes de septiembre y es muy variable en el tiempo. Lo ideal es que estas diferencias sean 0 o la mínima posible. Esto da a entrever que hay excesiva acumulación de carbón en los alabes de los rodets de los turbocargadores, producto de las anomalías presentadas en el sistema de combustible por su alto contenido de azufre y carbón.</p>					

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES

1. Se ha cumplido el objetivo de implantar el AA a un MCI de Ciclo Diesel como una técnica del MPd. Además de establecer el desempeño del motor y del aceite lubricante durante el tiempo de monitoreo. La metodología y los límites establecidos del análisis son aplicables para motores diesel de las mismas características y condiciones de operación.
2. Se demuestra que es justificable la implantación del MPd tribológico en una planta termoeléctrica, por los beneficios que implica la detección temprana de anomalías. La supervisión de la condición eficaz del AA permite realizar cambios de aceite oportunos y la aplicación del CBM en el motor, permite determinar lo que está sucediendo dentro de la unidad sin necesidad de desarmarla.
3. El aceite analizado mostró que sus aditivos decaen rápidamente evidenciándose esto en la disminución del Calcio y del TBN. Esto indica una disminución de las propiedades detergente-dispersante y de antidesgaste. Esto se observa en el aumento de la velocidad de desgaste del motor. Las considerables compensaciones de aceite nuevo debido al

- alto consumo, de cierta manera han ayudado a estabilizar el TBN aunque no al nivel más óptimo.
4. El Motor Diesel analizado se encuentra trabajando en desbalance térmico por la exagerada diferencia de temperaturas entre cilindros y por las altas temperaturas. Se debe mantener una máxima diferencia de TGE entre cilindros de $\pm 5^{\circ}\text{C}$, para mantener el motor en equilibrio térmico y evitar las diluciones y la sobrecarga en los cojinetes de biela y cojinetes de punto de apoyo de cigüeñal.
 5. Si se conoce que existe desbalance térmico entre cilindros por altas temperaturas de los gases de escape y que el motor opera con una mala calidad de combustible según el análisis de combustible (alto contenido de Azufre, Vanadio y Sodio). Entonces el aceite lubricante está perdiendo su propiedad detergente-dispersante por alta temperatura lo que en consecuencia produce la acumulación de hollín en las ranuras de los aros, produciendo una mezcla abrasiva que desgasta aceleradamente los aros de compresión de los pistones y de las camisas.

6. Otra consecuencia del desgaste de los aros de compresión y las camisas, es la fuga de los gases de combustión hacia el cárter del motor (blow by). Esto se evidencia en el rápido y progresivo aumento de la tendencia de la presión del cárter.

7. El costo por aceite para motor durante el año de monitoreo ascendió a \$ 149.660, de los cuales \$ 90.412 se invirtieron en las compensaciones de aceite nuevo, que representa el **60%** del costo total. Lo que indica que el motor consumió exageradas cantidades de aceite y está ocasionando pérdidas económicas considerables. (Ver Tabla 3.9 y Fig. 3.23)

RECOMENDACIONES

1. Hay factores que influyen en los resultados del AA como el tiempo de demora entre la toma de la muestra y su entrega para el análisis. Se debe procurar la entrega inmediata de la muestra y de los resultados para no perder el objetivo central que es prevenir las fallas y averías. Entre tres y cinco días máximo, es un tiempo adecuado para entregar los resultados del AA.
2. Es recomendable adicionar al Análisis de Aceite la prueba ASTM D-189 de Carbón Conradson ya que el análisis FTIR es muy impreciso. No se evidencia en los resultados las novedades registradas en los mantenimientos como la deposición de carbón, la contaminación con combustible y agua. Además deben incluirse las pruebas ASTM D-92 de Punto de Inflamación y ASTM D-893 de Insolubles en pentano y benceno para obtener resultados más confiables en el Análisis de Aceite.
3. Para la interpretación de resultados en esta tesis, se utilizó el programa Microsoft Office Excel 2003, el cual es una herramienta que facilitó una presentación sencilla y ordenada de las tendencias. Sin embargo por la cantidad de datos recolectados es recomendable diseñar una base de datos que al ingresar la información almacene, normalice, calcule límites

condenatorios, grafique tendencias, identifique pivotes y que presente el formato con la información más relevante para facilitar el diagnóstico.

4. Se recomienda cambiar la estrategia de operación del motor haciendo énfasis en: la calibración de las bombas de inyección en los mantenimientos, la regulación periódica de la inyección de combustible por cilindro, mejoramiento de la calidad del combustible mezclando un porcentaje de diesel con crudo o implantar un tratamiento para reducir los elementos contaminantes y la operación del motor a las RPM técnico-económica especificadas por el fabricante. Este motor requiere de un análisis tribológico más profundo por parte de especialistas en la materia.

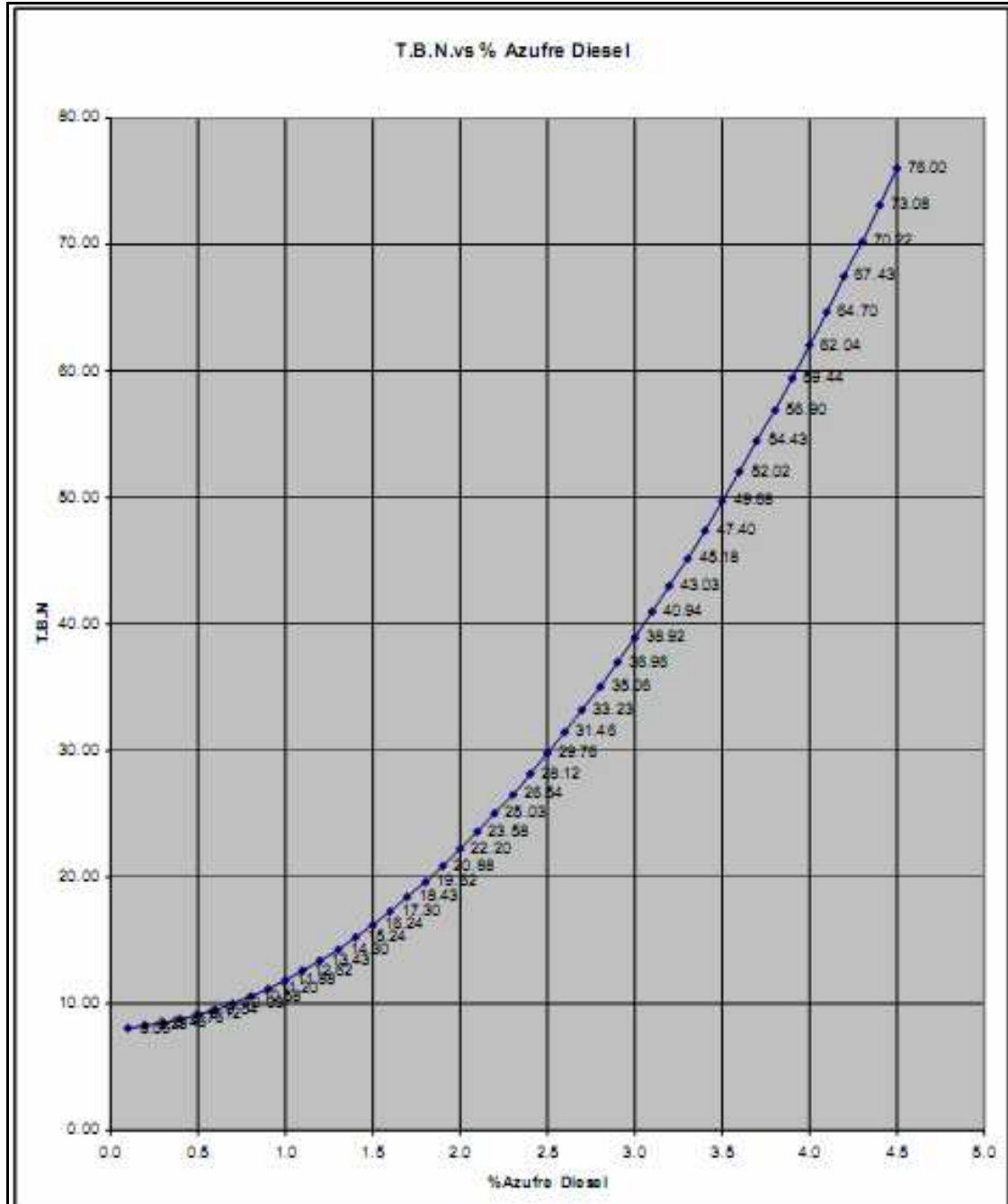
APÉNDICES

INDICE DE APÉNDICES

APÉNDICE A	RELACIÓN TBN VS PORCENTAJE DE AZUFRE.
APÉNDICE B	LÍMITES CONDENATORIOS PARA EL ACEITE MOTOR.
APÉNDICE C	LÍMITES DE LOS ELEMENTOS EN LOS ACEITES USADOS RECOMENDADOS POR EL FABRICANTE.
APÉNDICE D	TIPOS DE PELÍCULAS LUBRICANTES.
APÉNDICE E	EJEMPLOS DE CÁLCULO DE LÍMITES.
APÉNDICE F	TABLA DE RESULTADOS DATOS ORIGINALES.
APÉNDICE G	TABLA DE RESULTADOS DATOS NORMALIZADOS.
APÉNDICE H	TABLA DE RESULTADOS TASAS DE CAMBIO.
APÉNDICE I	FORMATO DE CONTROL DE MUESTREO PARA EL ANÁLISIS DE ACEITE.
APÉNDICE J	TABLA DE RESULTADOS DE DATOS OPERACIONALES.
APÉNDICE K	FALLAS DE LUBRICACIÓN Y OPERACIÓN EN EL MOTOR.

APÉNDICE A

RELACIÓN TBN VS PORCENTAJE DE AZUFRE.



APÉNDICE B

LÍMITES CONDENATORIOS PARA EL ACEITE MOTOR

Propiedad	Impacto en el funcionamiento del motor	Limite para condenar	Nivel recomendado para el desempeño optimo
Numero Base (BN) (mg KOH/g) ASTM D2896	Previene la corrosión.	Min. 20 (operación en HFO) Máx. 50% de reducción comparado con el aceite fresco (operación en LFO)	Min. 25 (operación en HFO) Máx. 40% de reducción comparado con el aceite fresco (operación en LFO)
Viscosidad (cSt a 100°C) ASTM D445	Provee lubricación hidrodinámica para los cojinetes, etc. Reduce la fricción y por lo tanto el consumo de combustible	Máx. -20% o +25% de los niveles en el aceite fresco a 100°C Máx. -25% o -45% de los niveles del aceite fresco a 40°C	Máx. ±15% de los niveles del aceite fresco a 100°C Máx. ±25% de los niveles del aceite fresco a 40°C
Agua (% por Vol) o (% por Peso) ASTM D95	Produce corrosión. Deteriora las propiedades hidrodinámicas del aceite. Afecta las funciones de los aditivos.	Máx. 0.3% por Volumen o Peso	Máx. 0.3% por Volumen o Peso
Insolubles (% por Peso) ASTM D893b	Deteriora las propiedades hidrodinámicas del aceite. Afecta las funciones de los aditivos.	Máx. 2.0 % por peso, como insolubles de n-pentano.	Máx. 1.0 % por peso, como insolubles de n-pentano.
Punto de Inflamación (°C) ASTM D92 o D93	Riesgo de una explosión en el carter	Min. 170°C (PMCC) Min. 190°C (COC)	Min. 170°C (PMCC) Min. 190°C (COC)

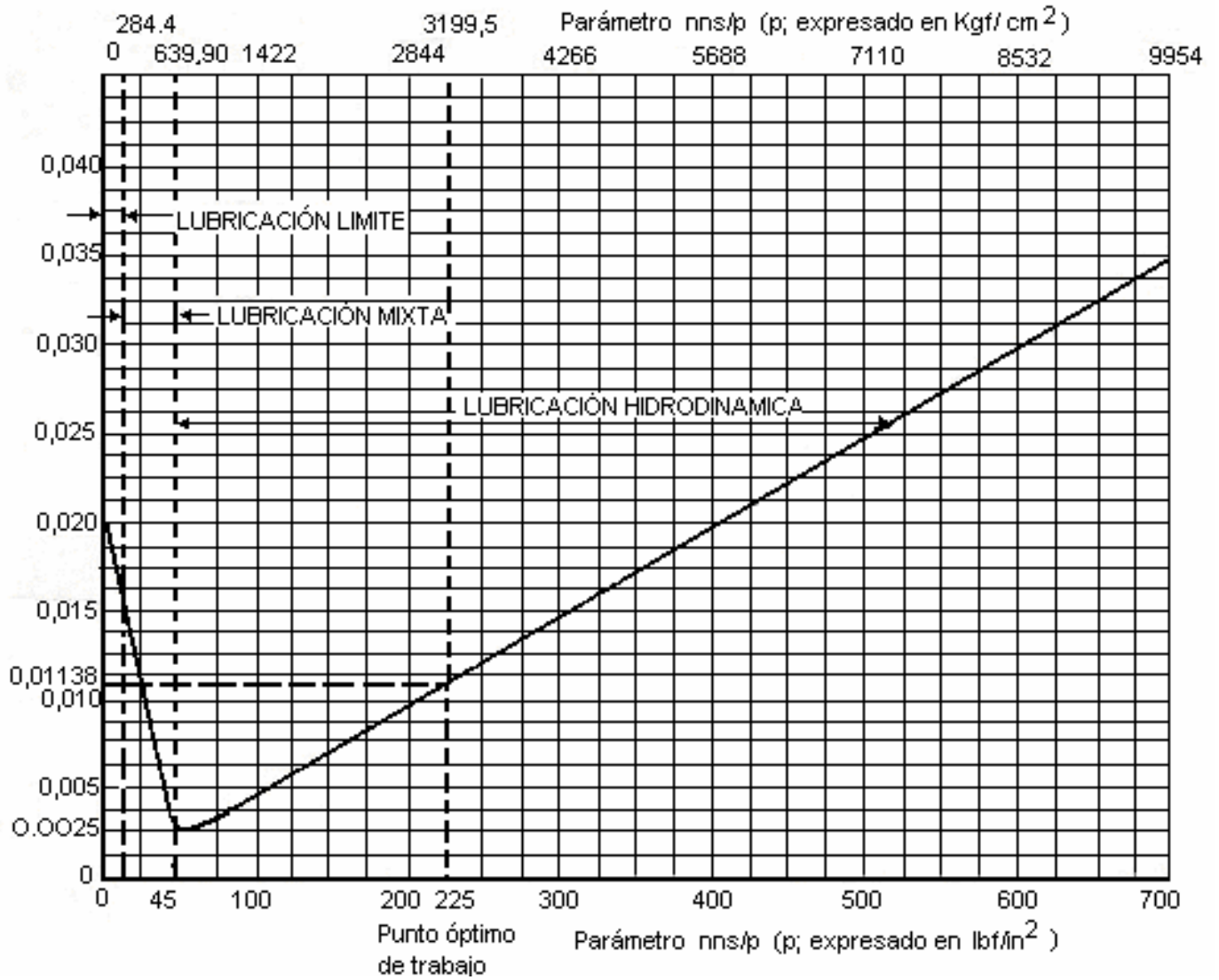
APÉNDICE C

LÍMITES DE LOS ELEMENTOS EN LOS ACEITES USADOS RECOMENDADOS POR EL FABRICANTE.

ELEMENTO	UNIDAD	VALORES TÍPICOS, HFO	NIVELES ANORMALES HFO
Hierro, Fe	ppm	10 – 40	>50
Cromo, Cr	ppm	0-3	>5
Estaño, Sn	ppm	0-3	>5
Plomo, Pb	ppm	0-3	>5
Cobre, Cu	ppm	0-5	>10
Silicio, Si	ppm	10 – 40	<5 o >50
Sodio, Na	ppm	10 – 50	>100
Aluminio, Al	ppm	0-10	>20
Vanadio, V	ppm	1-2*V en Comb.	>2* V en Comb.
Níquel, Ni	ppm	1-2*Ni en Comb.	>2*Ni en Comb.

APÉNDICE D

TIPOS DE PELÍCULAS LUBRICANTES



APÉNDICE E
EJEMPLOS DE CÁLCULO DE LÍMITES.

Procedimiento para calcular parámetro del Hierro (Parámetro de Desgaste)

1) Se normalizan por Compensación de Aceite (x_m) los Datos Originales que están en la columna (x_o) de cada motor, utilizando la ecuación 2.6 $\left(N_m = 1 + \frac{V}{V}\right)$ y luego la ecuación 2.7 ($x_m = x_o \cdot N_m$).

2) Se calcula el valor de \bar{x} con la ecuación 2.2 $\left(\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}\right)$ y luego el valor de σ con la ecuación 2.3 $\left(\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}\right)$ para los

valores x_m de cada motor.

3) Utilizando los datos de la Tabla 2.2 se define qué tipo de parámetro es. Si se trata de un parámetro de salud se utiliza el signo (-) si se trata de un parámetro de contaminación o desgaste se utiliza el signo (+). Este cálculo se realiza para cada motor.

TABLA 2.2

Valor Normal	\bar{x}
Límite Alarma	$\bar{x} \pm \sigma$
Límite Crítico	$\bar{x} \pm 2 \cdot \sigma$

$V = 4020$ litros

<i>n</i>	MOTOR 1			MOTOR 2			MOTOR 3			MOTOR 4			MOTOR 6			MOTOR 7		
	<i>V</i> ₁	<i>x</i> _{o1}	<i>x</i> _{m1}	<i>V</i> ₂	<i>x</i> _{o2}	<i>x</i> _{m2}	<i>V</i> ₃	<i>x</i> _{o3}	<i>x</i> _{m3}	<i>V</i> ₄	<i>x</i> _{o4}	<i>x</i> _{m4}	<i>V</i> ₆	<i>x</i> _{o6}	<i>x</i> _{m6}	<i>V</i> ₇	<i>x</i> _{o7}	<i>x</i> _{m7}
1	1552	29	40	414	15	17	1415	33	45	1104	26	33	276	21	22	138	42	43
2	1600	23	32	483	18	20	1484	27	37	414	25	28	414	16	18	794	42	50
3	897	25	31	380	27	30	966	22	27	1380	21	28	759	24	29	207	15	16
4	1173	24	31	207	30	32	1794	21	30	1035	22	28	552	34	39	587	29	33
5	414	18	20	276	30	32	3484	21	39	1518	29	40	828	37	45	207	37	39
6	276	22	24	138	34	35	2656	20	33	759	31	37	414	45	50	449	33	37
7	310,5	22	24	345	38	41	1380	22	30	1725	32	46	1139	32	41	207	33	35
8	207	28	29	518	30	34	3381	18	33	966	34	42	518	41	46	1173	36	47
9	345	32	35	966	35	43	1829	20	29	1725	25	36	966	31	38	276	32	34
10	276	25	27	518	38	43	2726	17	29	3001	19	33	1242	33	43	1587	34	47
11	414	31	34	0	13	13	2242	18	28	2415	21	34	483	41	46	1070	40	51
12	448	32	36	380	23	25	1898	21	31	1518	20	28	1518	27	37	1000	31	39
13	207	37	39	380	21	23	1380	15	20	2829	19	32	897	33	40	621	37	43
14	621	43	50	621	19	22	310,5	16	17	1173	13	17	1242	28	37	1069	33	42
15	0	14	14	276	36	38	103	21	22	2863	24	41	828	13	16	1118	27	35
16	310	22	24	828	34	41	138	18	19	621	17	20	1345,5	28	37	345	19	21
17	655	27	31	414	32	35	483	26	29	2484	16	26	483	28	31	621	26	30
18	311	28	30	828	28	34	207	27	28	310,5	13	14	1621	26	36	897	20	24
19	966	33	41	517,5	36	41	310,5	29	31	414	15	17	483	20	22	793,5	30	36
20	1414,5	34	46	897	43	53	207	30	32	248,4	23	24	1587	26	36	1449	26	35
21	931	37	46	379,5	38	42	104	35	36	414	24	26	621	22	25	531,3	31	35
22	1138,5	33	42	483	19	21	1000,5	38	47	0	29	29	759	25	30	1138,8	25	32
23	414	40	44	948,3	22	27	207	41	43	724,5	26	31	552	24	27	0	32	32
24	1759,5	39	56	1104	23	29	103,5	15	15	414	31	34	207	23	24	1138,8	32	41
25	1380	31	42	552	22	25	448,5	19	21	380	27	30	379,5	23	25	1504,5	32	44
26	483	32	36	414	26	29	310	25	27	1325	24	32	428	22	24	966	26	32
27	1159,2	34	44	1104	29	37	379	25	27	759	29	34	311	25	27	1277	25	33
28	794	42	50	552	33	38	1035	30	38	1346	34	45	379,5	31	34	311	28	30
29	1104	15	19	1311	32	42	621	36	42	414	18	20	138	27	28	931,5	18	22
30	862,5	20	24	1552,5	31	43	414	40	44	345	21	23	483	32	36	276	20	21
31	1656	20	28	1414,5	33	45	552	38	43	931,5	23	28	0	35	35	207	22	23
32	897	24	29	1449	28	38	1035	40	50	345	28	30	207	16	17	103,5	31	32
33	1518	21	29	966	30	37	587	40	46	311	34	37	103,5	21	22	276	28	30
34				1552,5	23	32							345	21	23	276	34	36
35				690	28	33							725	26	31	897	41	50
MEDIA	\bar{x}_1	=	34	\bar{x}_2	=	33	\bar{x}_3	=	32	\bar{x}_4	=	30	\bar{x}_6	=	32	\bar{x}_7	=	35
DESV. EST	σ_1	=	10	σ_2	=	9	σ_3	=	9	σ_4	=	8	σ_6	=	9	σ_7	=	9

PRECAUCIÓN	$\bar{x}_1 + \sigma_1 = 44$	$\bar{x}_2 + \sigma_2 = 42$	$\bar{x}_3 + \sigma_3 = 41$	$\bar{x}_4 + \sigma_4 = 38$	$\bar{x}_6 + \sigma_6 = 41$	$\bar{x}_7 + \sigma_7 = 44$
ALARMA	$\bar{x}_1 + 2 * \sigma_1 = 54$	$\bar{x}_2 + 2 * \sigma_2 = 51$	$\bar{x}_3 + 2 * \sigma_3 = 50$	$\bar{x}_4 + 2 * \sigma_4 = 46$	$\bar{x}_6 + 2 * \sigma_6 = 50$	$\bar{x}_7 + 2 * \sigma_7 = 53$

4) Se calcula el promedio de los límites de precaución de los 6 motores, por lo tanto el límite de precaución de las ppm de Fe es:

5) Finalmente se calcula el promedio de los límites de alarma de los 6 motores, por lo tanto el límite de alarma de las ppm de Fe es:

$$\bar{x}_{\text{LimitePrecaucionFE}} = \frac{44 + 42 + 41 + 38 + 41 + 44}{6} = 42 \text{ ppm}$$

$$\bar{x}_{\text{LimiteAlarmaFE}} = \frac{54 + 51 + 50 + 46 + 50 + 53}{6} = 51 \text{ ppm}$$

EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LOS LÍMITE DE LA VISCOSIDAD SEGÚN ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE.

Según el fabricante del motor indica que los límites para condenar la viscosidad a 100 °C esta debe llegar máximo a un 25% de la Línea Base y un nivel mínimo del 20% de la Línea Base.

Propiedad	Impacto en el funcionamiento del motor	Límite para condenar	Nivel recomendado para el desempeño óptimo
Viscosidad (cSt a 100°C) ASTM D445	Provee lubricación hidrodinámica para los cojinetes, etc. Reduce la fricción y por lo tanto el consumo de combustible	Máx. -20% o -25% de los niveles en el aceite fresco a 100°C Máx. -25% o -45% de los niveles del aceite fresco a 40°C	Máx. ±15% de los niveles del aceite fresco a 100°C Máx. ±25% de los niveles del aceite fresco a 40°C

A 40 °C la viscosidad debe estar máximo en un 25% más de la Línea Base o un nivel mínimo del 25% de la Línea Base.

LB Viscosidad @100°C = 14cSt

Límite Máximo = 1,25 * 14 = **17,5 cSt.**

Límite Mínimo = 0,8 * 14 = **11,2 cSt.**

APÉNDICE G

TABLA DE RESULTADOS DATOS NORMALIZADOS

FECHA	Fe ppm	Cu ppm	Al ppm	Cr ppm	Ni ppm	Mo ppm	Si ppm	Mg ppm	Na ppm	Ca ppm	P ppm	Zn ppm	V ppm	Hollin (%)	Oxidación (%)	Sulfatación (%)	H2O (%)	Nitración (%)	Viscos @ 100°C cSt	TBN
21/03/2008	30,58	6,6	26,91	1,22	273,98	1,35	24,46	167,57	362,05	23086,7	389	604,23	688,62	0,05	0,09	0,59	0,18	0,16	17,86	42,1
31/03/2008	31	5,43	28,42	1,55	262,23	2,07	27,13	173,1	356,53	24376,1	426,3	642,02	670,44	0,04	0,09	0,56	0,17	0,15	17,92	43,1
18/04/2008	19,85	8,16	17,65	0	105,89	0	20,96	148,9	281,26	20856,3	381,6	590,1	296,7	0,03	0	0,19	0	0,06	14,17	51
28/04/2008	23,51	16,03	22,44	1,07	188,08	1,5	18,17	143,2	299,22	20272,4	362,3	545,01	484,1	0,03	0,02	0,32	0,11	0,07	14,49	49,3
08/05/2008	23,7	15,08	23,7	1,08	227,3	0	11,85	126,04	284,39	20324,3	331,8	507,38	610,79	0,04	0,03	0,44	0,11	0,08	14,57	45,2
19/05/2008	29,44	13,67	28,39	1,47	298,62	1,89	16,82	129,33	298,62	20959,4	348	506,82	762,33	0,05	0,04	0,59	0,16	0,1	15,07	46,1
30/05/2008	34,75	17,37	33,66	1,85	388,72	3,26	11,94	140,07	274,71	17212,4	367	516,85	969,64	0,06	0,05	0,76	0,19	0,11	15,57	40,2
09/06/2008	26,72	14,96	32,06	1,5	392,2	2,03	9,19	95,11	320,6	20139,9	241,5	504,41	1102,9	0,06	0,06	0,85	0,18	0,12	15,91	33,1
19/06/2008	34,19	17,65	39,71	1,76	490,83	2,54	14,34	106,99	440,09	20938	262,5	499,65	1255,2	0,07	0,06	0,96	0,2	0,12	16,02	31,8
02/07/2008	35,57	15,56	40,01	1,56	536,83	2,78	15,56	106,7	412,35	21044,1	282,3	481,25	1290,4	0,07	0,07	1,09	0,2	0,13	16,34	30,1
11/07/2008	38,91	15,77	43,11	2,21	609,87	3,36	14,72	111,46	403,77	19826,9	297,6	470,02	1311,2	0,07	0,08	1,22	0,21	0,15	16,77	25,1
22/07/2008	49,64	16,16	48,49	2,42	571,47	4,85	16,16	132,76	339,42	1906,04	372,9	512,59	1429,2	0,08	0,08	1,28	0,22	0,16	17,1	26,2
13/08/2008	15,39	9,35	1,1	0	0	0	1,87	280,37	4,73	22398	1151	1606,37	0	0,03	0,03	0,38	0,13	0,08	14,8	41,1
23/08/2008	23,7	15,08	24,77	1,4	233,73	2,26	12,93	96,94	431,92	21534,8	282,2	633,34	637,65	0,04	0,04	0,5	0,16	0,1	15,12	37,1
03/09/2008	31,4	12,79	29,07	1,74	310,5	2,44	13,96	118,62	491,92	23362,2	368,7	666,36	781,49	0,05	0,04	0,59	0,17	0,11	15,43	38,2
13/09/2008	30,17	12,93	29,09	1,62	297,35	2,69	10,77	95,89	377,08	1888,62	306	541,91	801,56	0,05	0,06	0,71	0,19	0,12	15,84	36,1
24/09/2008	40,93	14,88	34,73	1,86	379,53	3,1	21,09	135,19	467,59	24757,6	426,7	690,85	931,46	0,05	0,06	0,72	0,18	0,12	15,82	35,2
04/10/2008	45,96	22,98	41,91	1,89	451,52	3,24	18,93	120,32	493,43	22741,1	411	758,4	1246,4	0,05	0,07	0,82	0,19	0,14	16,12	33,2
15/10/2008	45,57	14,78	36,95	2,46	412,58	4,43	23,4	128,09	373,17	23129,3	438,5	641,66	995,13	0,05	0,07	0,85	0,18	0,15	16,19	32,1
28/10/2008	42,35	14,12	38,5	1,92	406,78	3,59	21,81	120,62	447,84	22960,5	491,5	730,15	1085,6	0,05	0,07	0,79	0,17	0,14	16,11	33,3
09/11/2008	44,12	14,34	38,6	2,32	447,81	3,42	16,54	109,2	438,99	20821,1	357,4	596,71	1097,5	0,06	0,09	0,94	0,2	0,17	16,59	33,1
29/11/2008	56,07	18,69	46,01	3,31	546,32	5,61	20,13	133,7	488,81	25606,6	447,1	764,85	1377,3	0,06	0,1	0,98	0,21	0,18	16,55	31,7
10/12/2008	41,64	13,43	40,3	2,69	454,03	4,43	18,81	114,18	518,51	2556,27	358,7	738,81	1210,3	0,06	0,16	0,85	0,35	0,42	16,41	30,01
20/12/2008	35,84	10,64	32,48	3,02	378,61	3,7	13,44	90,73	390,93	1968,1	306,9	585,84	1004,8	0,07	0,17	0,94	0,36	0,44	16,88	36,6
31/12/2008	43,8	9,53	37,36	1,93	444,48	4,64	19,33	113,38	462,52	2467,21	393	743,38	1181,4	0,06	0,09	0,91	0,18	0,17	16,58	36,3
10/01/2009	50,3	9,1	38,32	2,51	493,38	5,51	21,56	129,33	413,14	2242,94	414,3	652,64	1120,9	0,06	0,14	0,76	0,12	0,17	16,65	35,1
28/01/2009	19,12	2,17	19,12	0	141,48	0	20,39	133,84	495,83	25584,3	376	730,36	391,31	0,04	0,03	0,25	0,12	0,07	14,71	46,2
07/02/2009	24,29	2,55	23,08	0,85	195,54	2,91	14,57	136,03	372,87	23052,2	377,7	660,72	496,75	0,04	0,05	0,37	0,15	0,1	15,02	43,5
17/02/2009	28,24	2,82	25,41	0,99	232,97	2,97	24	141,19	471,59	26697	447,6	689,03	560,54	0,07	0,05	0,4	0,14	0,1	14,77	46,3
28/02/2009	29,36	3,06	26,91	0,98	271,54	2,81	14,68	135,77	442,77	24506,7	378	645,81	670,28	0,07	0,06	0,5	0,14	0,11	14,97	38,9
11/03/2009	28,93	3,17	30,31	1,1	293,43	2,62	15,15	121,23	493,19	26081	343	698,45	785,24	0,08	0,07	0,52	0,14	0,12	15,34	36,9
21/03/2009	33,57	2,64	28,78	1,2	288,96	3	16,79	118,7	405,26	22656,4	377,7	586,31	752,98	0,08	0,08	0,58	0,15	0,13	15,42	40,2

APÉNDICE I

FORMATO DE CONTROL DE MUESTREO PARA EL ANÁLISIS DE ACEITE

FECHA ÚLTIMA ACTUALIZACIÓN DE LOS HORÓMETROS						03/03/2009			
								FECHA 03/03/2009	
TAG	MARCA	EQUIPO	HOROMETRO ÚLTIMO CAMBIO	HOROMETRO LUBRICANTE	HORAS FALTANTES PARA CAMBIO	DÍAS FALTANTES PARA CAMBIO	DÍAS FALTANTES PARA MUESTRA	HORÓMETRO ACTUAL EQUIPO	Muestras del día
GE-3170A	Wartsila	Motor	45879	272	3728	155	9	46151	
GE-3170B	Wartsila	Motor	46824	0	4000	167	0	46824	x
GE-3170C	Wartsila	Motor	42883	2238	1762	73	0	45121	x
GE-3170D	Wartsila	Motor	45027	576	3424	143	7	45603	
GE-3170F	Wartsila	Motor	44190	1590	2410	100	6	45780	
GE-3170G	Wartsila	Motor	22203	360	3640	152	5	22563	

APÉNDICE J

TABLA DE RESULTADOS DE LOS DATOS OPERACIONALES

FECHA	30/08/2008	03/09/2008	13/09/2008	24/09/2008	04/10/2008	09/11/2008	29/11/2008	10/12/2008	20/12/2008
Carga Activa (KW)	6122	6102	6008	6015	6160	6086	6105	6077	6085
Horometro (Horas)	38928	39020	39268	39518	39767	40457	41021	6392	41515
P Cárter (mbar)	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	2,1	2,3	2,3	2,4
TGE Cil A1 (°C)	462	446	442	453	462	472	445	447	447
TGE Cil A2 (°C)	446	438	434	445	460	448	440	441	435
TGE Cil A3 (°C)	456	445	450	456	462	451	422	428	453
TGE Cil A4 (°C)	425	420	420	433	448	439	424	429	432
TGE Cil A5 (°C)	459	451	440	458	473	454	440	439	444
TGE Cil A6 (°C)	466	444	451	463	477	468	463	469	462
TGE Cil A7 (°C)	445	427	432	438	449	460	456	455	457
TGE Cil A8 (°C)	440	426	421	437	444	457	452	451	450
TGE Cil A9 (°C)	425	420	417	428	432	447	443	435	443
TGE Cil B1 (°C)	429	419	407	416	417	415	408	409	416
TGE Cil B2 (°C)	419	406	427	429	445	451	433	438	439
TGE Cil B3 (°C)	443	432	435	447	460	445	438	442	445
TGE Cil B4 (°C)	479	445	445	443	448	443	423	419	425
TGE Cil B5 (°C)	424	442	438	452	457	416	415	416	416
TGE Cil B6 (°C)	424	408	404	411	424	423	419	420	414
TGE Cil B7 (°C)	469	459	472	463	480	444	438	441	441
TGE Cil B8 (°C)	476	464	478	468	486	447	440	443	438
TGE Cil B9 (°C)	468	473	490	470	468	433	430	427	426
T. Cojinete 1 (°C)	92	92	92	92	93	94	93	93	93
T. Cojinete 2 (°C)	92	92	93	93	94	95	93	93	93
T. Cojinete 3 (°C)	95	95	95	95	96	97	96	95	96
T. Cojinete 4 (°C)	95	95	95	95	96	97	96	96	96
T. Cojinete 5 (°C)	94	94	95	94	95	96	96	95	95
T. Cojinete 6 (°C)	94	94	95	95	96	97	96	96	96
T. Cojinete 7 (°C)	96	96	97	96	97	98	98	97	97
T. Cojinete 8 (°C)	94	94	94	94	95	95	95	95	94
T. Cojinete 9 (°C)	96	96	96	96	96	97	97	97	96
T. Cojinete 10 (°C)	88	88	89	88	89	90	90	89	89
T. Turbo A (°C)	324	312	309	322	330	340	331	331	338
T. Turbo B (°C)	338	326	328	332	340	334	330	328	334
Turbo A (RPM)	22105	22173	22324	22123	22292	21938	21647	21769	21549
Turbo B (RPM)	22102	22151	22321	22071	22258	22032	21731	21828	21601

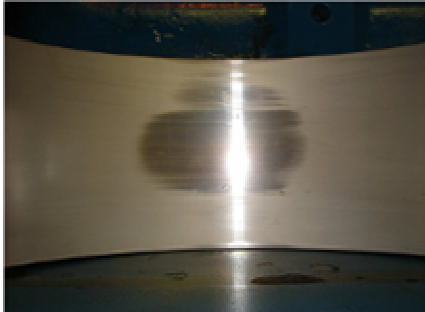
APÉNDICE J

TABLA DE RESULTADOS DE LOS DATOS OPERACIONALES

FECHA	31/12/2008	10/01/2009	28/01/2009	07/02/2009	17/02/2009	11/03/2009	21/03/2009	03/04/2009	13/04/2009	04/05/2009
Carga Activa (KW)	6058	6090	6061	6086	6083	6063	5996	5612	5500	5997
Horometro (Horas)	41780	42043	42445	42675	42908	43439	43678	43931	44169	44439
P Cártter (mbar)	2,7	2,9	3,1	3,3	3,4	4,1	3,9	3,9	3,8	1
TGE Cil A1 (°C)	450	452	439	450	455	456	466	468	416	411
TGE Cil A2 (°C)	438	441	432	437	431	433	441	436	414	409
TGE Cil A3 (°C)	419	423	419	400	449	455	471	465	438	431
TGE Cil A4 (°C)	433	432	425	431	435	437	441	433	411	418
TGE Cil A5 (°C)	447	444	449	450	455	453	464	460	433	442
TGE Cil A6 (°C)	463	459	455	446	455	463	468	455	447	474
TGE Cil A7 (°C)	458	462	455	444	455	459	460	451	437	439
TGE Cil A8 (°C)	457	445	448	447	457	450	461	451	434	438
TGE Cil A9 (°C)	452	447	446	447	457	459	452	453	444	441
TGE Cil B1 (°C)	420	418	403	407	421	425	441	434	451	433
TGE Cil B2 (°C)	437	441	435	430	439	437	451	442	457	441
TGE Cil B3 (°C)	443	436	442	441	440	437	444	441	453	439
TGE Cil B4 (°C)	427	446	421	428	430	428	441	439	415	418
TGE Cil B5 (°C)	418	413	407	396	425	433	445	437	422	432
TGE Cil B6 (°C)	416	418	414	412	424	440	449	447	422	430
TGE Cil B7 (°C)	427	453	438	429	437	441	449	453	415	415
TGE Cil B8 (°C)	447	437	444	441	453	452	447	443	418	422
TGE Cil B9 (°C)	437	434	439	440	440	452	463	456	448	442
T. Cojinete 1 (°C)	93	94	91	92	92	92	92	92	93	91
T. Cojinete 2 (°C)	93	94	91	92	92	92	92	93	91	87
T. Cojinete 3 (°C)	95	95	94	94	94	93	92	93	91	89
T. Cojinete 4 (°C)	95	97	94	94	95	96	95	95	93	90
T. Cojinete 5 (°C)	96	95	93	94	94	96	95	95	94	90
T. Cojinete 6 (°C)	95	96	94	94	95	95	94	95	93	91
T. Cojinete 7 (°C)	97	98	96	96	96	96	95	95	94	92
T. Cojinete 8 (°C)	94	95	92	93	94	97	96	96	95	93
T. Cojinete 9 (°C)	96	97	95	96	96	95	93	94	92	91
T. Cojinete 10 (°C)	89	90	87	88	88	97	96	96	95	93
T. Turbo A (°C)	333	331	329	331	336	340	345	338	321	331
T. Turbo B (°C)	334	331	329	334	334	341	345	340	333	341
Turbo A (RPM)	21858	21562	21653	21562	21792	21663	22107	21588	21179	20883
Turbo B (RPM)	21941	21742	21733	21624	21884	21757	22225	21708	21466	21059

APÉNDICE K

FALLAS DE LUBRICACIÓN Y OPERACIÓN EN EL MOTOR



DESGASTE ABRASIVO EN COJINETES POR INADECUADA FILTRACIÓN Y BAJA PROPIEDAD ANTIDESGASTE DEL ACEITE DE USO ACTUAL.



FORMACIÓN DE LACAS EN PISTÓN POR ALTA TEMPERATURA (TERMO-OXIDACIÓN)



CAMISA OXIDADA POR AGUA DE REFRIGERACIÓN, GRIPADO POR ALTA TEMPERATURA Y BAJO TBN DEL ACEITE USADO



CORROSION POR ALTA TGE Y ALTA DEPOSICIÓN DE CARBÓN EN ALABES DE LAS TURBINAS



EXCESIVA DEPOSICIÓN DE HOLLÍN BAJO PODER DETERGENTE-DISPERSANTE DEL ACEITE

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUDELO SANTAMARÍA JONH RAMIRO, Motores Térmicos, Tomo I, Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería Departamento de Mecánica Medellín, 2000. Páginas 17-18, 26, 46-48
2. ASHLEY MAYER, Noria Corporation, Paper “Understanding Time-dependent Limits” Practicing Oil Análisis Magazine. Noviembre 2005.
3. BENITEZ HERNANDEZ LUIS EDUARDO, Análisis de Fallas por Lubricación, Curso Inspector de Tribología y Lubricación, Lima, Septiembre 2006.
4. DE CASTRO MIGUEL VICENTE, El Motor Diesel en el Automóvil, Ediciones CEAC S.A, 1ra. Edición, Noviembre 1987. Páginas: 15-19, 36
5. ESPOL, Motores Endotérmicos, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, 1986. Páginas: 3 - 4
6. JOHN MOUBRAY, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Edición en español, 2004.
7. MARKS, Manual del Ingeniero Mecánico, Tomo 1, Editorial Mc Graw-Hill, 9na. Edición en inglés, 3ra edición en español, 1987. Páginas: 6-222 - 6-226, 6-230.

8. MONTGOMERY DOUGLAS C., GEORGE C. RUNGER, Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería, 2da. Edición, Editorial LIMUSA WILEY.

Páginas: 4-5.

9. Revista Machinery Lubrication en Español, www.machinerylubrication.com/sp. Interpretación sistemática del análisis de aceite – Técnica SACODE.

10. ROJAS NADAL MANUEL, Reporte Investigación sobre fallas y averías de Motores de Combustión Interna. Academia para la Ciencia Militar de la URSS. 1998.

11. WARTSILA OPERATING INSTRUCTION, Análisis del Aceite de Lubricación y Seguimiento de la Calidad del Aceite, Octubre 2003