



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**"Análisis de Aceite de los Motores Diesel de un Buque Pesquero para  
Mantenimiento Predictivo"**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

**Carlos Estuardo Chávez Venegas**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2007**

## **AGRADECIMIENTO**

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente al Ing. Jorge Félix N. Director de Tesis, por su invaluable ayuda.

## **DEDICATORIA**

A MIS PADRES

A MI HERMANA

A MI ESPOSA

A MIS HIJOS

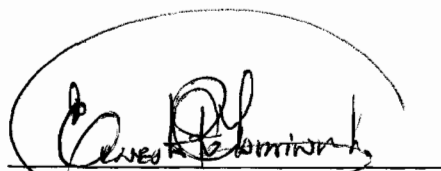
## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



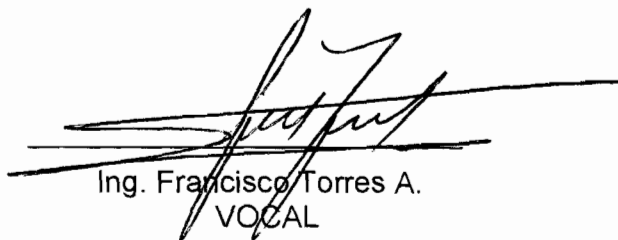
Ing. Eduardo Rivadeneira P.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE



Ing. Jorge Félix N.  
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Ernesto Martínez L.  
VOCAL



Ing. Francisco Torres A.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Carlos Estuardo Chávez Venegas

## RESUMEN

En la ciudad de Manta se encuentra la mayor concentración de la flota pesquera industrial de nuestro país, que tienen como área de pesca lo que se constituye el Océano Pacífico entre los Trópicos de Cáncer y Capricornio.

En este caso de estudio se realiza un seguimiento a un barco pesquero que tiene como base el Puerto de Manta, en el que se toma como referencia los motores principales y auxiliares. Esta embarcación presenta problemas de alto consumo de combustible y lubricante, que generan un gasto excesivo en su operación.

En esta unidad a partir del seguimiento que se realiza con los análisis de aceite usado se logra determinar condiciones de trabajo inadecuadas, que se evidencian en los resultados de los análisis de laboratorio al sobrepasar los parámetros de control y aumento de contaminantes en el lubricante.

Entre las principales causas detectadas se encuentra deficiencia mayor de los sistemas de inyección de combustible que generan problemas de contaminación en el aceite y por consiguiente aumento de la presencia de desgaste en las partes de los equipos.

El objetivo de la presente tesis es demostrar que evaluando los parámetros de control del aceite usado, se puede determinar las causas de las condiciones de operación del equipo.

Conjuntamente con este control se emiten recomendaciones de mejora que tienen como objetivo el reducir los consumos de lubricantes. Con el seguimiento a éstas recomendaciones se comprueba la validez de las mismas.

Se comienza la tarea de toma de datos con la línea base que tienen los equipos al utilizar el lubricante, como consumos, tamaño de depósito, potencia del equipo, régimen de trabajo, etc. Esta información sirve para determinar las condiciones de trabajo de los equipos a realizar seguimiento.

Se describe el proceso para obtener las muestras de aceite en la embarcación y el correspondiente análisis de las muestras recibidas. En la revisión de las muestras de aceite se resalta la información que los sentidos permiten obtener, ya que ofrece una idea general del tipo de resultados de laboratorio que se espera obtener.

Se remiten las muestras de aceite usado al laboratorio y con los resultados se realiza un análisis para establecer una línea base de información, que permite la evaluación de los datos obtenidos. Al realizar las reparaciones en los motores a partir de las recomendaciones emitidas, con el seguimiento al lubricante utilizado

se determina si las mismas lograron que se mejoren las condiciones de operación de los equipos.

Al revisar los datos correspondientes a los metales de desgaste, se encuentra que al mantener un seguimiento de la operación de los equipos se lograba evitar el aumento del desgaste metálico.

Las reparaciones realizadas permitieron mejorar el desempeño, disminuyendo el consumo de combustibles, en el caso de los lubricantes se logra una disminución en el consumo y un aumento significativo en la vida útil del mismo que se refleja en ahorro para la operación de la embarcación.

Con el adecuado control y seguimiento del análisis de aceite usado se puede mantener controlados los equipos en su operación ya que se determinan condiciones anormales de funcionamiento por calibración inadecuada del equipo, antes que reflejen fallas mecánicas o, que puedan dejar no disponibles para su operación.



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	V
ABREVIATURAS .....	VIII
SIMBOLOGÍA .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO 1	
1. MANTENIMIENTO PREDICTIVO .....	2
1.1. Definición del Mantenimiento Predictivo .....	2
1.2. Objetivos del Mantenimiento Predictivo .....	7
1.3. Principales Herramientas del Mantenimiento Predictivo .....	7
CAPITULO 2	
2. LOS LUBRICANTES .....	10
2.1. Obtención de los Lubricantes .....	10
2.2. Características Físicas y Químicas de los Lubricantes .....	13

2.2.1.1. Viscosidad .....	14
2.2.2. Índice de Viscosidad .....	15
2.2.3. Densidad .....	15
2.2.4. Punto de Inflamación .....	16
2.2.5. Punto de Fluidez .....	16
2.2.6. Números de Neutralización .....	16
2.2.7. TAN (Número Total Ácido) .....	17
2.2.8. TBN (Número Total Básico) .....	17
2.2.9. Color .....	18
2.2.10. Ceniza Sulfatada .....	18
2.2.11. Resistencia a la Oxidación .....	19
2.2.12. Demulsibilidad .....	19
2.3. Los Aditivos .....	20
2.3.1. Aditivos para la Protección de Superficies .....	21
2.3.1.1. Agentes Anti-Desgaste y de Extrema Presión.....	21
2.3.1.2. Inhibidores de Herrumbre y Corrosión.....	22
2.3.1.3. Detergente .....	22
2.3.1.4. Dispersante .....	22
2.3.1.5. Modificador de Fricción .....	23
2.3.2. Aditivos de Desempeño .....	23
2.3.2.1. Depresor del Punto Mínimo de Fluidez .....	23
2.3.2.2. Mejorador del Índice de Viscosidad .....	24
2.3.3. Aditivos para Proteger el Lubricante .....	24
2.3.3.1. Antioxidante .....	24

2.3.3.2. Antiespumante .....	25
2.3.3.3. Demulsificante .....	25

### CAPITULO 3

3. TRIBOLOGIA .....	26
3.1. Fricción .....	27
3.2. Desgaste .....	28
3.3. Lubricación Hidrodinámica .....	29

### CAPITULO 4

4. PARAMETROS DE CONTROL DE ACEITES USADOS .....	31
4.1. Viscosidad .....	34
4.2. Insolubles .....	36
4.3. TBN (Número Total Básico) .....	37
4.4. Agua .....	38
4.5. Dilución por Combustible .....	39
4.6. Oxidación .....	39
4.7. Metales de Desgaste .....	40

### CAPITULO 5

5. CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS MOTORES DIESEL MARINOS .....	42
---	----

5.1. Características Principales del Buque Atunero Objeto del Estudio.....	42
5.2. Características Principales de los Motores Marinos de nuestro Buque Pesquero.....	45

## CAPITULO 6

6. PROCESO DE DIAGNOSTICO .....	50
6.1. Descripción de la unidad .....	50
6.2. Toma de las muestras .....	51
6.3. Evaluación sensible .....	57
6.4. Análisis de laboratorio .....	65
6.5. Tabla de datos .....	83
6.6. Procesamiento y análisis de datos .....	85
6.7. Definición de problemas operacionales .....	92

## CAPITULO 7

7. RECOMENDACIONES Y MEJORAS IMPLANTADAS EN LOS MOTORES .....	97
7.1. Recomendación de acciones operativas de mejoramiento .....	97
7.2. Reevaluación de datos .....	115
7.3. Programa de seguimiento .....	139

## CAPITULO 8

8. ANALISIS DE RESULTADOS .....	141
8.1. De orden técnico .....	141
8.2. De orden económico .....	160

## CAPITULO 9

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	166
---	-----

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

mm <sup>2</sup> ./s.	Milímetros cuadrados por segundo
cst.	Centistocke
I.V.	Índice de viscosidad
gr.	Gramo
cm <sup>3</sup> .	Centímetro cúbico
KOH	Hidróxido de Potasio
mg.	Miligramo
ASTM	American Standard Test Methods
A.	Absorvancia
cm.	Centímetro
s.	Segundo
µm.	Micra
SAE	Sociedad de ingenieros automotrices
ISO	Internacional Standard Organisation
m.	Metro
hp.	Caballos de fuerza
mm.	Milímetros
r.p.m.	Revoluciones por minuto
c.v.	Caballos de vapor
Bar	1 atmósfera
ml.	Mililitros
ppm.	Partes por millón
Visc.	Viscosidad
Dil.	Dilución
Combust.	Combustible
m <sup>3</sup> .	Metros cúbicos
kg.	Kilogramos
h.	Horas
USG	Galón americano

## SIMBOLOGÍA

$\beta$	Beta
%	Porcentaje
@	Arroba - a
°C	Grados Centígrados
°F	Grados Farengeith
#	Número
$\frac{1}{4}$ "	Un cuarto de pulgada
$\frac{3}{4}$	Tres cuartos
PI	3.1416
\$	Dólares americanos

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Representación Punto Predictivo .....	4
Figura 1.2	Curva de la Bañera .....	6
Figura 2.1	Productos Refinados del Petróleo .....	11
Figura 5.1	Esquema Sistema de Circulación de Aceite .....	45
Figura 6.1	Bomba de Succión .....	51
Figura 6.2	Puntos de Muestreo de Aceite .....	55
Figura 6.3	Comparador de Viscosidad .....	60
Figura 6.4	Visgage .....	61
Figura 7.1	Viscosidad Cronológico Máquina Principal de Babor .....	100
Figura 7.2	TBN Cronológico Máquina Principal de Babor .....	101
Figura 7.3	Hierro Cronológico Máquina Principal de Babor .....	101
Figura 7.4	Cobre Cronológico Máquina Principal de Babor .....	102
Figura 7.5	Silicio Cronológico Máquina Principal de Babor .....	102
Figura 7.6	Aluminio Cronológico Máquina Principal de Babor .....	103
Figura 7.7	Viscosidad Cronológico Máquina Principal de Estribor .....	105
Figura 7.8	TBN Cronológico Máquina Principal de Estribor .....	106
Figura 7.9	Hierro Cronológico Máquina Principal de Estribor .....	106
Figura 7.10	Cobre Cronológico Máquina Principal de Estribor .....	107
Figura 7.11	Silicio Cronológico Máquina Principal de Estribor .....	107
Figura 7.12	Aluminio Cronológico Máquina Principal de Estribor .....	108
Figura 7.13	Viscosidad Cronológico Máquina Auxiliar de Babor .....	109
Figura 7.14	TBN Cronológico Máquina Auxiliar de Babor .....	110
Figura 7.15	Hierro Cronológico Máquina Auxiliar de Babor .....	110
Figura 7.16	Cobre Cronológico Máquina Auxiliar de Babor .....	111
Figura 7.17	Silicio Cronológico Máquina Auxiliar de Babor .....	111
Figura 7.18	Aluminio Cronológico Máquina Auxiliar de Babor .....	112
Figura 7.19	Viscosidad Cronológico Máquina Auxiliar de Estribor.....	113
Figura 7.20	TBN Cronológico Máquina Auxiliar de Estribor .....	113
Figura 7.21	Hierro Cronológico Máquina Auxiliar de Estribor .....	114
Figura 7.22	Cobre Cronológico Máquina Auxiliar de Estribor .....	114
Figura 7.23	Silicio Cronológico Máquina Auxiliar de Estribor .....	115
Figura 7.24	Aluminio Cronológico Máquina Auxiliar de Estribor .....	115
Figura 7.25	Datos y Curva Viscosidad Máquina Principal de Babor .....	119



Figura 7.26	Datos y Curva TBN Máquina Principal de Babor I .....	119
Figura 7.27	Datos y Curva TBN Máquina Principal de Babor II .....	120
Figura 7.28	Datos y Curva Hierro Máquina Principal de Babor .....	121
Figura 7.29	Datos y Curva Cobre Máquina Principal de Babor .....	121
Figura 7.30	Datos y Curva Silicio Máquina Principal de Babor .....	122
Figura 7.31	Datos y Curva Aluminio Máquina Principal de Babor .....	123
Figura 7.32	Datos y Curva Viscosidad Máquina Principal de Estribor ....	124
Figura 7.33	Datos y Curva TBN Máquina Principal de Estribor I .....	125
Figura 7.34	Datos y Curva TBN Máquina Principal de Estribor II .....	125
Figura 7.35	Datos y Curva Hierro Máquina Principal de Estribor .....	126
Figura 7.36	Datos y Curva Cobre Máquina Principal de Estribor .....	127
Figura 7.37	Datos y Curva Silicio Máquina Principal de Estribor .....	127
Figura 7.38	Datos y Curva Aluminio Máquina Principal de Estribor .....	128
Figura 7.39	Datos y Curva Viscosidad Máquina Auxiliar de Babor .....	129
Figura 7.40	Datos y Curva TBN Máquina Auxiliar de Babor I .....	130
Figura 7.41	Datos y Curva TBN Máquina Auxiliar de Babor II .....	130
Figura 7.42	Datos y Curva Hierro Máquina Auxiliar de Babor .....	131
Figura 7.43	Datos y Curva Cobre Máquina Auxiliar de Babor .....	132
Figura 7.44	Datos y Curva Silicio Máquina Auxiliar de Babor .....	132
Figura 7.45	Datos y Curva Aluminio Máquina Auxiliar de Babor .....	133
Figura 7.46	Datos y Curva Viscosidad Máquina Auxiliar de Estribor.....	134
Figura 7.47	Datos y Curva TBN Máquina Auxiliar de Estribor I .....	135
Figura 7.48	Datos y Curva TBN Máquina Auxiliar de Estribor II .....	135
Figura 7.49	Datos y Curva Hierro Máquina Auxiliar de Estribor .....	136
Figura 7.50	Datos y Curva Cobre Máquina Auxiliar de Estribor .....	137
Figura 7.51	Datos y Curva Silicio Máquina Auxiliar de Estribor .....	137
Figura 7.52	Datos y Curva Aluminio Máquina Auxiliar de Estribor .....	138

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Composición Típica de las Bases Lubricantes ..... 13
Tabla 2	Funciones de los Aditivos ..... 20
Tabla 3	Tabla de Datos Tipo ..... 84
Tabla 4	Datos Máquina Principal de Babor ..... 86
Tabla 5	Datos Máquina Principal de Babor Cont. .... 86
Tabla 6	Datos Máquina Principal de Estribor ..... 87
Tabla 7	Datos Máquina Principal de Estribor Cont. .... 87
Tabla 8	Datos Máquina Auxiliar de Babor ..... 88
Tabla 9	Datos Máquina Auxiliar de Babor Cont. .... 88
Tabla 10	Datos Máquina Auxiliar de Estribor ..... 89
Tabla 11	Datos Máquina Auxiliar de Estribor Cont. .... 89
Tabla 12	Parámetros Máquina Principal de Babor ..... 93
Tabla 13	Parámetros Máquina Principal de Estribor ..... 94
Tabla 14	Parámetros Máquina Auxiliar de Babor ..... 95
Tabla 15	Ahorros Proyectados Máquina Principal de Babor..... 162
Tabla 16	Ahorros Proyectados Máquina Principal de Estribor..... 163
Tabla 17	Ahorros Proyectados Máquina Auxiliar de Babor ..... 164
Tabla 18	Ahorros Proyectados Máquina Auxiliar de Estribor ..... 165

## INTRODUCCION

El presente trabajo trata sobre la utilización de los aceites, sustentando su desempeño en el seguimiento de las variables de control a través del control de aceites usados.

Como ejemplo de desempeño se toma como objeto de estudio una embarcación pesquera que tiene cuatro motores de combustión interna, que utilizan diesel como combustible, en el que se desarrolla un programa de seguimiento que nos permite establecer las condiciones de operación de los motores y nos indica cuales variables son afectadas, que permiten realizar correcciones preventivas y no permitir que se pierda el control de la operación de los motores.

Se mantiene especial atención al porcentaje de presencia de metales de desgaste, que son un indicador del estado del motor y que nos permite estimar si el funcionamiento es el adecuado y sobre todo si el desgaste no supera los límites máximos de control.

El desempeño de los equipos es controlado a partir de los datos de salud del aceite y estimar el estado de funcionamiento del motor.

# CAPÍTULO 1

## 1.MANTENIMIENTO PREDICTIVO

### 1.1 Definición del Mantenimiento Predictivo

Se define de esta manera al mantenimiento que se encuentra basado fundamentalmente en predecir fallas en equipos antes que ocurran, para dar oportunidad a corregirla sin perjuicios al servicio, operación, o a la producción (En caso de industrias). Estos controles pueden realizarse en forma periódica o continua, en función del tipo de maquinaria, sistema de producción, condiciones de operación, edad del equipo o periodos de inspección.

La efectividad del mantenimiento predictivo se logra con un correcto diagnóstico de las condiciones de operación y frecuencia en las inspecciones.

Al realizarse sistemáticamente inspecciones sobre los componentes mecánicos, se puede observar la tendencia de cambio en el comportamiento de los componentes de un equipo. Esta información es la que permite predecir la operación de los mismos ayudando al control del mantenimiento y mejoras de operación.

Otra definición de Mantenimiento Predictivo refiere lo siguiente, "El mantenimiento predictivo es una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente puede reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza. "(1)

El control del mantenimiento tiene como objetivo el encontrar el punto óptimo de ejecución de las tareas de mantenimiento en un equipo, o sea, el punto a partir del cual la probabilidad que el equipo falle o detenga su operación, asume valores no deseables.

La determinación del punto de falla trae como resultado, índices ideales de prevención de fallas, ya que la intervención en el equipo no es efectuada

---

(1) Definición del Manual del Ingeniero de Planta, Rosaler Robert

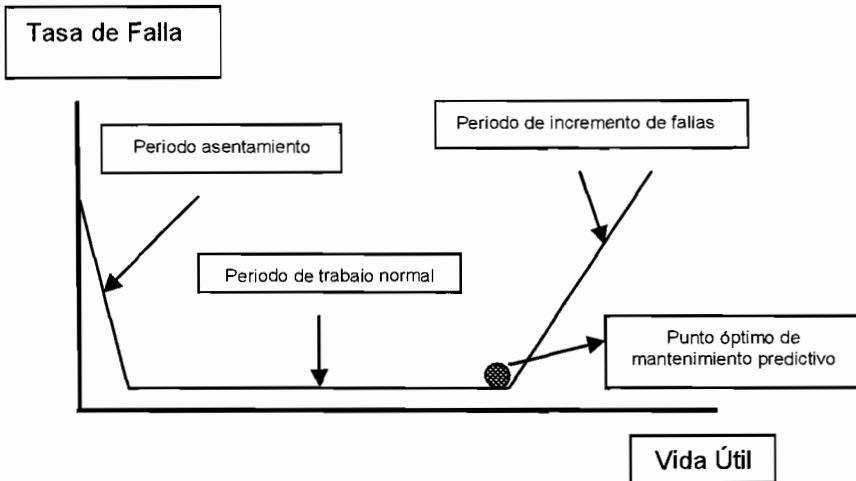


FIGURA 1.1 REPRESENTACIÓN PUNTO PREDICTIVO

durante el periodo en que aún está en condiciones de prestar servicio, sino en el periodo que sus características operativas están comprometidas.

Los estudios de determinación de este punto, que es llamado Punto Predictivo, pueden ser realizados de bajo dos formas, en función de las características de los equipos: Análisis estadístico y Análisis de síntomas.

El primero es aplicable cuando existe la suficiente cantidad de equipos o componentes con las mismas características, que permitan el desarrollo de los cálculos de probabilidades y que tienen características aleatorias de fallo.

El segundo es aplicado cuando es necesario el desarrollo de estudios para la determinación del punto predictivo, en equipos con características

diferentes a los demás equipos instalados y en los cuales es posible hacer mediciones de sus variables.

El análisis estadístico se basa en la determinación del término de vida útil, entendiéndose por tasa de fallas a la relación entre un incremento del número de fallas y el incremento correspondiente de tiempo, en cualquier instante de la vida de un equipo y por vida útil al periodo de tiempo, durante el cual el equipo desempeña su función con una tasa de fallas aceptable.

Wallodi Weibull, en sus estudios sobre resistencia de aceros, estableció una expresión semi empírica, con el objetivo de permitir:

- a) Representar fallas típicas de partida (mortalidad infantil), fallas aleatorias y fallas debidas a desgaste.
- b) Obtener parámetros significativos de la configuración de la falla a ejemplo del tiempo mínimo probable hasta la falla.
- c) La representación gráfica y simple para su aplicación.

En función de la situación en que se encuentre el equipo, con el pasar del tiempo se presentará unos de los tres estándares de falla. La composición de las tres condiciones que normalmente representan las fases de vida de una instalación, equipo o pieza se conoce como "Curva de Bañera".

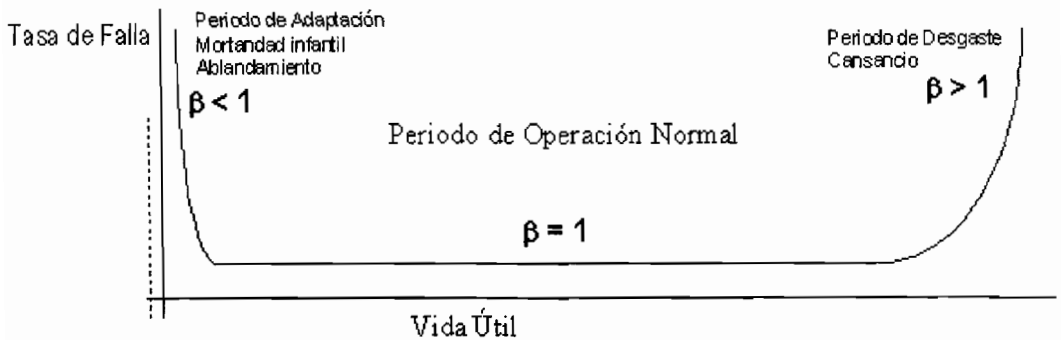


FIGURA 1.2 CURVA DE LA BAÑERA

En la práctica del mantenimiento predictivo basado en síntomas, se puede caracterizar 5 etapas: Inspección, Análisis, Diagnóstico, Solicitud de Intervención y Retorno.

En la inspección, las principales técnicas para el mantenimiento predictivo son las siguientes:

- Análisis vibracional
- Análisis de aceite
- Ensayos no destructivos
- Termografía
- Alineamiento y balanceo
- Ultrasonido



## 1.2 Objetivos del Mantenimiento Predictivo

Los principales objetivos del Mantenimiento Predictivo se resumen en los siguientes puntos:

- Detectar fallas en su comienzo, permitiendo la corrección de las causas del mal funcionamiento.
- Disminuir el trabajo de mantenimiento correctivo (que permite la planificación de operaciones de mantenimiento).
- Extender la vida útil de los componentes, para lograr un aprovechamiento eficiente de los recursos.
- Mejorar la disponibilidad del equipo, disminuyendo las paradas no programadas por fallas en la operación o en los componentes.
- Permitir programar mantenimiento o cambio de elementos mecánicos, logrando establecer cuando es necesario el trabajo.
- Permite al análisis de las averías encontradas ya que se tiene detalles de la operación y funcionamiento del equipo en el tiempo que nos permiten encontrar las causas por las que se originó la falla.

## 1.3 Principales Herramientas del Mantenimiento Predictivo

A continuación se detallan las principales herramientas utilizadas en el mantenimiento predictivo aplicado a motores de combustión interna:

- Método de inspección visual. En ellos se busca discontinuidades en el material de los elementos inspeccionados, que nos pueden indicar que los componentes analizados no se encuentran en condiciones de operación, por presentar corrosión, socavadura, abrasión, cavitación, ruptura o grietas. En general estos defectos pueden ser causados por tensiones mecánicas, impactos o golpes, cambios de temperatura e imperfecciones del material entre otros factores.
- Método análisis vibracional. A través del establecimiento de la magnitud y frecuencia de la vibración de la maquinaria industrial se puede determinar el comportamiento mecánico de los componentes de un equipo, detectándose cuando ocurren funcionamientos anormales. Este método de control demanda un seguimiento sobre el equipo en el que se puede levantar una referencia del comportamiento de la vibración, en análisis sucesivos sobre los mismos puntos de evaluación para determinar el buen funcionamiento o la deficiencia en la operación de componentes específicos. Su uso es generalizado para aplicaciones de equipos rotacionales en los que se puede controlar el estado de operación de los mismos.
- Método de análisis de aceites usados. A partir del monitoreo con la utilización de análisis de aceite se puede controlar los parámetros de operación del aceite o parámetros básicos en los que se revisa las variables de viscosidad, alcalinidad del aceite, contaminantes como

agua, hollín, lodos, etc., punto de inflamación, dilución por combustible para el caso de motores, datos que nos ayudan a saber si el producto utilizado mantiene sus propiedades y es adecuado para la aplicación. Por otra parte se encuentra el análisis espectrográfico a partir del cual se obtienen los metales de desgaste sobre los que se puede determinar cual componente o componentes mecánicos de un equipo se están desgastando de una manera anormal al superar los límites de control de la cantidad máxima permisible en un aceite.

# CAPÍTULO 2

## 2. LOS LUBRICANTES

### 2.1 Obtención de los Lubricantes

#### **Los Lubricantes**

Se conoce como aceite a cualquier elemento que reduce el rozamiento entre dos cuerpos en movimiento.

#### **Bases Lubricantes**

Los aceites normalmente provienen de productos derivados de la destilación del petróleo, el cual es resultado de la descomposición de residuos orgánicos sometidos a grandes presiones y temperaturas, que transformaron la materia orgánica en petróleo.

A partir del calentamiento del petróleo y elevando su presión, se introduce en una torre de destilación, en donde a partir de la temperatura de

vaporización de los componentes del petróleo, se separan los subproductos de la destilación, entre los cuales están los siguientes:

- Gasolinas
- Diesel / kerosene
- Bases Lubricantes
- Ceras
- Aceites de Proceso
- Combustibles Pesados
- Asfaltos

La proporción de obtención de cada uno de los productos anteriores se muestra en el grafico # 2 y representa el esquema tipo de productos que se obtienen a partir de la destilación del petróleo.



FIGURA 2.1 PRODUCTOS REFINADOS DEL PETRÓLEO

Dependiendo del lugar de extracción del petróleo su composición química difiere, conteniendo diferentes proporciones de hidrocarburos, azufre, vanadio, etc.

A partir de la refinación del petróleo se obtienen las bases lubricantes que son utilizadas para la fabricación de aceites, a las cuales se les retira en el proceso de destilación y limpieza la mayor cantidad posible de azufre.

La clasificación de las bases lubricantes se basa en la estructura de la cadena carbonada, por lo que se hallan definidos como:

- Parafínicos
- Nafténicos
- Aromáticos

Esta subdivisión se centra en el peso molecular de cada uno de los compuestos, los cuales comparten propiedades diferentes, que son utilizadas de acuerdo a la aplicación final que se le desea dar al aceite.

En las aplicaciones de motores de combustión interna, las bases lubricantes utilizadas son de tipo parafínico, que tiene características de resistencia a la oxidación, alto índice de viscosidad y baja volatilidad.

En la Tabla # 1 se muestra la composición típica de las bases lubricantes, en la que se muestran las proporciones características de una base lubricante.

**TABLA 1**  
**COMPOSICIÓN TÍPICA DE LAS BASES LUBRICANTES**

<b>Base Lubricante</b>	<b>Parafinas</b>	<b>Naftenos</b>	<b>Aromaticos</b>
<b>Parafínica</b>	65%	32%	3%
<b>Nafténica</b>	43%	50%	7%
<b>Aromática</b>	30%	30%	40%

## **2.2 Características Físicas y Químicas de los Lubricantes**

En las aplicaciones de aceites para motores de combustión interna, son necesarias propiedades que permiten el correcto desempeño de los equipos, por lo que primero se identifican los requerimientos de trabajo del aceite para proteger los motores. A continuación se detallan las principales propiedades de los aceites:

- Viscosidad
- Índice de Viscosidad
- Densidad
- Punto de Inflamación
- Punto de Fluidez
- Números de Neutralización
- TAN
- TBN
- Color
- Ceniza Sulfatada
- Resistencia a la Oxidación
- Demulsibilidad

### **2.2.1 Viscosidad**

Con el nombre de viscosidad se conoce al parámetro físico que determina la resistencia de un líquido a fluir. Para la medición de la viscosidad en lubricantes siempre se utiliza la viscosidad cinemática.

La viscosidad cinemática de los aceites se determina en varios tipos de medidas, siendo la más utilizada la del sistema internacional que la mide en centistokes o  $\text{mm}^2/\text{s}$ . (cst.).



Para el aceite utilizado el valor de la viscosidad debe encontrarse en el rango de 12 a 18 cst. @ 100°C. El valor promedio de la viscosidad de un producto nuevo se encuentra en 14 cst. @ 100°C.

### **2.2.2 Índice de Viscosidad**

Mide la tasa de cambio de la viscosidad en función a la temperatura. Esto se refleja en el valor correspondiente al índice de viscosidad, ya que un valor alto representa mejor resistencia del aceite a la temperatura.

I.V. aceite base nafténica = 45

I.V. aceite base parafínica = 90

I.V. aceite base sintética = 150

El índice de viscosidad promedio del producto utilizado es de 95.

### **2.2.3 Densidad**

Corresponde al valor de la masa por unidad de volumen en función de la temperatura. En el caso de los aceites cuando se habla de densidad siempre se expresa a 15.6 °C o 60°F.

Densidad = masa / volumen a 15°C (gr./cm<sup>3</sup>.)

La densidad promedio del producto es de 0.899 gr./cm<sup>3</sup>.

#### **2.2.4 Punto de Inflamación**

Se conoce como la temperatura más baja a la cual se producen suficientes vapores en el aceite, que permiten iniciar la ignición del aceite cuando se aplica una llama.

Esta temperatura se conoce como punto de inflamación que en el producto se debe mantener sobre los 220°C.

#### **2.2.5 Punto de Fluidez**

Se conoce así a la temperatura más baja a la que un fluido se moverá cuando haya sido enfriado. Esta es una propiedad determinante en las aplicaciones con temperaturas muy por debajo del punto de congelación del agua.

El punto de fluidez del producto se encuentra por alrededor de -15°C

#### **2.2.6 Números de Neutralización**

TAN : Número de Acidez Total

TBN : Número de Alcalinidad Total

Con estos nombres se representa a los indicadores de la presencia de acidez en el aceite y la contraparte correspondiente a la cantidad de producto alcalino para neutralizar el ataque de los productos ácidos.

### **2.2.7 TAN (Número Total Ácido)**

Representa la acidez total, y define a la cantidad de Hidróxido de Potasio necesario para neutralizar todos los materiales ácidos. Se reporta en miligramos de KOH/gr., los materiales ácidos pueden ser:

- Ácidos orgánicos
- Ácidos minerales
- Productos de la oxidación
- Nitratos orgánicos
- Compuestos nitrogenados

El valor usual del producto después de fabricarlo es de 0.7 mg. KOH/gr.

### **2.2.8 TBN (Número Total Básico)**

Indica la alcalinidad del aceite y se reporta en miligramos de KOH/gr.

El TBN de un aceite es reducido por cualquier material ácido presente en el aceite.

El valor promedio del producto al comienzo de su operación es de 15.2 mg. de KOH/gr.

### **2.2.9 Color**

El color es una prueba ASTM, que se define en una tabla de colores desde el 0 transparente, hasta el 8 oscuro, y nos da una idea de la coloración del aceite. Es normalmente utilizada en laboratorio de control de calidad para revisar que el producto fabricado cumple con la especificación del producto patrón y con una apreciación visual permite revisar si existen diferencias.

### **2.2.10 Ceniza Sulfatada**

Representa al residuo final de la incineración de un aceite expuesto al ácido sulfúrico, que se expresa en porcentaje de peso inicial de la muestra (representa la cantidad de material metálico proveniente de los aditivos).

El valor promedio del producto es de 1.85% en peso.

### 2.2.11 Resistencia a la Oxidación

Mide la resistencia que un aceite opone a reaccionar con el oxígeno y formar compuestos oxidados. A medida que los aceites se oxidan pierden sus propiedades originales, volviéndose poco eficientes.

El valor normal de oxidación en el trabajo del aceite no debe superar los 30 A/cm. (Absorbancia/cm.) a una longitud de onda específica.

$$A_{\lambda} = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

I: Intensidad de la luz después de atravesar la muestra

I<sub>0</sub>: Intensidad de la luz antes de la muestra

### 2.2.12 Demulsibilidad

Representa la facilidad que un aceite posee para separarse del agua que lo contamina y mantener en suspensión el agua residual, sin afectar la eficiencia del producto.

En el producto utilizado para la operación de estos motores, el aceite mantiene propiedades de demulsibilidad que le permiten proteger a los equipos en caso de contaminación con agua, ya que al detener la operación del equipo y descansando el aceite de su operación se puede drenar del fondo del tanque el agua residual acumulada.

### 2.3 Los Aditivos

Las bases lubricantes tienen las propiedades necesarias para proteger de la fricción a cualquier elemento, pero éstas propiedades no son suficientes, por lo que es necesario mejorarlas. Esto se logra con la introducción de los aditivos, que mejoran las propiedades físicas y químicas del aceite.

La cantidad de aditivos presentes en los aceites varían desde un 0.01% hasta el 30% en peso o más, dependiendo del tipo de aplicación en que se requieran los aceites.

En la Tabla # 2 se muestran los problemas típicos que presenta la operación de motores de combustión interna y como contraparte el tipo de propiedades para resistir este tipo de problemas.

**TABLA 2**  
**FUNCIONES DE LOS ADITIVOS**

	<b>Problemas Típicos</b>	<b>Requisitos sobre los aditivos</b>
<b>Motores</b>	<p>Altas Cargas</p> <p>Formación de depósitos</p> <p>Arranque en frío</p> <p>Viscosidad suficientemente alta</p>	<p>Propiedades antidesgaste</p> <p>Propiedades detergentes y dispersantes</p> <p>Depresor del punto de fluidez</p> <p>Mejorador del índice de viscosidad</p>

Por sus características y propiedades de trabajo, los aditivos para aceites se hallan divididos en tres grupos, que son los siguientes:

- Aditivos para la protección de superficies. (máquinas)
- Aditivos de desempeño.
- Aditivos que protegen al lubricante.

### **2.3.1 Aditivos para la Protección de Superficies**

Son aquellos que trabajan directamente sobre las superficies en contacto y evitan el deterioro de las mismas. Son los siguientes:

- Agentes Anti-desgaste y de Extrema Presión
- Inhibidores de Corrosión y Herrumbre
- Detergentes y Dispersantes
- Modificadores de Fricción

#### **2.3.1.1 Agentes Anti-desgaste y de Extrema Presión**

Reducen la fricción y el desgaste de los metales en contacto, además de prevenir las ralladuras. Producen una reacción química con el metal para formar una película con menor resistencia al corte que la del metal. En los motores de

combustión es un agente importante para prevenir el desgaste acelerado de las partes mecánicas.

### **2.3.1.2 Inhibidores de Herrumbre y Corrosión**

Protegen contra la herrumbre y la corrosión los elementos metálicos. Funcionan neutralizando la acción de los ácidos corrosivos y realizando una absorción del constituyente polar en la superficie metálica para brindar una película protectora.

### **2.3.1.3 Detergente**

Mantiene las superficies libres de depósitos, realizando reacciones químicas con lodos y barnices para neutralizarlos y mantenerlos en solución.

### **2.3.1.4 Dispersante**

Mantienen los insolubles dispersos en el aceite, impidiendo su acumulación dentro de la maquinaria al mantenerlos envueltos por la atracción polar de las moléculas del dispersante, previniendo su aglomeración. Logra que los insolubles se mantengan en suspensión debido a la solubilidad del dispersante en el aceite. Esta acción impide el



taponamiento de los orificios de lubricación y permite el normal funcionamiento del aceite dentro del motor.

#### **2.3.1.5 Modificador de Fricción**

Su propósito es alterar el coeficiente de fricción, para reducir las pérdidas de energía en el funcionamiento de la maquinaria.

### **2.3.2 Aditivos de Desempeño**

Estos aditivos trabajan sobre el desempeño del aceite sobre las condiciones de operación de los mismos, y son los siguientes:

- Depresor del punto de fluidez
- Mejorador del índice de viscosidad

#### **2.3.2.1 Depresor del Punto de Fluidez**

Este aditivo permite el flujo del aceite a bajas temperaturas, y actúa evitando la formación de cristales de cera de las parafinas presentes en el aceite.

### **2.3.2.2 Mejorador del Índice de Viscosidad**

Trabaja directamente en evitar que la viscosidad del aceite sea muy susceptible a los cambios de temperatura. Utiliza polímeros que se dilatan con el aumento de la temperatura, disminuyendo la facilidad de fluir del aceite, que permite contrarrestar el adelgazamiento del aceite.

### **2.3.3 Aditivos para Proteger el Lubricante**

Debido a que el aceite se halla en un ambiente hostil dentro de los motores de combustión, en que los contaminantes de los procesos de trabajo afectan al aceite, es necesario protegerlo con los siguientes aditivos:

- Antioxidante
- Antiespumante
- Demulsificante

#### **2.3.3.1 Antioxidante**

Su propósito es extender la vida útil del aceite protegiéndolo contra la oxidación, evitando su degradación. Este aditivo ayuda a demorar el efecto de mezclarse con el oxígeno al ser

expuesto a alta temperatura, por lo que trabaja previniendo la formación de los productos de la oxidación.

### **2.3.3.2 Antiespumante**

Mantiene controlada la formación de espuma en el aceite, que se produce por la agitación del aceite dentro del motor. Su efecto es reducir la tensión superficial de las burbujas de aire, permitiendo que se rompan con facilidad, acelerando el colapso de la formación de espuma.

### **2.3.3.3 Demulsificante**

Aumenta la rapidez de separación del agua que contamina al aceite, subiendo la tensión superficial para obtener gotas grandes de agua, facilitando su separación y decantación.

# CAPÍTULO 3

## 3. TRIBOLOGIA

La palabra Tribología proviene del griego tribos “frotamiento” y logos “estudio”, con lo que se define a la Tribología como la ciencia del estudio de la fricción.

Esta ciencia investiga la interacción entre dos superficies en contacto y en movimiento relativo, interacción que se manifiesta como fricción y está relacionada en forma implícita con el desgaste mecánico.

La definición del Diccionario de la Lengua Española 2005, Espasa Calpe S.A. Madrid. Define a la Tribología como la técnica que estudia el rozamiento entre los cuerpos sólidos, con el fin de conseguir un mejor deslizamiento y un menor desgaste de los mismos.

La STLE expresa como definición de Tribología, a la ciencia y tecnología que estudio la interacción de las superficies en movimiento relativo, así como los temas y prácticas relacionadas.

La ciencia Tribológica o Tribología centra su estudio de tres fenómenos físicos, que son: 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.

### **3.1 Fricción**

La fricción se define como la resistencia al movimiento durante el deslizamiento o rodamiento que experimenta un cuerpo sólido al moverse tangencialmente sobre otro con el cual esta en contacto. Esta fuerza tangencial de resistencia que actúa en dirección directamente opuesta a la dirección del movimiento se conoce como fuerza de fricción.

Existen dos tipos principales de fricción: fricción estática fricción dinámica.

La fricción como tal no se considera una propiedad del material que conforma los elementos sólidos, sino una respuesta del sistema.

Los factores que condicionan la fricción son:

- Estado de las superficies.
- Zonas de contacto superficial.
- Efectos de la carga.

Para verificar el estado de las superficies es necesario tomar una micrografía de ampliación de superficie o utilizar un medidor de perfil, para obtener el detalle de la misma.

### **3.2 Desgaste**

El desgaste es el daño de la superficie o remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo, ya sea por deslizamiento, rodamiento o impacto.

Durante este movimiento relativo, primero, el material en la superficie de contacto es desplazado por que las propiedades del sólido, al menos en o cerca de la superficie, se alteran, pero muy poco o nada de material se pierde. Posteriormente, el material puede ser removido de la superficie, resultando en transferencia a la otra superficie, o también, se puede perder como una partícula del desgaste.

Al igual que la fricción, el desgaste no es una propiedad del material, sino que es una respuesta del sistema.

Los principales tipos de desgastes son los siguientes:

- Adhesivo, provocado por el contacto metal-metal, transferencia metálica y micro soldaduras.
- Abrasivo, se produce por el rayado con partículas duras gruesas, erosión por partículas duras finas o transportadas por el fluido en contacto.
- Corrosivo, producido por alteración de las superficies por ataque químico.
- Por Cavitación, es la formación de cavidades por rotura explosiva de burbujas en el fluido transportado.
- Eléctrico, producido por picaduras eléctricas, erosión por chispas, corrosión galvánica o ataque electrolítico.
- Socavadura, que se produce cuando elementos de desgaste atacan la superficie generando hendiduras por las pérdidas de material.

### **3.3 Lubricación Hidrodinámica**

El deslizamiento entre superficies sólidas se caracteriza generalmente por un alto coeficiente de fricción y un gran desgaste debido a las propiedades específicas de las superficies (Acabado superficial y materiales). La presencia de una capa de material diferente en la interfase no puede ser garantizada durante el proceso de deslizamiento, por lo tanto, se aplican aceites para disminuir la fricción y por consiguiente el desgaste.

El término lubricación se aplica a dos situaciones: La lubricación sólida y la lubricación de película de fluido (Líquido o gaseoso). Para el caso de la lubricación por película de fluido se definen dos tipos: Lubricación Hidrostática que es la que se produce por un sistema de lubricación a presión y la Lubricación Hidrodinámica que se produce al ser arrastrada por la superficie móvil en régimen laminar.

Para que se produzca una película hidrodinámica, es necesario revisar los siguientes factores:

- Viscosidad del aceite, en términos reales mientras mayor es la viscosidad del aceite, más rápido se formará.
- Velocidad de rotación, mientras mayor es la velocidad, más fácilmente se forma.
- Carga sobre el cojinete, a mayor carga se vuelve más difícil que se forme.
- Grado de acabado superficial, dependiendo del acabado de las superficies, la película puede ser gruesa o delgada.
- Alimentación de aceite, debe ser continua y abundante.



# CAPÍTULO 4

## 4. PARÁMETROS DE CONTROL DE ACEITE USADOS

Los aceites son fabricados para desempeñar varias funciones tales como reducción de la fricción y desgaste, transferencia de potencia, control y remoción de contaminantes, protección de equipos ante la acción de agentes externos como humedad y ácidos, entre las principales acciones que pueden realizar.

En función a estos procesos, se realiza el control de los aceites usados para obtener información de las condiciones de trabajo de los equipos y de la vida útil del aceite. En algunas aplicaciones un aceite envejecido o deteriorado, puede provocar daño en la maquinaria en vez de protegerla.

En otros casos la excesiva contaminación o la degradación química generan problemas, por lo que la forma más efectiva de detectar estos problemas es realizar un análisis del aceite, que nos permite identificar

causas del proceso de degradación del aceite o nos indica en donde debemos empezar a investigar.

A partir del análisis en laboratorio de los parámetros de control de los aceites, se puede tener una idea del funcionamiento y desempeño de la maquinaria que se encuentra lubricada además de los resultados de operación del aceite.

Todas las operaciones de análisis de las muestras de aceite usado se realizan a partir de procedimientos estandarizados, que son aplicados para el control de aceite usado en motores de combustión interna, en los que se detalla la manera en que se deben evaluar los aceites dependiendo del parámetro que se desee medir.

Como parámetros de control, cada fabricante de aceites determina sus valores esperados, entre los cuales un aceite al final de su trabajo se debe encontrar en condiciones de seguir operando sin ser generador de fallas o de problemas operativos en el motor, por lo que emite una carta de control en la que definen los valores límite para el seguimiento de la operación del equipo.

Estos valores se hallan refrendados con la mayoría de diseñadores y fabricantes de equipos, ya que a partir del desempeño del aceite en

pruebas controladas se pueden obtener las aprobaciones de utilización por parte de los fabricantes de motores y maquinaria.

Las muestras de aceite recolectadas son remitidas al laboratorio del fabricante del aceite, para realizar los análisis preliminares que se hicieron en el aceite y comprobar los resultados, adicionalmente se realizan pruebas adicionales que nos ayudan a determinar el comportamiento del aceite dentro de la máquina, y se comprueba a partir de la espectro fotogrametría atómica la presencia de los metales de desgaste en partes por millón y tener un dato medible del desgaste producido en el equipo y como se esta presentando. Con el uso de la estadística se puede determinar patrones de seguimiento para estimar el comportamiento del aceite en función a las horas de operación en cada motor.

Las siguientes son las pruebas que se realizan en el laboratorio para verificar el desempeño del funcionamiento del aceite usado:

- Viscosidad a 100°C
- Insolubles en membrana de 1.2  $\mu\text{m}$ . en hexano ( % peso )
- TBN ( mg de KOH )
- Agua ( % peso )
- Dilución por combustible ( % peso )
- Oxidación, A./cm.
- Metales de desgaste ( Partes por millón )

Con el conjunto de los datos obtenidos en el laboratorio se puede tener una idea del funcionamiento de los motores al revisar el estado de la acumulación de los metales de desgaste en el aceite, además de saber como se encuentra la salud del aceite, que nos permite saber si puede seguir funcionando o ya se encuentra en un nivel de deterioro o degradación que no permite recomendar que se continúe su utilización por más tiempo en el equipo. Esto se logra a partir de la interpretación de los resultados obtenidos.

#### **4.1 Viscosidad**

La viscosidad representa la medida de la resistencia a fluir de un aceite a una temperatura determinada, y se representa en CENTISTOKES (cst.) que es la unidad de medida de la viscosidad en el Sistema Internacional. Esta medida es la mayormente utilizada por los fabricantes de aceites para medir la viscosidad de sus productos.

Para referencia en la medida de la viscosidad, un CENTISTOCKE es aproximadamente la viscosidad del agua a condiciones de presión y temperatura atmosféricas medida a la temperatura estándar de 15 °C.

El principal valor que se mide al analizar los aceites en el laboratorio es la viscosidad, debido a que representa la consistencia del aceite, y se

considera el principal indicador del desempeño del mismo. La viscosidad de un aceite varía en función a la presión y a la temperatura, pero en los análisis de aceite solamente se considera el efecto de la temperatura para verificarla.

La viscosidad se mide tratando de evaluar su trabajo a temperatura real de operación, por lo que en los casos de los aceites correspondientes a motores de combustión interna se realiza la medición a 100°C, que es la temperatura más parecida al del depósito de aceite de un motor de combustión interna, y cuando se refiere a los aceites de cualquier otro tipo de aplicación se realiza la evaluación a 40°C.

En la mayoría de motores en nuestro medio, que navegan entre los Trópicos de Cáncer y Capricornio, se utiliza la viscosidad SAE 40, estos motores fueron diseñados para trabajar eficientemente entre cierto rango de viscosidad final del aceite a la temperatura de operación, la cual en función de la temperatura ambiente promedio de nuestro país se logra con la utilización de aceites de viscosidad SAE 40.

A partir de estas consideraciones, el tipo de aceite que se utiliza debe tener condiciones mínimas para continuar operando hasta el final de su trabajo programado. En el caso de la viscosidad esta debe permanecer entre 12.0 y 18.0 centistokes a 100°C durante toda la vida útil del aceite,

haciendo continuas verificaciones para ver si se mantienen las condiciones de operación.

Para cada producto existen límites de control para la viscosidad, estos límites están fijados principalmente por el grado SAE al que corresponde cada aceite, es necesario que se establezca que para los aceites de motor se utiliza los grados SAE para diferenciarlos y para los aceites de uso industrial en otras aplicaciones que no sean motores de combustión interna se utilizan los grados ISO.

## **4.2 Insolubles**

Con este parámetro se mide la cantidad de elementos insolubles en pentano y hexano que se encuentran presentes en el aceite usado de motor.

Los insolubles son una medida de la presencia de elementos no solubles en solvente y que son obtenidos de una muestra de aceite al filtrarse en una membrana con 0.3  $\mu\text{m}$  de tamaño de agujero. Los resultados nos indican la cantidad de presencia de elementos duros producidos por la combustión, como es el caso del hollín y de los lodos, los cuales no se disuelven en el solvente.

Cuando nos referimos al hollín o carbón residual este es producido por la combustión incompleta del combustible utilizado, que logra pasar la cabeza del pistón y anillos para llegar al aceite en donde es necesario que los aditivos dispersantes lo mantengan separado y disuelto en el aceite.

El indicador de insolubles disueltos nos permite tener una idea de la cantidad de sólidos que se pueden convertir en abrasivos si su cantidad aumenta de tal manera que los aditivos dispersantes en el aceite no los pueden mantener separados.

#### **4.3 TBN (Número Total Básico)**

Es la medida de la habilidad de un aceite para neutralizar los productos ácidos de la combustión tales como el ácido sulfúrico, que se forman por la mezcla de los anhídridos de azufre formado como resultado del contenido de azufre contenido en los combustibles.

El TBN representa la concentración básica del aceite, que le permite proteger al motor de la acción de los ácidos productos de la combustión, su medida indica el grado de reserva alcalina presente en el aceite, y refleja el comportamiento y del aceite en función del tiempo a medida que crece la acción y acumulación de los ácidos de la combustión.

El TBN se halla formado mayoritariamente por los aditivos detergentes y dispersantes, y la cantidad recomendada es directamente proporcional a la cantidad de azufre que se ponga en el motor a partir del combustible utilizado.

#### **4.4 Agua**

Los aceites pueden contener agua disuelta, emulsionada o en forma libre al trabajar en un motor de combustión interna, que ingresa ya sea por goteo del sistema de enfriamiento, condensación de humedad del aire que ingresa o contaminación directa por ingreso de agua al motor.

La cantidad del agua en el aceite dependerá del tipo de aceite, condiciones atmosféricas y de operación, o de las condiciones de trabajo del equipo tales como alta humedad.

Bajo condiciones normales de operación no se debería encontrar agua en ningún sistema de lubricación, pero en el caso de encontrarse las primeras acciones deben ser encontrar la vía de ingreso de la misma y el posterior drenaje de la carga de aceite contaminado.



#### **4.5 Dilución por Combustible**

Con este parámetro se mide el porcentaje de elementos volátiles disueltos en el aceite, que se presume que corresponden a la contaminación del aceite por combustible que pasa al cárter o que se introduce al motor por una mala combustión.

La dilución de combustible no debe ser superior al 5% en porcentaje de peso, ya que con esta cantidad de combustible es necesario drenar el aceite utilizado. Para niveles de alarma en el control de este parámetro no se debe permitir un porcentaje mayor del 3%.

#### **4.6 Oxidación**

Con este nombre se conoce el efecto que se produce por la mezcla del oxígeno con el aceite, lo cual genera que el aceite se oxide y cambie su estado de alcalinidad, ya que se generan ácidos débiles por la oxidación del aceite, que ocasiona que la acidez en el producto aumente y disminuya vida útil al aceite.

Los productos complejos que se generan por la oxidación incluyen largas cadenas moleculares insolubles que contribuyen al problema de formación de lodos y barnices en el motor. Estas largas cadenas moleculares

adicionan restricción al desplazamiento de las capas laminares del aceite, generando un efecto de aumento de la viscosidad.

Este parámetro se mide en unidades de Absorbancia por centímetro, y en el caso de los motores de combustión no debe ser superior a 25 unidades de absorbancia por cm.

#### **4.7 Metales de Desgaste**

Las máquinas o motores diesel generan microscópicas partículas de desgaste durante el curso de su vida operativa, ya que a pesar de la acción de los aceites para proteger las superficies, el esfuerzo mecánico generado provoca el contacto de las superficies, genera pérdida de material.

Este proceso se produce por deformación o remoción de materiales sobre superficies en las que interactúan componentes, tal es el caso de engranajes, rodamientos, cojinetes, cilindros, árboles de levas y pistones.

El análisis de la forma de las partículas de desgaste, tamaño, concentración provee información importante, que se puede asociar a los elementos metálicos en los que se produce el desgaste.

Cuando un equipo es reparado este generalmente tiene un periodo de puesta en marcha o afinamiento, durante el cual se produce un

asentamiento entre los elementos mecánicos ayudados por la acción de un aceite que permite que la rugosidad de las superficies maquinadas se rebaje hasta alcanzar un ajuste adecuado entre los elementos mecánicos. Durante este periodo el tamaño de las partículas de desgaste generadas son relativamente grandes y largas, y la tasa de generación de partículas de desgaste se incrementará rápidamente hasta un pico máximo y bajará de la misma manera.

Una vez que el equipo ha pasado este periodo de asentamiento, le seguirá un largo periodo de desgaste normal o controlado. Durante el desgaste normal las partículas generalmente deberán ser menores a los 10 micrones en tamaño, por lo que en este tamaño de partícula se concentra la medición del desgaste producido y que nos permitirá evaluar la operación del equipo.

El control de los metales de desgaste, se considera el parámetro de seguimiento más importante después de la viscosidad, ya que nos da una idea del desempeño y desgaste de la maquinaria.

Al chequear el conjunto de resultados nombrados anteriormente, la evaluación de los aceites usados puede determinar con un nivel de seguridad bastante alto, que los equipos que se encuentran bajo el servicio de control de aceites usados están funcionando correctamente.

# CAPÍTULO 5

## 5. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS MOTORES DIESEL MARINOS

### 5.1 Características Principales del Buque Atunero Objeto del Estudio

En los actuales momentos la flota pesquera del Océano Pacífico Oriental se halla en un proceso de mejora de eficiencia y control de gastos, que se encuentra acentuado por los precios internacionales del atún y sobre todo por los largos periodos de pesca que se tienen al momento, para lograra la captura suficiente de pescado para llenar las bodegas de almacenamiento de sus unidades y poder retornar al puerto.

La subida del precio de los combustibles en el mercado internacional, así como de los aceites obliga a los operadores de las embarcaciones pesqueras a reducir los costos operativos, para mejorara el rendimiento de sus unidades.

Para el desarrollo del trabajo se toma como elemento de estudio a un barco pesquero con capacidad de captura de 1200 toneladas métricas de pescado. Es un barco pesquero construido en España con equipos y sistemas de pesca para realizar faenas de hasta 3 meses.

El sistema de pesca utilizado es el de cerco, que es utilizado principalmente para la captura de túnidos, utilizados en la elaboración de conservas y empacados.

Las medidas principales de la embarcación son las siguientes: 75 m. de eslora, 14 m. de manga y 7 m. de puntal, con un tonelaje de registro de 2,500 toneladas.

La embarcación debe tener una velocidad superior a 9 nudos, que permite desplazar el barco con la rapidez necesaria y alcanzar los cardúmenes de peces que se encuentran en la mar.

Cuenta con un sistema de propulsión a partir de dos motores Echevarria 16V23L-VO que entregan 2450 hp. cada uno, estos motores se conocen como Máquina Principal de Babor y Máquina Principal de Estribor respectivamente.

El sistema de generación de energía eléctrica se realiza a través de dos generadores acoplados a motores diesel, ubicados en la parte inferior de la

proa del barco a cada lado del mismo. El Generador Auxiliar de Babor utiliza un motor Echevarria 6T23LH, mientras que el Generador Auxiliar de Estribor utiliza un motor Burmeister & Wain 8T23LH. Estos generadores se conocen como Generadores de Babor y de Estribor respectivamente.

Todas las máquinas anteriormente nombradas son refrigeradas por agua en un circuito cerrado de enfriamiento de agua dulce, que tiene un intercambiador de calor en paralelo, con un sistema de recirculación de agua salada.

Las máquinas principales como los motores de los generadores mantienen depósitos de aceite con sistemas de recirculación, acoplados a centrifugas de aceite, que nos ayudan a remover la mayoría de residuos sólidos y agua disueltos en el aceite.

La mayor parte de los contaminantes se hallan representados por el hollín generado por una deficiente combustión y lodos que se producen por la mezcla de agua de condensación o goteo interno del motor con residuos sólidos, generalmente silicio que se encuentra en el polvo ambiental del aire que absorbe el motor para la combustión.

En el gráfico 4 se muestra el diagrama de operación del sistema de circulación de aceite, y los elementos principales que lo conforman.

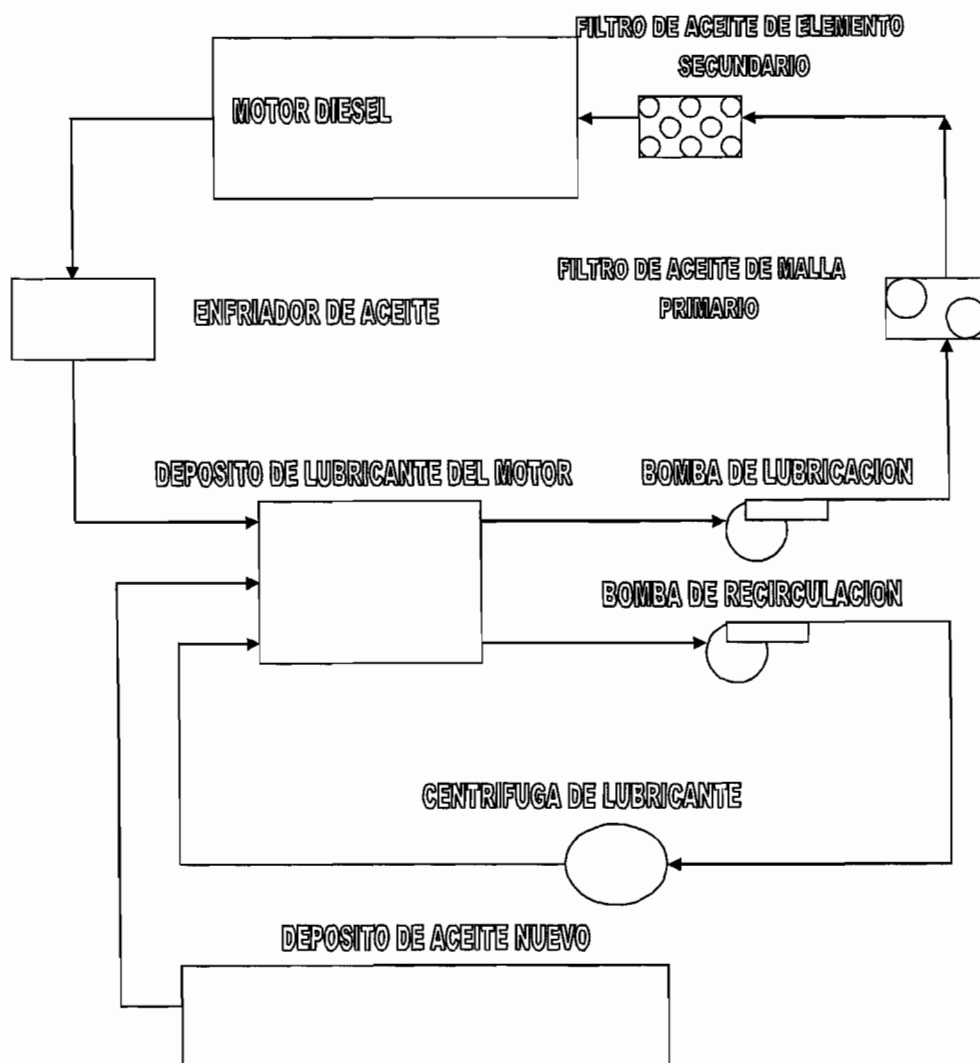


FIGURA 5.1 ESQUEMA SISTEMA DE CIRCULACIÓN DE ACEITE

## 5.2 Características Principales de los Motores Marinos de nuestro Buque Pesquero

Los motores que se encuentran en el buque pesquero correspondiente al estudio se encuentran en el esquema adjunto.

## Motores Principales Babor y Estribor

Las máquinas principales del barco o máquinas de propulsión son motores Echevarria 16V23L-VO de 2450 hp. cada uno, de fabricación española con licencia de Burmeister & Wain. Estos motores fueron fabricados en el año 1980 para la construcción de la embarcación y fueron instalados directamente en el astillero que fabricó la embarcación.

Las horas trabajadas promedio año para cada máquina principal están por el orden de 6000 horas/año, con una disponibilidad de equipo de un 90% para realizar las tareas de pesca, ya que si el equipo presenta problemas, primero se realizan las reparaciones en puerto antes que vuelva a salir de pesca.

El estimado de trabajo año se determinó con un promedio de 5 entradas a puerto con viajes de pesca 65 días en la mar.

Características del motor.

Tipo:	16V23L-VO.
Número de cilindros:	16
Diámetro del cilindro:	225 mm.
Carrera:	300 mm.
Velocidad:	800 / 825 r.p.m.



Potencia:	2320 / 2552 c.v.
Presión de aceite después del filtro con motor caliente y carga normal:	3.0 – 4.0 Bar
Temperatura del aceite antes del enfriador con motor caliente y carga normal:	65 – 70 °C
Camisa nueva, diámetro interior:	225.000 – 225.046 mm.
Camisa desgastada, debe reponerse a:	226 mm.

### **Motor Auxiliar Babor**

Las máquina auxiliar de babor del barco o equipo de generación de babor es un Echevarria 6T23LH de 1150 hp., de fabricación española con licencia de Burmeister & Wain. Este motor fue fabricado en el año 1980 para la construcción de la embarcación y se instaló en el astillero que fabricó la embarcación.

Características del motor.

Tipo:	6T23LH
Número de cilindros:	6
Diámetro del cilindro:	225 mm.
Carrera:	300 mm.
Velocidad:	1200 r.p.m.
Camisa nueva, diámetro interior:	225.000 – 225.046 mm.

Camisa desgastada, debe reponerse a: 226 mm.

Las horas trabajadas promedio año para este motor están por el orden de 7000 horas/año, con una disponibilidad de equipo de un 90% para proporcionar energía a la embarcación cuando realiza tareas de pesca y control de temperatura en las cubas de almacenamiento de pescado a través del sistema de refrigeración del barco.

El estimado de trabajo año se determinó con un promedio de 300 días trabajados año.

### **Motor Auxiliar Estribor**

Las máquina auxiliar de estribor del barco o equipo de generación de babor es un Burmeister & Wain 8T23LH de 850 hp. Este motor fue fabricado en el año 1980 para la construcción de la embarcación y se instaló en el astillero que fabricó la embarcación.

Características del motor.

Tipo:	8T23LH
Número de cilindros:	8
Diámetro del cilindro:	225 mm.
Carrera:	300 mm.

Velocidad:	1200 r.p.m.
Camisa nueva, diámetro interior:	225.000 – 225.046 mm.
Camisa desgastada, debe reponerse a:	226 mm.

Las horas trabajadas promedio año para este motor están por el orden de 7000 horas/año, con una disponibilidad de equipo de un 90% para proporcionar energía a la embarcación cuando realiza tareas de pesca y control de temperatura en las cubas de almacenamiento de pescado a través del sistema de refrigeración del barco.

El estimado de trabajo año se determinó con un promedio de 300 días trabajados año.

Debido a la edad del buque no se mantenía el libro de especificaciones de las máquinas auxiliares en el departamento de máquinas, lo que no nos permitió obtener los datos adicionales correspondientes a los auxiliares.

En función a la información técnica de las partes mecánicas que nos facilitó el Jefe de Máquinas del barco, se confirmó que el tamaño de las camisas de los cilindros de las máquinas auxiliares corresponde a las mismas dimensiones de las camisas de las máquinas principales.

# CAPÍTULO 6

## 6. PROCESO DE DIAGNOSTICO

### 6.1 Descripción de la Unidad

Para la tomar las muestras de aceite usado utilizado se usa una bomba de succión. Esta bomba se complementa con una manguera sanitaria de  $\frac{1}{4}$ " que nos permite al introducirla por el tubo que contiene la varilla de medida de aceite o lanceta, para extraer el aceite del depósito principal del motor que se está muestreando sin necesidad de detener la operación del equipo.

Acoplado a la bomba de succión se coloca un envase de aproximadamente 200 mililitros ubicado en la parte inferior del equipo, en el cual se recoge la muestra de aceite usado.

En la figura 6.1 se muestra la bomba de succión que se utiliza para tomar las muestras de aceite.

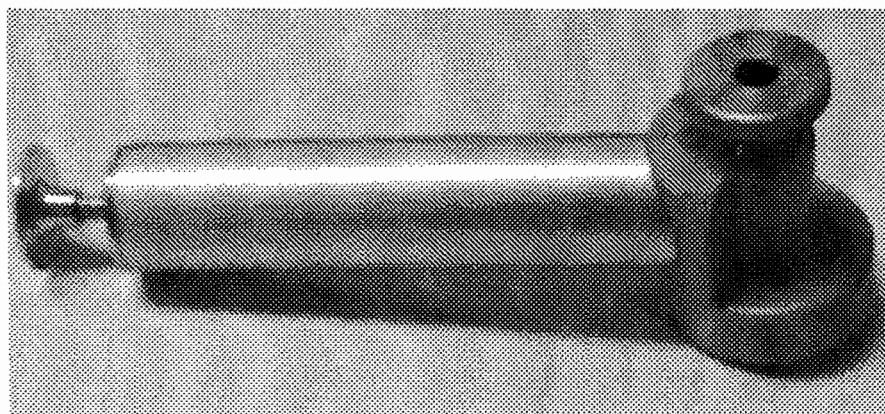


FIGURA 6.1 BOMBA DE SUCCIÓN

## 6.2 Toma de las Muestras

Como parte principal del sistema de control de contaminantes a partir del chequeo de aceite usado, iniciamos con la toma de muestras de aceite en los motores diesel para remitir las mismas al laboratorio y poder determinar sus condiciones físico - químicas, conjuntamente con los niveles de presencia de los metales de desgaste.

El proceso de toma de muestras de aceite usado se comenzó con la recolección de muestras cada vez que la unidad llegaba a puerto.

En nuestro caso de estudio, primero se realizaba seguimiento con muestras de aceite usado cada vez que la embarcación regresaba a

puerto, lo que no nos permitía tomar muestras con el mismo periodo de trabajo debido a los diferentes tiempos en faena de pesca del barco.

A mediados del año 1999 se logró que el personal de máquinas del barco entienda la importancia del programa de control de aceites usados y los beneficios que se pueden lograr, con el correcto seguimiento de las condiciones de operación a partir del chequeo de las muestras de aceite en laboratorio.

Al tomar las muestras de aceite en cada drenaje de aceite de los motores, logramos obtener una muestra representativa, que contiene la mayor parte de los contaminantes presentes en el motor y sobre todo la acumulación de los metales de desgaste.

La toma de las muestras para realizar los análisis se realiza normalmente por el personal del barco, en periodos determinados conjuntamente con anticipación, normalmente se toman muestras de aceite al finalizar su tiempo programado de trabajo, pero existen equipos que por el tamaño del depósito de aceite se requiere que se tomen muestras adicionales en periodos de tiempo intermedios al drenaje del aceite.

Adicionalmente cuando el barco se encuentra en puerto en algunas ocasiones se toman muestras adicionales en los motores que se esta

realizando el seguimiento o que se presume que su operación no se encuentra del todo satisfactorio.

En lo que se refiere a la toma de muestras de aceite usado, se siguen los siguientes puntos para verificar que la muestra tomada represente con la mejor aproximación a la cantidad de aceite que se encuentre circulando en el motor:

- La muestra de aceite se debe tomar cuando el motor se encuentre en su temperatura de operación.
- En caso que se realice el drenaje de aceite usado y se tome la muestra, el tiempo máximo para la toma de la muestra no debe superar la media hora posterior al que se ha detenido la operación del equipo. En estas condiciones se mantienen en suspensión los elementos contaminantes del aceite, lo que permite su detección en el laboratorio al realizar el análisis de aceite usado.
- Los instrumentos utilizados para la toma de muestra de aceite usado se deben encontrar limpios y libres de humedad para no contaminar el aceite que se está tomando.
- Para realizar un seguimiento real entre muestra y muestra de aceite, la toma de la muestra se debe tomar siempre en el mismo lugar del motor.
- Los lugares recomendados para la toma de aceite usado son: drenaje o tapa de fondo del cárter, en la línea de aceite antes del

filtro purificador, en la línea de aceite antes de la bomba de succión del producto, a través del conducto que contiene la sonda de medición del nivel de aceite en el cárter del motor.

- En ciertos motores de cárter seco o sin depósito en el motor, la muestra de aceite usado se tomará de la parte inferior del depósito una vez que el aceite logre su temperatura de operación y que se encuentre en el motor por más de media hora trabajando. En este caso se debe tener en cuenta, que la muestra se debe tomar tratando de utilizar algún punto de recolección lo más cercano del punto de ingreso de aceite después de trabajar en el motor.

En la figura 6.2 adjunto se encuentra un diagrama del sistema de lubricación del motor y sus sistemas accesorios en el que se muestran los puntos de muestreo recomendados para tomar una muestra representativa del sistema.



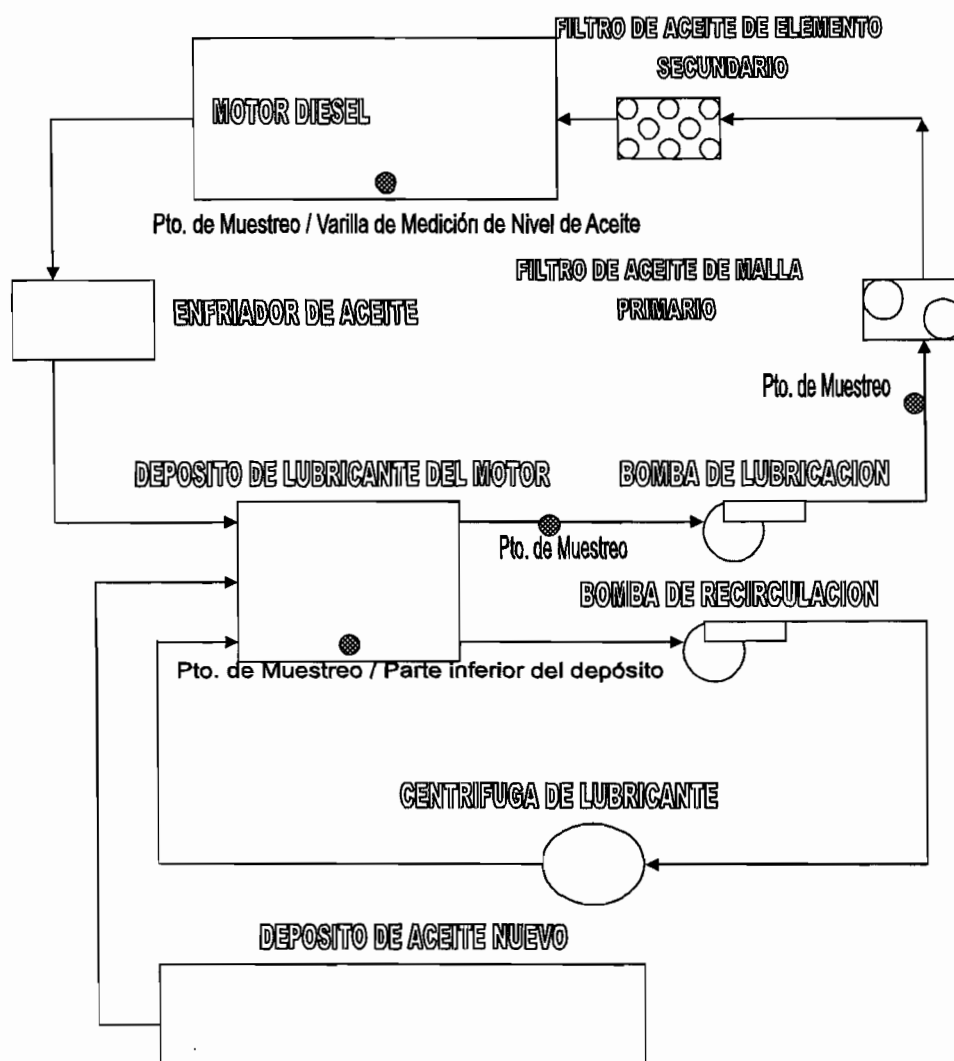


FIGURA 6.2 PUNTOS DE MUESTREO DE ACEITE

Es recomendable para no cometer errores en la toma de muestras de aceite, y que provoquen que se obtenga resultados que no representen el estado del aceite en circulación, que se evite tomar muestras en las siguientes situaciones:

- a) En la línea de aceite después del filtro de purificación, en el caso de tener centrífugas de aceite para separación de sólidos, agua y hollín, después de haber sido purificado en las mismas.
- b) En una línea de lubricación después de pasar por un enfriador de aceite.
- c) En la superficie o espejo de aceite usado cuando se encuentra en reposo y sin temperatura.
- d) Cuando el aceite no se encuentre mezclado en su totalidad dentro del motor.
- e) Cuando el tiempo de toma de muestra es posterior a una hora del apagado del motor.
- f) Que se tome una muestra de aceite del depósito de aceite usado del drenaje de fondo, sin dejar salir primero unos 100 cc. de aceite usado antes de tomar la muestra de aceite.
- g) En lo que se refiere al proceso de toma de muestra de aceite a partir de la bomba de succión recomendada para la recolección del aceite, las principales recomendaciones de toma de muestras son las siguientes:
  - o Cortar la parte inferior de la manguera (parte que se introduce dentro del cárter o depósito de aceite a través del orificio de la lanceta del aceite) en un ángulo de 45 grados, para permitir reducir el riesgo de tomar lodos del fondo de los mismos.

- En el tubo de succión utilizar materiales con resistencia a la temperatura para no correr el riesgo que se derritan al realizar la toma de la muestra.
- Siempre tomar muestras con mangueras limpias y libres de contaminantes para evitar que se obtengan resultados inadecuados debidos a mal muestreo.
- Limpiar los sellos de caucho de la bomba de succión debido a que los restos de aceite que se quedan en la bomba pueden producir el reblandecimiento y desgaste de los mismos.

### 6.3 Evaluación Sensible

La evaluación sensible es un proceso de análisis de las muestras recibidas en las que se evalúan los siguientes elementos:

- Apariencia Visual
- Viscosidad
- Agua por Crepitación (2)
- TBN

---

(2) Crepitación: Sonido similar al que se produce cuando se echa sal al fuego o cuando se arruga papel. Sonido del agua en ebullición al ser expuesta la muestra de aceite a una alta temperatura (Aprox. De 150°C. a 160°C.)

## **Apariencia Visual**

En la apariencia visual se determinan condiciones anormales en el aceite usado que son perceptibles a simple vista, en condiciones normales un aceite usado que proviene de una máquina que utiliza diesel como combustible presenta coloración negro oscuro opaco, el cual no contiene presencia de sólidos ni acumulación de hollín en suspensión, ya que la presencia de estos podría hacer presumir que existe una alta presencia de polvo y agua que al combinarse producen estos lodos o residuos que son visibles.

La presencia en una proporción alta de agua, cuando se habla de esto es cuando supera el 0.25% de agua en peso produce que el aceite usado empiece a cambiar su coloración de negro a café oscuro, y si la presencia de agua aumenta el color empieza tomar una coloración lechosa, la cual es producto de la emulsión que se esta realizando con el producto en la mezcla de agua mas aceite.

Cuando un aceite usado empieza a tomar una coloración negro oscuro brillante nos indica que se debe revisar la operación del equipo, ya que existe la presunción de que el equipo presenta calentamiento excesivo o existe trabajo deficiente del sistema de enfriamiento, porque cuando un aceite es expuesto a alta temperatura sufre un proceso de oxidación en el que gana oxígeno en abundancia, lo que produce que el aceite aumente su

viscosidad considerablemente, genere lacas y residuos duros los cuales conjuntamente con la oxidación del producto producen la coloración brillante que se puede apreciar en el aceite usado.

En ciertos aceites usados en los que se pueden registrar presencia de metales de desgaste como hierro, cromo, cobre, aluminio a simple vista, son evidencia de pérdida de material como parte de recubrimientos superficiales de partes mecánicas lo que indica que al equipo al que corresponda debe ser detenida su operación y revisar las causas de la presencia de estos metales en el aceite.

En algunos casos, aunque no se puede tener certeza de la cantidad, el olor a combustible indica la presencia del mismo en la muestra, lo que nos ayuda a tener una idea de la posible contaminación de la muestra.

## **Viscosidad**

Para la evaluación en campo, sin enviar la muestra a laboratorio, se depende de instrumentos de medición o comparación de la viscosidad, que permiten determinar de una manera sencilla si el producto puede continuar trabajando en el motor gracias a que mantiene sus condiciones operativas.

En este caso de evaluación, se utiliza un producto que tiene una viscosidad correspondiente al SAE 40.

Para determinar la viscosidad utilizamos viscosímetros manuales o de comparación, que permiten observar el tiempo de desplazamiento del aceite usado al descender sobre una superficie inclinada contra una muestra de aceite nuevo.

En la figura 6.3 se encuentra una foto del comparador de viscosidad que nos ayuda a determinar el estado de la viscosidad del lubricante usado.

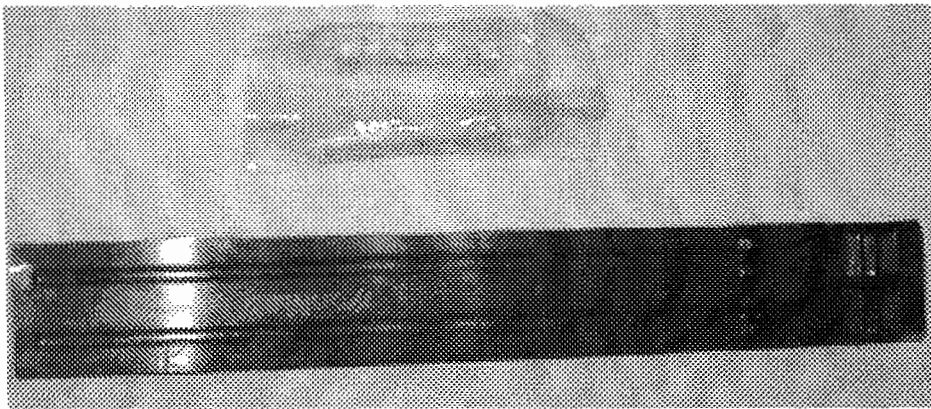


FIGURA 6.3 COMPARADOR DE VISCOSIDAD

En la parte superior se encuentran graduados los depósitos de aceite tanto nuevo como usado para realizar la comparación y los correspondientes canales, que al inclinar la regla de medición permiten descender los aceites y medir su estado.

En el canal correspondiente al aceite nuevo existe una marca, aproximadamente a  $\frac{3}{4}$  de la longitud de la misma, que es el punto hasta donde debe descender al aceite nuevo y se deja de tener inclinada la regla de medida, en otras palabras cuando el aceite llega a este punto se debe poner horizontal nuevamente para ver en que punto se encuentra el aceite usado.

En el canal correspondiente al aceite usado existen otras marcas, una inicial que determina la viscosidad máxima que puede tener un aceite y una final que determina la viscosidad mínima que puede tener un aceite de motor.

Este instrumento está diseñado para que al comparar las viscosidades del aceite nuevo contra el aceite usado, y que se encuentre al aceite usado dentro del rango de viscosidad permitido, se pueda considerar que el mismo se halla susceptible de uso y que pueda continuar su operación en función a la viscosidad que presenta, una foto se encuentra en la figura 6.4, en la que se puede ver el instrumento descrito.

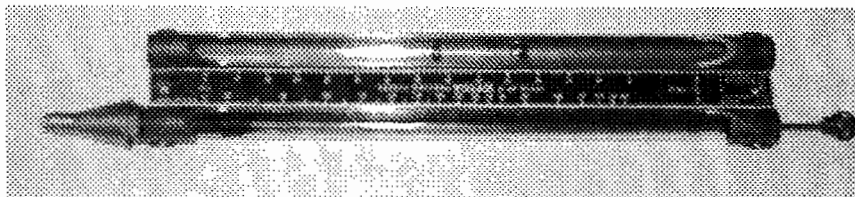


FIGURA 6.4 VISGAGE

Otra manera de establecer la viscosidad es utilizar un instrumento que se conoce como Visgage que compara la viscosidad de un aceite base contra la del aceite tomado al hacer descender un peso sobre cada uno de los productos y a partir de la caída del primero al llegar al final, se determina la viscosidad del segundo o aceite muestra.

Al utilizar este tipo de instrumento lo que se hace primero es cargar en el depósito correspondiente al aceite usado hasta llenarlo completamente a partir de halar el aceite con el émbolo que permite succionarlo hasta el depósito. Se inclina el instrumento hacia el lado izquierdo para hacer que las pesas de comparación de viscosidad se encuentren y avancen hasta el principio de la escala graduada. Se inclina aproximadamente a unos 30° y se espera hasta que la pesa del aceite base llegue hasta el final del recorrido, en este momento se pone el instrumento de manera horizontal para observar el lugar que tiene la pesa del aceite usado contra la escala graduada de viscosidad y se obtiene la viscosidad del producto.

Este es un procedimiento que se realiza a temperatura ambiente, por lo que los resultados obtenidos es necesario transformarlos en la viscosidad esperada a 100°C que es la temperatura de operación estimada de un aceite dentro de un motor de combustión interna.

En algunos viscosímetros analógicos existe paralela una segunda regla de lectura que tiene las viscosidades de los aceites a 40°C y 100°C tomando



como referencia para la conversión un índice de viscosidad de 90, ya que la mayoría de los aceites monógrados tienen índices de viscosidad que oscilan entre 85 y 100.

### **Agua por Crepitación**

El determinar agua por crepitación o agua a la plancha, es un efecto que se logra al calentar el aceite a una temperatura superior a 100°C, a esta temperatura el agua disuelta en el aceite se evapora rápidamente, y al producirse esta evaporación se produce ruido semejante a chasquidos, lo que es evidencia de la presencia de agua en el aceite. Con este efecto de sonido no se puede determinar la cantidad de agua presente, pero permite saber si se encuentra agua presente en la muestra de aceite.

Para que este fenómeno se produzca el aceite debe contener una cantidad superior a 0.05% de agua en peso, este es un procedimiento de rutina para determinar si la muestra de aceite contiene agua.

Por la facilidad de desarrollar este proceso sobre cualquier superficie caliente, se considera una prueba de campo que permite evaluar si existe sospecha de contaminación con agua, incluso antes de que el aceite pierda sus propiedades de lubricación.

En el caso de que se tenga indicios de presencia de agua, se toma una muestra pequeña de aceite ( 5 ml. ) en un envase cerrado con un lector de presión en un manómetro, se expone al hidróxido de calcio, al cual al estar en contacto con el agua libera el hidrógeno. El aumento de presión ocurrido es medido por el manómetro y se puede determinar de esta manera la presencia de agua en el aceite en porcentaje de peso de la muestra, ya que la presión revela la cantidad de agua disuelta.

Como límite máximo de presencia de agua se tiene 0.2% en peso, ya que una cantidad superior de agua altera las propiedades físicas del aceite y se puede tener problemas en el funcionamiento de la maquinaria.

## **TBN**

Al igual que en el caso de la obtención del porcentaje de agua, se procede con una muestra (5 ml.), para determinar el dato de presión se hace reaccionar con un solvente de tal manera que se libere el hidrógeno contenido en la reserva alcalina, y se mida en el manómetro la presión generada. El dato de la presión permite determinar por relación de presiones entre la muestra de aceite usada y de aceite nuevo, el estado de la reserva alcalina de la muestra.

## 6.4 Análisis de Laboratorio

Las muestras de aceite tomadas son remitidas al laboratorio, para realizar los análisis preliminares que se hicieron en el aceite y comprobar los resultados, adicionalmente se realizan pruebas adicionales que nos ayudan a determinar el comportamiento del aceite dentro de la máquina, y se comprueba a partir de la espectrofotogrametría atómica la presencia de los metales de desgaste en partes por millón y tener una idea del desgaste producido en el equipo y como se esta presentando.

Los siguientes son los nombres de las pruebas que se tienen en el laboratorio para realizar una evaluación del funcionamiento del aceite usado:

- Viscosidad a 40°C y 100°C
- Insolubles en membrana de 0.3  $\mu\text{m}$ . en hexano ( % peso )
- TBN ( mg. de KOH )
- Agua ( % peso )
- Dilución por combustible ( % peso )
- Oxidación, A./cm.
- Metales de desgaste y contaminación como: Hierro, Cobre, Sílice, Aluminio. En algunos casos se determinan Zinc, Cromo, Magnesio, etc.

A partir de los datos obtenidos en el laboratorio se puede tener una idea del funcionamiento de la máquina, del desempeño del aceite a través de la interpretación de los resultados obtenidos.

Para cada uno de los parámetros de control anteriormente citados existen límites de control, que nos ayudan a realizar la evaluación del producto. A continuación se detalla una breve guía de referencia de cada uno de los parámetros nombrados:

- **Análisis de la Viscosidad**

La viscosidad en los aceites usados de motor se evalúa por norma a 100°C, que es la temperatura que asemeja a la temperatura de operación dentro de un motor de combustión interna.

Para cada producto existen límites de control para la viscosidad, estos límites están fijados por el grado SAE al que corresponde cada aceite.

Los cambios de viscosidad que se pueden encontrar en los aceites usados son complejos, y dependen de diversos parámetros que en forma individual pueden aumentar o disminuir la viscosidad del aceite usado. En casos extremos la viscosidad del aceite usado puede ser igual a la del aceite nuevo, ya que se pueden cancelar los

efectos de subida y bajada de viscosidad mutuamente. En consecuencia es necesario tener mayor cantidad de información sobre otras características del aceite y poder interpretar su condición acertadamente.

Existen casos en que se evalúa la viscosidad a 40°C, cuando se sospecha de dilución por combustible disuelta en el aceite, pero oculta ante una alta presencia de hollín que produce el aumento de la viscosidad por la restricción al movimiento de las capas laminares de aceite que este ofrece.

La dilución con combustible prácticamente en todos los casos causa una reducción en la viscosidad del aceite. Como una regla de aplicación general, el motor no debe seguir funcionando con el aceite muestreado cuya viscosidad se haya reducido en aproximadamente o más de un 20% o haya descendido al grado SAE inferior. Si el aceite se diluye excesivamente, no podrá desarrollar la película hidrodinámica necesaria para que las piezas móviles funcionen sin problemas y con bajo nivel de desgaste al estar en contacto unas con otras.

No se debe permitir que la viscosidad aumente a más de aproximadamente el 20% de su valor original. Un nivel de viscosidad muy elevado es el resultado de la acumulación de contaminantes

durante largos periodos de cambio de aceite o un inadecuado nivel de filtración del aceite.

La contaminación producida por cualquier partícula sólida en el aceite usado provocará el aumento de la viscosidad del aceite. El principal caso de contaminantes que provoca este efecto, es la acumulación de hollín correspondiente a la quema incompleta del combustible utilizado.

- **Análisis de los Insolubles**

Los insolubles son una medida de la presencia de elementos no solubles en hexano y que son obtenidos de una muestra de aceite al filtrarse en una membrana con 0.3  $\mu\text{m}$ . de tamaño de agujero.

Los resultados nos indican la cantidad de presencia de elementos duros producidos por la combustión caso del hollín y de los lodos, los cuales no se disuelven en el solvente.

A partir de este procedimiento se remueven casi todos los componentes orgánicos presentes en la muestra de aceite en estudio, y se depositan solamente los componentes metálicos de los aditivos, restos de oxidación y carbón residual, al ser filtrados en una membrana de 0.3  $\mu\text{m}$ .

El parámetro de medición de aceite para nuestro caso es que la proporción de los insolubles presentes en el aceite no debe ser superior al 3% en peso.

La formación de depósitos en el motor es el resultado de someter a un aceite a las condiciones de operación del mismo. Estos depósitos son materiales insolubles del aceite que aumentan hasta el punto que no se pueden mantener en suspensión dentro del aceite que está circulando en el motor.

La mayor parte de estos depósitos son el resultado de la polimerización del combustible no quemado y de la oxidación del aceite al estar expuesto a temperaturas elevadas. Los depósitos adicionalmente pueden contener productos de la combustión, tales como polvo que lleva el aire utilizado, agua, óxidos metálicos y metales atacados por la corrosión.

Siempre es necesario el retardar la formación de depósitos para tener un rendimiento adecuado del motor. La forma más eficaz de prevenir que los depósitos formados o por formarse, es manteniendo los materiales que los forman con un tamaño lo suficientemente pequeño para que se mantengan en suspensión en el aceite sin producir daños en los equipos lubricados y evitar que se produzcan acumulaciones en alguna parte del motor.

Mientras mayor sea la capacidad de control sobre los insolubles, permitirá mantener a los motores más limpios durante periodos largos. Para realizar este propósito se utilizan combinaciones de detergentes y dispersantes sin ceniza.

Los aditivos dispersantes sin ceniza, logran dispersar los materiales formadores de depósitos, mediante procesos físicos y químicos complejos. Estos procesos previenen la precipitación de los materiales formadores de depósitos en forma de sedimentos, formando una película sobre las partículas muy pequeñas, retardando así la aglomeración de las mismas. Estas partículas controladas generalmente tienen tamaños inferiores a las 0.02 micras.

La razón principal de revisar en el análisis de aceite usado la prueba de insolubles, es la de establecer la vida útil del aceite en los motores, ya que nos ayuda a determinar la carga de contaminantes disuelta y sobre todo al realizar seguimiento a la concentración de los mismos se puede evaluar el desempeño del equipo estudiado.

- **Análisis del TBN**

El TBN o resistencia alcalina del aceite se determina en laboratorio a partir de la neutralización de la base alcalina, y a través de este



proceso se determina la cantidad de mg. de KOH que son necesarios para igualar la alcalinidad de la muestra. Otro método comúnmente utilizado para la determinación del TBN es la titulación de la muestra de aceite que nos permite saber el estado de la reserva alcalina por la coloración de la muestra de aceite.

El TBN de un aceite puede ser utilizado como medida de la reserva de aditivo en remanente o en disponibilidad para ser utilizada. Esta reserva nos permite determinar si el desempeño del aceite es adecuado y sobre todo si es posible que el aceite en el motor esta en capacidad seguir trabajando.

Como el aceite actúa contra los productos ácidos que se forman en la combustión los aditivos que se tienen en la reserva alcalina se van agotando poco a poco, y como consecuencia en algún momento del periodo de trabajo la reserva cae a tal punto que no es posible que el aceite siga funcionando. En estos casos para recuperar la reserva alcalina o hacer que suba es necesario el adicionar aceite nuevo al usado.

Una baja reserva alcalina puede ser asociada a una combustión pobre en la que no se este quemando adecuadamente el combustible utilizado. Otra razón puede ser un excesivo paso de gases de combustión a través de los costados del pistón, que puede

generar una atmósfera con alta concentración de gases de combustión con naturaleza ácida sobre el cárter del motor. Existen también casos en que los motores son de alta eficiencia con un muy bajo consumo de aceite, que provoca que la reserva alcalina baje de una manera acelerada al no tener una nueva adición de aditivación del aceite con el relleno del mismo.

Para el control adecuado del TBN en las aplicaciones de motores de combustión, se realiza seguimiento para evitar que el punto de trabajo del TBN baje de un valor equivalente a la mitad del original.

- **Análisis del Agua**

Se procede a medir la cantidad de agua en peso de las muestras obtenidas, por lo que al realizar este análisis para la comprobación de presencia de agua en el aceite, la cantidad máxima de agua disuelta en el aceite no debe ser superior a 0.3% en peso, ya que en condiciones de mayor presencia provoca la falla de la película que protege a los elementos mecánicos de los motores.

Para la determinación de la cantidad de agua se realiza una exposición de una muestra del aceite a una luz infrarroja, que en un instrumento sensible a la longitud de emisión de ondas puede determinar la cantidad de energía reflejada en función de la longitud

de onda al atravesar la muestra, este proceso nos identifica la huella digital de un aceite, que contiene la información de los componentes que se encuentran diluidos en la muestra de aceite usado.

A partir de la muestra patrón del aceite original se puede determinar las diferencias contra la muestra de aceite usado, y como todos los elementos químicos tienen diferentes emisiones en diferentes longitudes de onda se puede determinar el tipo de componente que contamina al aceite y su cantidad. De esta manera se determina la cantidad de agua presente en el aceite, ya que el pico correspondiente al elemento agua se puede medir, y en función a la cantidad de energía que se reflejó, se puede determinar la cantidad de agua disuelta en porcentaje de peso.

Como segundo método para descartar la presencia de agua en una muestra de aceite, se utiliza el craqueo o método de Karl Fischer, en éste método la sensibilidad de la prueba nos permite reconocer si hay agua a partir de una concentración de 0.05% de agua en peso o 500 ppm.

El aceite puede contener agua en varias formas tales como disuelta, emulsionada o en forma libre. Mientras que el agua libre o en gotas es nuestra mayor preocupación al realizar un análisis de aceite, el efecto que puede tener el agua en los elementos mecánicos tales

como los rodamientos puede comenzar a ocurrir mucho antes de que el aceite tome una apariencia opaca u oscura.

La cantidad de agua en el aceite depende de las condiciones atmosféricas y de operación, o las condiciones del lugar donde se encuentren los equipos tales como la humedad.

Bajo condiciones normales de operación no debería haber agua libre en un sistema de lubricación, por lo que es uno de los principales contaminantes que se desea controlar para evitar daños en los equipos, y sobre todo evitar fallas en los elementos mecánicos causadas por la corrosión.

En los motores, la contaminación por agua puede deberse a fugas en el sistema de enfriamiento, fallas en sellos del sistema o fallas en las empaquetaduras de los cabezotes. En los equipos que utilizan anticongelantes o inhibidores de corrosión, se puede buscar rastros de estos elementos en el aceite usado para determinar que existe contaminación con agua, ya que si la cantidad es mínima en relación al depósito o cárter no es fácilmente detectable la fuga de agua.

La contaminación con agua en los aceites tiene un significativo efecto en las tasas de desgaste. En casos severos, los motores que tienen agua libre presente en forma de emulsión, pueden tener una

sería reducción de la vida útil de la maquinaria y el daño de los componentes mecánicos se acelera al perder el aceite su capacidad de protección.

- **Análisis de la Dilución por Combustible**

La dilución por combustible en porcentaje de peso se determina de la misma manera que en el caso del agua al exponer la muestra de aceite a una luz infrarroja, ya que en la evaluación de la muestra se revela la longitud de onda que identifica al combustible, y a partir de la intensidad se determina la cantidad del mismo.

Al realizar la comparación de la huella digital del aceite lo que se busca son los componentes altamente volátiles de los combustibles, que no son parte de los aceites, y por la medida de la presencia es éstos se puede determinar la cantidad de combustible presente.

Las principales causas de estos efectos son fugas en las líneas de combustible, inyectores sucios o trabados, fuga en los mecanismos de las bombas de transferencia de combustible, una atomización defectuosa, deficiencia en la bomba de inyección, o una incorrecta calibración del tiempo de inyección.

Generalmente la presencia de combustible en una muestra de aceite se demuestra fácilmente con la caída de la viscosidad de la misma. Pero existen excepciones, como tal es el caso de que la reducción de la viscosidad se encuentre compensada con la presencia de otros contaminantes como es el hollín; otro caso es que la viscosidad de la muestra no disminuya cuando la dilución por combustible se produce con combustibles cuya viscosidad final es cercana a la del aceite usado, este ejemplo se da en los casos que se trabaja con combustibles residuales de alta viscosidad que se utilizan en aplicaciones marinas y de generación eléctrica.

- **Análisis de la Oxidación**

La oxidación se determina en la cantidad de energía absorbida por la muestra en la exposición a la luz infrarroja, la mayor absorción de energía es debida a la presencia de elementos opacos a la luz, tal es el caso de los productos de la combustión que se hallan oxidados y que absorben gran cantidad de la energía radiada.

La oxidación es una medida de cómo se deteriora un aceite en servicio, al estar expuesto al oxígeno. Tal como el nombre lo sugiere, el proceso de oxidación de un aceite envuelve la reacción que tiene con el oxígeno. Cuando existen condiciones de alta

temperatura, este proceso se aumenta, al permitir acelerar el proceso de absorción de oxígeno.

El incremento de la oxidación genera un aumento del acidez del aceite y contribuye al a corrosión relacionada con el desgaste. En particular ataca a los metales que se encuentran en cojinetes planos o a los materiales de recubrimiento tal es el caso del cobre, estaño y plomo, en estos materiales se pueden encontrar los primeros síntomas de corrosión que provocan la migración de los materiales y por lo tanto aumentan el desgaste.

Las condiciones de alta temperatura y excesiva exposición al oxígeno a través de la ventilación o intercambio de aire pueden generar un aumento de la oxidación en los aceites.

La tasa de oxidación puede incrementarse a través de la presencia de contaminantes o de metales de desgaste, los cuales pueden actuar como catalizadores para incrementar las tasas de deterioro del aceite. Por ejemplo, partículas de desgaste de hierro y cobre en el aceite pueden incrementar la tasa de oxidación.

La tasa de incremento de la oxidación es mucho más importante que su valor absoluto, debido a que nos permite saber como se esta

comportando el aceite y sobre todo como se está deteriorando por el uso que se mantiene.

- **Análisis de los Metales de Desgaste**

En lo que se refiere a los metales de desgaste, estos representan el funcionamiento y operación del motor, con la representación del desgaste producido y los contaminantes que ingresan al mismo.

En un chequeo de las cartas de evaluación de aceites usados de los fabricantes de equipos e pueden tener los límites de desgaste normal permitido, por lo que si algunos de los elementos evaluados se sale de su rango máximo se puede tener una referencia del tipo de desgaste que se esta produciendo y del elemento mecánico que se encuentra en posibilidades de provocarlo.

Cuando los parámetros normales correspondientes a la tendencia de los resultados presentados por cada máquina son superados se puede saber antes incluso del momento en que se superen los límites permitidos de desgaste, cuales elementos son los que presentan el desgaste acelerado.

Una comparación entre el análisis inicial del aceite usado y los realizados periódicamente al lo largo de un periodo de servicio, nos ofrece la posibilidad de seguir la evolución de las condiciones



mecánicas del motor y sobre todo descubrir cualquier desgaste anormal.

Los elementos cuyas concentraciones se determinan más comúnmente en un aceite usado son las siguientes: Hierro, plomo, cobre, estaño, aluminio, plata y sílice.

En algunos casos se determinan Zinc, Cromo, Magnesio, etc. Cuando se desea inferir el comportamiento de algún elemento específico de la maquinaria.

A partir de la determinación y monitoreo constante de los parámetros señalados se puede tener una idea de las condiciones operativas de la maquinaria y del aceite.

En lo que se refiere a los metales de desgaste, estos representan el funcionamiento del motor y ciertos contaminantes. En un chequeo de las cartas de evaluación de aceites usados de los fabricantes de equipos se pueden determinar los límites de desgaste normal permitido, por lo que si alguno de los elementos evaluados se sale de su rango máximo de control, se puede tener una referencia del tipo de desgaste que se está produciendo o del elemento mecánico que se halla en posibilidades de provocarlo.

Un incremento brusco en el contenido de hierro se debe, frecuentemente, a un mayor desgaste de los cilindros y de sus elementos. Este aumento normalmente estaría asociado con un incremento del cromo en el caso de utilizar elementos cromados.

Un brusco aumento en el contenido de plomo, cobre, estaño o plata indica un excesivo desgaste de los cojinetes fabricados a base de uno o varios de estos elementos.

En otros casos un aumento anormal de la presencia de aluminio puede ser consecuencia del agarrotamiento o traba de un pistón.

En el caso del silicio, que puede repercutir en mayor o menor manera en el desempeño del desgaste en un motor por ser abrasivo, se debe a varias causas. La más común y perjudicial desde el punto de vista del desgaste, se debe al ingreso de polvo atmosférico en el motor, por fallas en el montaje de los filtros de aire o fallas en las empaquetaduras de los mismos, un periodo inadecuado de recambio y que puede mantener los filtros sucios, etc.

El criterio que se mantiene de vigilar la evolución de las concentraciones de los distintos elementos metálicos procedentes del desgaste, presentes en el aceite y cuando estas concentraciones alcanzan un valor superior a ciertos límites

prefijados (datos obtenidos por análisis estadístico de gran número de muestras), determinar y recomendar acciones correctivas a los responsables del manejo del equipo estudiado.

Este sistema es de gran eficiencia para los casos en el que el consumo de aceite es pequeño, pero se da el caso cuando el consumo es elevado, que las concentraciones aparecidas en un determinado periodo de tiempo no sea alarmante, al no estar presentes en el aceite todas las partículas procedentes del desgaste, debido a la cantidad de aceite consumido que arrastra a su vez las partículas que lleva en suspensión, por lo tanto el sistema puede estar sufriendo un deterioro considerable y éste no es detectado.

Para realizar este tipo de seguimiento se han venido utilizando normalmente espectrógrafos ya sea de emisión o de absorción atómica. Actualmente el sistema más recomendado y con mejor definición es el de emisión por plasma que nos permite mejorar la sensibilidad del análisis de la muestra.

- **Análisis por Espectrometría**

La espectrometría de emisión se basa en la propiedad que tiene un átomo al ser excitado, lo cual que permite que la radiación compuesta de longitudes de onda características, en función de su

configuración atómica. Un dispositivo electrónico nos permitirá medir esta radiación, que será función de la concentración.

La espectrometría de absorción atómica se basa en la excitación de los átomos que tiene lugar en una llama en la cual las partículas se parten y los átomos quedan en su estado fundamental, de tal manera que puedan absorber la energía de su longitud de onda característica, suministrada mediante una lámpara de cátodo hueco del elemento a analizar. La media para determinar el grado en que ha sido absorbida la radiación es la absorbancia, cuyo valor es el logaritmo del cociente entre el valor de la intensidad de la radiación antes del paso por la llama y después. Esta media es proporcional a la concentración entre ciertos valores de ésta.

La espectrometría de emisión por plasma, en la cual la excitación de los átomos se realiza en el interior de un tubo donde existe una masa de un gas inerte, que se ha ionizado mediante la acción de una corriente inducida de alta frecuencia, este gas ionizado es el plasma. El gas ionizado recibe el ingreso de la muestra en aerosol, y es excitada sin modificar al plasma. En este momento el gas inerte tiende a volver a su nivel fundamental y las energías liberadas excitan a la muestra de aceite. Las radiaciones emitidas por los átomos excitados o ionizados se dirigen y se transforman

eléctricamente en datos, de donde se obtienen los resultados de forma cualitativa y cuantitativa.

Al chequear el conjunto de resultados nombrados anteriormente, el personal que realiza el chequeo de aceites usados puede determinar con un nivel de seguridad bastante alto que el equipo que se encuentre bajo el servicio de control de aceites usados esta funcionando de una manera adecuada.

## **6.5 Tabla de Datos**

A continuación en la Tabla 3 se detalla la tabla de datos utilizada para recolectar y manejar la información que se obtiene a través de los análisis de aceite usado.

En la tabla de datos anotada se detallan los principales parámetros de control que se utilizan para una evaluación del desempeño de la operación del aceite utilizado.

El esquema de la tabla de datos primero detalla la condición básica de la muestra evaluada que es su apariencia física. Este detalle se refiere a que si en la apariencia física de la muestra de aceite existe presencia de elementos anormales a la operación normal del producto en el equipo al

que esta destinado, este se reporta con un color anormal a lo que usualmente se espera en estas condiciones de trabajo.

Acompañando a este dato inicial se encuentran los datos identificadores de la muestra, que corresponden a la fecha de muestreo y a las horas de trabajo del aceite en el equipo de trabajo.

**TABLA 3**  
**TABLA DE DATOS TIPO**

Ensayo	Método ASTM	Límites de Servicio				
Apariencia	Visual	Normal				
Fecha de muestreo						
Tiempo de servicio del aceite (horas)						
Viscosidad (cst @ 100 C)	D-445	12.0 A 18.0 cst				
Insolubles en 0.3 um (% peso)	M-490	Máximo 3.0 %				
TBN mg de KOH		Mínimo 7.0				
Agua (% en peso)	M-1067	Máximo 0.3%				
Dilución por combustible (% Peso)		Máximo 5 %				
Oxidación, 5.8 A/CM	M-1067	Máximo 20				
Metales de desgaste (ppm)	M-1011					
Hierro		Máximo 125 ppm				
Cobre		Máximo 50 ppm				
Silicio		Máximo 25 ppm				
Aluminio		Máximo 20 ppm				

El primer grupo de elementos evaluados corresponden a los contaminantes del aceite, y que determinan si el producto se encuentra en condiciones de seguir trabajando o sí al realizar la evaluación de los parámetros, es

necesario recomendar por precautelar la vida del equipo la remoción del aceite.

El segundo grupo de elementos corresponde a los metales de desgaste, que indican las condiciones de operación del equipo lubricado y permiten estimar las condiciones de desgaste del equipo lubricado. En esta sección los metales de desgaste usualmente controlados con el Hierro, Cobre, Silicio y Aluminio, pero en casos específicos se aumenta los metales en evaluación de acuerdo a la sospecha de falla o a controles determinados por los fabricantes de equipos.

En el caso que exista necesidad de mayor información para emitir un criterio adecuado de la situación que ocurre en el equipo, se recurre a análisis adicionales que determinan condiciones específicas de operación o rendimiento. Estos tipos de análisis son punto de inflamación, cantidad de hollín, acidez del aceite, naturaleza del agua, conteo de partículas, tamaño y formas de partículas, etc.

Estos análisis forman parte del grupo de pruebas que permiten evaluar las condiciones de operación tanto de equipos como del aceite en operación.

## **6.6 Procesamiento y Análisis de Datos**

A continuación se detallan las tablas de datos de los cuatro equipos correspondientes al caso de estudio.

**TABLA 4**  
**DATOS MÁQUINA PRINCIPAL DE BABOR**

Ensayo	7	6	5	4	3	2	1
Apariencia	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Fecha de muestreo	1/6/99	6/5/99	10/4/99	5/4/99	5/3/99	20/2/99	30/12/98
Tiempo de servicio del aceite (horas)	768	416	329	1300	80	1000	1000
Viscosidad (cst @ 100 C)	11,58	12,3	12,33	18,83	14,5	13,64	11,09
Insolubles en 0.3 um (% peso)	0,75	0,35	0,25	2,41		0,67	0,44
TBN mg de KOH	12,05	13,8	14,2	12,41	14,6	12,9	12,5
Agua (% en peso)	0	0	0,1	0	0	0	0
Dilución por combustible (% Peso)		0	0	< 2	< 2	< 2	6
Oxidación, 5.8 A/CM		2	3	6	0	2	8
Metales de desgaste (ppm)							
Hierro	8	7	2	6	9	10	18
Cobre	4	1	1	4	1	5	6
Silicio	7	0	4	7	10	7	8
Aluminio	4	3	4	3	1	3	3

**TABLA 5**  
**DATOS MÁQUINA PRINCIPAL DE BABOR CONT.**

Ensayo	14	13	12	11	10	9	8
Apariencia	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Fecha de muestreo	12/2/01	6/1/01	24/10/00	24/8/00	25/3/00	31/8/99	7/6/99
Tiempo de servicio del aceite (horas)	1282	679	1760	2240	870	525	816
Viscosidad (cst @ 100 C)	14,7	14,4	12,7	15,6	14,93	16,7	11,13
Insolubles en 0.3 um (% peso)	0	0,9	1,1	1,4		0,45	0,76
TBN mg de KOH	13,2	13,8	10,2	12,4	14,2	14,7	11,4
Agua (% en peso)	0	0	0	0	0	0	0
Dilución por combustible (% Peso)	0	0	0	0	0	0	
Oxidación, 5.8 A/CM	0	1	0	2	2	7	
Metales de desgaste (ppm)							
Hierro	13	8	7	19	15	11	10
Cobre	2	3	1	2	2	2	2
Silicio	0	7	4	9	2	7	7
Aluminio	3	0	3	4	2	3	5



**TABLA 6**  
**DATOS MÁQUINA PRINCIPAL DE ESTRIBOR**

Ensayo	8	7	6	5	4	3	2	1
Apariencia	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Fecha de muestreo	7/6/99	1/6/99	26/5/99	6/5/99	10/4/99	5/4/99	20/2/99	30/12/98
Tiempo de servicio del aceite (horas)	122	75	891	635	75	1230	1000	1000
Viscosidad (cst @ 100 C)	12,33	12,87	10,49	16,08	13,18	17,57	17,54	18,41
Insolubles en 0.3 um (% peso)	0,8	0,76	0,35	0,35	0,35	1,74	0,57	0,37
TBN mg de KOH	13,8	13,2	9,64	12,05	12,5	12,05	12,25	12,9
Agua (% en peso)	0	0	0	0	0,1	0,3	0	0
Dilución por combustible (% Peso)			6	0	0	0	0	0
Oxidación, 5.8 A/CM	3	2		2	5	5	8	12
Metales de desgaste (ppm)								
Hierro	14	6	16	17	10	14	11	19
Cobre	1	2	5	4	2	5	4	5
Silicio	9	6	10	7	10	6	5	7
Aluminio	6	3	4	2	2	3	2	5

**TABLA 7**  
**DATOS MÁQUINA PRINCIPAL DE ESTRIBOR CONT.**

Ensayo	16	15	14	13	12	11	10	9
Apariencia	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Fecha de muestreo	12/02/01	06/01/01	24/10/00	24/08/00	25/03/00	30/11/99	31/08/99	22/07/99
Tiempo de servicio del aceite (horas)	1870	679	1760	2123	748	812	1625	1100
Viscosidad (cst @ 100 C)	18,8	16,2	15,2	15,6	18,81	14,4	22,05	14,4
Insolubles en 0.3 um (% peso)		1	1,3	1,3			0,65	0,48
TBN mg de KOH	13,4	13,8	10,5	12,4	14,04	14,6	12,5	13
Agua (% en peso)	0,779	0	0	0,227	0	0	0	0
Dilución por combustible (% Peso)	0	0	0	0	0		0	0
Oxidación, 5.8 A/CM	0	0	0	0	0	4	7	4
Metales de desgaste (ppm)								
Hierro	37	22	14	32	14	15	3	15
Cobre	4	7	3	3	2	3	1	3
Silicio	0	11	10	16	2	12	8	12
Aluminio	12	0	2	14	3	3	2	3

**TABLA 8**  
**DATOS MÁQUINA AUXILIAR DE BABOR**

Ensayo	7	6	5	4	3	2	1
Apariencia	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Fecha de muestreo	22/07/99	01/06/99	06/05/99	10/04/99	05/03/99	20/02/99	30/12/98
Tiempo de servicio del aceite (horas)	900	1317	707	300	100	700	1000
Viscosidad (cst @ 100 C)	17,94	17,58	15,95	14,46	17,3	19,58	15,24
Insolubles en 0.3 um (% peso)	0,87	1,64	0,27	0,17		0,62	0,39
TBN mg de KOH	12	14	14,4	14,6	13,9	13,8	13,5
Agua (% en peso)	0	0	0	0	0	0	0
Dilución por combustible (% Peso)	0	0		0	0	0	0
Oxidación, 5.8 A/CM	8		1	3	0	8	9
Metales de desgaste (ppm)							
Hierro	7	10	7	6	12	14	9
Cobre	0	6	0	4	2	5	3
Silicio	12	8	0	8	23	9	6
Aluminio	3	6	0	4	2	5	6

**TABLA 9**  
**DATOS MÁQUINA AUXILIAR DE BABOR CONT.**

Ensayo	14	13	12	11	10	9	8
Apariencia	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Fecha de muestreo	12/02/01	06/01/01	24/10/00	24/08/00	19/04/00	25/03/00	31/08/99
Tiempo de servicio del aceite (horas)	1130	362	1318	1930	903	300	1125
Viscosidad (cst @ 100 C)	14,4	14,8	15,7	15,2	18,37	15,63	15,63
Insolubles en 0.3 um (% peso)		1	1,6	1,4		0,52	0,52
TBN mg de KOH	14	14,7	10,6	11,2	13,42	15,5	15,5
Agua (% en peso)	0	0	0	0	0	0	0
Dilución por combustible (% Peso)		0	0	0	0	0	0
Oxidación, 5.8 A/CM	0	0	0	0	4	5	5
Metales de desgaste (ppm)							
Hierro	10	6	10	14	6	6	13
Cobre	1	1	1	1	6	1	5
Silicio	3	6	10	8	8	1	11
Aluminio	4	2	2	4	2	3	4

**TABLA 10**  
**DATOS MÁQUINA AUXILIAR DE ESTRIBOR**

Ensayo	7	6	5	4	3	2	1
Apariencia	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Fecha de muestreo	31/08/99	22/07/99	07/06/99	01/06/99	06/05/99	05/03/99	20/02/99
Tiempo de servicio del aceite (horas)	1315	900	500	452	204	60	170
Viscosidad (cst @ 100 C)	13,24	13,95	13,53	12,55	13,01	13,6	12,39
Insolubles en 0.3 um (% peso)	0,57	0,54	0,63	0,7	0,3	0,3	0,48
TBN mg de KOH	14,5	14	14,1	13,9	14,5	13,9	13,5
Agua (% en peso)	0	0	0	0	0	0	0
Dilución por combustible (% Peso)	0	0	0	0		0	2
Oxidación, 5.8 A/CM	3	5	3	3	0	0	4
Metales de desgaste (ppm)							
Hierro	10	8	9	8	7	13	8
Cobre	2	0	2	0	0	2	0
Silicio	5	13	7	8	0	0	6
Aluminio	5	5	2	2	2	0	5

**TABLA 11**  
**DATOS MÁQUINA AUXILIAR DE ESTRIBOR CONT.**

Ensayo	11	10	9	8
Apariencia	Normal	Normal	Normal	Normal
Fecha de muestreo	12/02/01	24/10/00	19/04/00	25/03/00
Tiempo de servicio del aceite (horas)	243	730	877	495
Viscosidad (cst @ 100 C)	16,3	14,9	16,18	17,07
Insolubles en 0.3 um (% peso)	0,4	0,63	0,52	0,45
TBN mg de KOH	14	9,8	13,82	14,93
Agua (% en peso)	0	0	0	0
Dilución por combustible (% Peso)	0	0	0	0
Oxidación, 5.8 A/CM	1	1	2	1
Metales de desgaste (ppm)				
Hierro	11	15	6	8
Cobre	1	1	0	1
Silicio	0	5	6	4
Aluminio	2	4	6	3

En las tablas anteriores se detalla el listado de las muestras obtenidas de los motores. En estas muestras se puede observar las condiciones de desempeño del aceite.

En el lado derecho de la tabla se encuentran los parámetros de control que se tienen evaluados, conjuntamente con ellos se encuentra el detalle de los límites de servicio.

Los límites de servicio representan los valores mínimos y máximos en que el aceite debe funcionar, y conjuntamente con ellos se encuentran los valores máximos permitidos de desgaste, ya que posterior a estos valores se puede definir que una falla catastrófica está ocurriendo o está por ocurrir.

Al leer las tablas adjuntas se puede encontrar que los resultados en algunas muestras nos reportan funcionamiento anormal del equipo muestreado. En este momento se procede a emitir alertas de operación para iniciar el proceso de investigación de la causa de la anomalía.

En la primera fase de análisis de datos, lo que se realiza es una revisión de los resultados del análisis de laboratorio de la muestra. Posterior a esto se compara con los resultados anteriores para saber si la condición presente es normal en la operación de este equipo o representa el indicio de que existe algún problema operacional.

Se continúa con la revisión del resto de los parámetros evaluados para comprobar que los parámetros que se encuentran anormales no son resultado de una mala interpretación del laboratorista o analista del laboratorio.

En el caso de que exista duda sobre los resultados revisados, la mejor recomendación es buscar una contra-muestra para comprobar que los resultados son correctos.

Todos los parámetros que se encuentran fuera de los límites de control se toman en cuenta, incluso también se revisan los datos de parámetros que aunque no superen los límites de control, tengan un aumento en relación al promedio de las muestras anteriormente analizadas. Este tipo de cambios en el comportamiento de los parámetros se puede observar de una manera más fácil si se lo realiza a través de un gráfico de tendencias, en este se puede observar al cambiar las curvas graficadas cuando un parámetro se sale de los límites de control.

En esta fase de análisis es también necesario tomar en cuenta que la forma de manejar la información de los resultados de laboratorio tiene que tener el orden necesario para que no se interprete inadecuadamente las condiciones de operación del aceite.

Ciertos fabricantes de equipos reportan en sus manuales de funcionamiento los parámetros de control con que se deben analizar las muestras de aceite y definen adicionalmente el periodo adecuado para realizar la toma de las muestras.

Estos parámetros de control son usualmente los que de acuerdo a la estadística del fabricante se pueden considerar normales en la operación de sus equipos, pero en estos casos no se detalla el tipo de tendencia que tiene que mantener el equipo, por lo que es de mucha utilidad que se tenga la tendencia del parámetro para evaluar correctamente la muestra.

## **6.7 Definición de problemas operacionales**

### **Máquina Principal de Babor**

En la tabla 12 se encuentran los datos correspondientes a la operación de la máquina principal de babor en la que se observan los siguientes parámetros anormales:

**TABLA 12**  
**PARÁMETROS MÁQUINA PRINCIPAL DE BABOR**

Parámetros de control	Datos	Fecha Muestra	Detalle
Visc. @ 100°C Dil. Combust.	11,09 6%	30/12/98	Se determina por la baja de la viscosidad, conjuntamente con la baja en el punto de inflamación que existe contaminación con combustible, que se originó un goteo en una línea de combustible defectuosa.
Visc. @ 100°C Insolubles	18,83 2,41	05/04/99	Se determina la elevación de la viscosidad del aceite, debido a la acumulación de hollín generada por una falla en la operación de la centrífuga de aceite del motor por depósitos acumulados.
Visc. @ 100°C	11,58	01/06/99	Se determina por la baja en el punto de la viscosidad, conjuntamente con la baja en el punto de inflamación que existe contaminación con combustible, que se originó por la falta de atomización correcta de dos toberas, que permitían que gotee y realice combustión incompleta, que finalmente llegaba al depósito de combustible.
Visc. @ 100°C	11,13	07/06/99	Se determina por la baja en el punto de la viscosidad, conjuntamente con la baja en el punto de inflamación que existe contaminación con combustible, que se originó por la falta de atomización correcta de dos toberas, que permitían que gotee y realice combustión incompleta, que finalmente llegaba al depósito de combustible.

### **Máquina Principal de Estribor**

En la tabla 13 se encuentran los datos correspondientes a la operación de la máquina principal de babor en la que se observan los siguientes parámetros anormales:

**TABLA 13**  
**PARÁMETROS MÁQUINA PRINCIPAL DE ESTRIBOR**

Parámetros de control	Datos	Fecha Muestra	Detalle
Visc. @ 100°C	18,41	30/12/98	Se encuentra viscosidad elevada , no se encuentran fallas en los inyectores que permitan determinar mala combustión y generen aumento de hollín
Visc. @ 100°C	17,54	20/02/99	Se mantiene el efecto de alta viscosidad en el aceite, sin aparentemente existir otro parámetro fuera de los límites de control.
Visc. @ 100°C	17,57	05/04/99	Al continuar el efecto de la alta viscosidad del aceite se revisa la centrífuga de aceite y se encuentra problemas por acumulación de sedimentos en los discos de gravedad que no permitían la correcta limpieza del aceite.
Visc. @ 100°C Dil. Combust.	10,49 6%	26/05/99	Se determina por la baja en el punto de la viscosidad, conjuntamente con la baja en el punto de inflamación que existe contaminación con combustible, que se originó por la falta de atomización correcta en dos toberas, que permitían que gotee y realice combustión incompleta, que finalmente llegaba al depósito de combustible.
Visc. @ 100°C	22,05	31/08/99	Se presenta alta viscosidad en el aceite, que se origina por falta de limpieza de la centrífuga de aceite.
Visc. @ 100°C	18,81	25/03/00	Se presenta alta viscosidad en el aceite, que se origina por presencia anormal de hollín en el aceite por mala combustión en dos cilindros.
Visc. @ 100°C	18,8	12/02/01	Se presenta alta viscosidad en el aceite, que se origina por falta de limpieza de la centrífuga de aceite.



## Máquina Auxiliar de Babor

En la tabla 14 se encuentran los datos correspondientes a la operación de la máquina principal de babor en la que se observan los siguientes parámetros anormales:

**TABLA 14**  
**PARÁMETROS MÁQUINA AUXILIAR DE BABOR**

Parámetros de control	Datos	Fecha Muestra	Detalle
Visc. @ 100°C	19,58	20/02/99	Se encuentra la viscosidad elevada en el aceite, no se encuentran fallas en los inyectores que permitan determinar mala combustión y generen aumento de hollín.
Visc. @ 100°C	17,58	01/06/99	Se mantiene el efecto de alta viscosidad en el aceite, que se origina por falta de limpieza de la centrífuga de aceite del equipo.
Visc. @ 100°C Insolubles	17,94 1,64	22/07/99	Al continuar el efecto de la alta viscosidad del aceite se revisa la centrífuga de aceite y se encuentra problemas por acumulación de sedimentos en los discos de gravedad que no permitían la correcta limpieza del aceite.
Visc. @ 100°C	18,37	19/04/00	Se determina viscosidad elevada en el aceite, no se encuentran fallas en los inyectores que permitan determinar mala combustión y generen aumento de hollín.

### **Máquina Auxiliar de Estribor**

En la máquina auxiliar de estribor no se observaron parámetros anormales que reporten problemas operacionales, que se reflejan en los análisis de aceite usado.

# CAPÍTULO 7

## 7. RECOMENDACIONES Y MEJORAS IMPLANTADAS EN LOS MOTORES

### 7.1 Recomendación de acciones operativas de mejoramiento

Al realizar las recomendaciones puntuales sobre los resultados de los análisis de aceites usados, se evaluaron las condiciones que produjeron las condiciones anormales de operación, y que provocaron las fallas en el desempeño del aceite.

A partir de este proceso de revisión de resultados de laboratorio y adicionalmente una investigación posterior con el Jefe de Máquinas del barco sobre las condiciones operativas, se pudieron emitir recomendaciones de trabajo de mantenimiento que ayudaron a mejorar el desempeño del equipo, y sobre todo mejorar la disponibilidad del mismo, al controlar las condiciones de mal funcionamiento.

En función al seguimiento que se realizaba sobre los motores se emitieron recomendaciones para mejorar el desempeño de los equipos y mejorar el control del consumo de combustible, a partir de un seguimiento de los efectos que la mala combustión producía en el aceite.

### **Motor Principal de Babor**

A partir de la dilución por combustible detectada en Diciembre de 1998, se revisaron los elementos del sistema de inyección, que incluyó la verificación de inyectores, toberas y tuberías hasta que se encontró el inyector que no mantenía la presión del combustible en el sistema, por lo tanto no permitía que se pulverice (atomice) adecuadamente el diesel al motor, haciendo que el combustible se acumule en el cárter. Revisando la proporción de la dilución de combustible, la recomendación indicaba que la falla en el sistema se encontraba en una parte que permitía el ingreso del combustible en una proporción alta.

Al definir una proporción alta de presencia de combustible, tomando en cuenta que la proporción máxima, que se puede encontrar en el aceite no debe ser superior al 5% en la relación de volumen entre el diesel y el aceite. Como ejemplo en un cárter de 1,000 litros, la cantidad máxima de diesel que resistiría el aceite sin perder sus condiciones de trabajo es de 50 lt., y se considera la cantidad máxima permisible.

En Abril de 1999, a partir de la presencia alta de hollín se revisó primero el sistema de inyección para comprobar su operación, pero se encontró que la centrífuga de aceite, por excesiva acumulación de suciedad no estaba realizando su trabajo normal, que ocasionó que no se retire la cantidad adecuada de hollín del aceite.

Esta presencia de elementos insolubles (generalmente carbón residual, lodos y depósitos), es un indicador de que la combustión no se encuentra en las condiciones adecuadas de operación, genera así estos subproductos. Pero en los motores equipados con sistemas de centrifugación para purificación del aceite es normal que estas acumulaciones no se produzcan, o si se producen esto se debe a un anormal funcionamiento del motor.

En Junio de 1999, la baja viscosidad del aceite provocada por el goteo de dos inyectores generó que se revise el sistema de inyección para encontrar la razón de la presencia de combustible que hacía que el aceite pierda su viscosidad.

En la revisión del sistema se encontró que en dos cilindros había rastros de combustible en el escape, que era evidencia de que parte de las gotas de combustible atomizadas no quemaban y se condensaban sobre las paredes del cilindro, generando un goteo pequeño pero permanente al cárter del equipo.

Con la evidencia de los datos tomados en las muestras de aceite, la recomendación final para el Armador del buque fue que se realizara una reparación preventiva de los elementos del sistema de inyección. Reemplazo de un kit completo de inyectores y cambiar el esquema de limpieza y revisión de la centrífuga de aceite para evitar su mal funcionamiento.

A continuación en los gráficos siguientes correspondientes a la viscosidad, TBN, hierro, cobre, silicio y aluminio, se evidencia cronológicamente los resultados que se encuentran fuera de los límites de los parámetros de control.

### Viscosidad

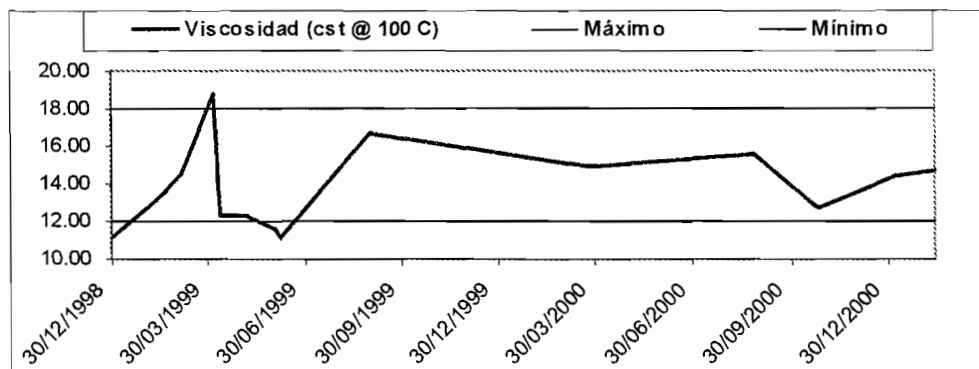


FIGURA 7.1 VISCOSIDAD CRONOLÓGICO MÁQUINA P. DE BABOR

**TBN**

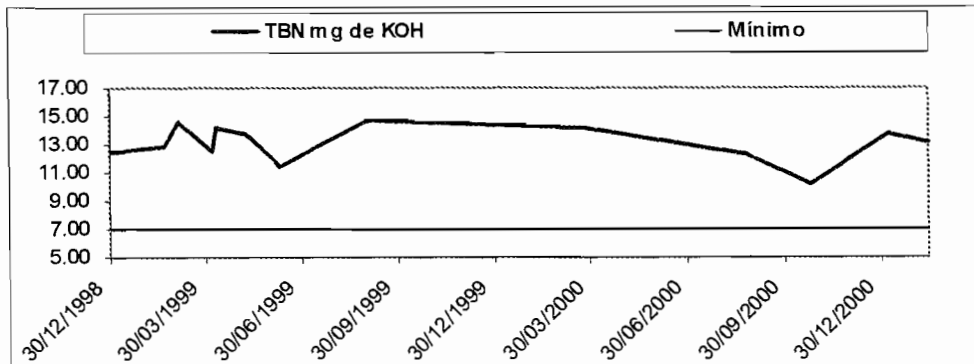


FIGURA 7.2 TBN CRONOLÓGICO MÁQUINA PRINCIPAL DE BAVOR

**Hierro**

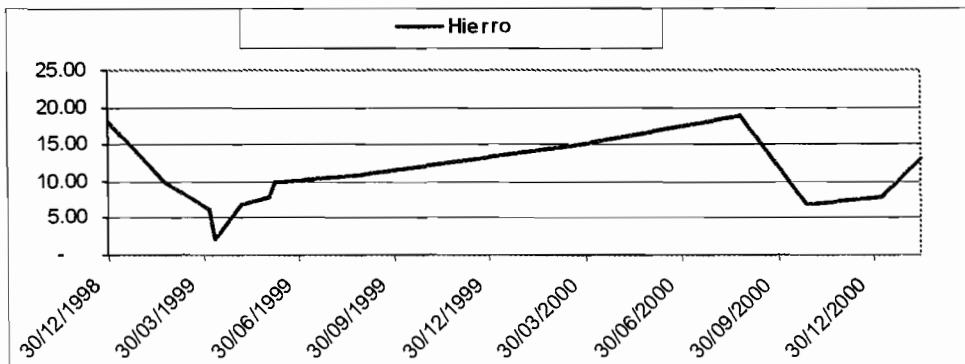


FIGURA 7.3 HIERRO CRONOLÓGICO MÁQUINA PRINCIPAL DE BAVOR

## Cobre

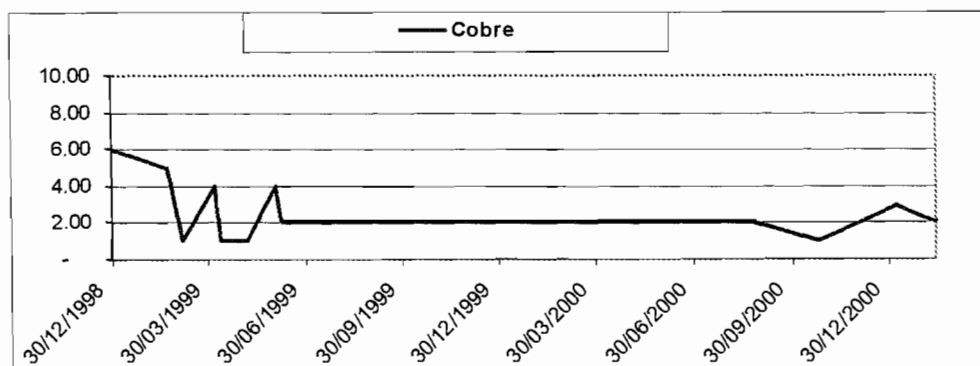


FIGURA 7.4 COBRE CRONOLÓGICO MÁQUINA PRINCIPAL DE BABOR

## Silicio

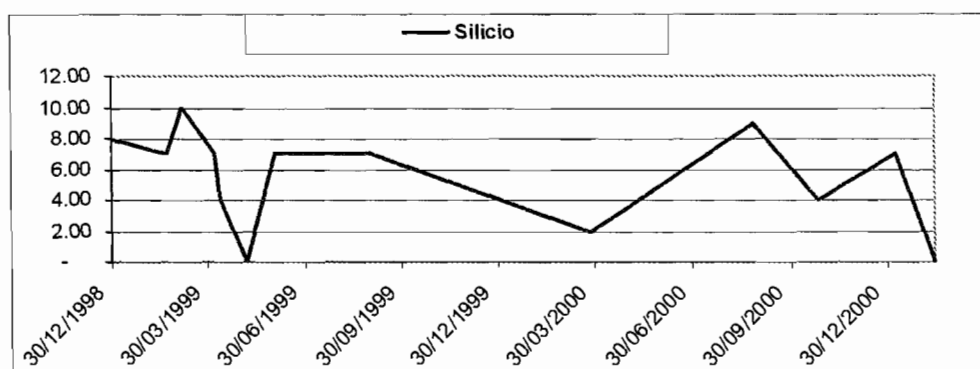


FIGURA 7.5 SILICIO CRONOLÓGICO MÁQUINA PRINCIPAL DE BABOR



## Aluminio

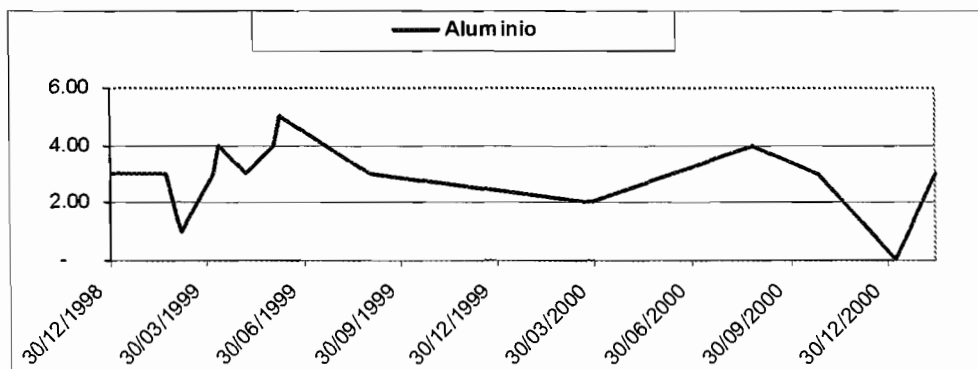


FIGURA 7.6 ALUMINIO CRONOLÓGICO MÁQ. PRINCIPAL DE BABOR

### Motor Principal de Estribor

Entre Diciembre de 1998 y Abril de 1999, se mantenía un efecto de alta viscosidad en el aceite, a pesar de no tener una alta acumulación de hollín en el mismo, pero que mantenía la viscosidad elevada. Con estos datos la recomendación es la revisar el sistema de inyección, para comprobar la correcta atomización.

En Abril de 1999, los insolubles se elevan con relación a la presencia promedio de las muestras anteriores, lo que permite recomendar que se evalúe la operación de la centrifugadora de aceite. Al realizar el mantenimiento se encuentra acumulación de hollín y residuos, lo que generaba la condición de aumento de la suciedad en el aceite, al no permitir su trabajo adecuadamente.

En Mayo de 1999, se presenta un cuadro de dilución por combustible, que determinó que se recomiende revisar nuevamente los inyectores. Se determinó que en dos de ellos existía un problema de atomización de combustible, lo que generaba el goteo de diesel dentro del motor.

Para Agosto de 1999, se presenta nuevamente el problema de la acumulación de hollín en el aceite, que se evidencia en el aumento de la viscosidad, por lo que se recomendó realizar una limpieza de la centrifugadora de aceite para que funcione adecuadamente.

En Marzo del 2000, se encuentra un efecto de aumento de la viscosidad por la mala combustión generada en dos cilindros (Falla en la atomización de los inyectores). La búsqueda de este tipo de falla comenzó con la revisión de las temperaturas de los cilindros, buscando cuales tenían una temperatura de operación superior al promedio de operación, para encontrar los que están atomizando de manera defectuosa.

Para solucionar el problema se repararon y calibraron los inyectores defectuosos, volviéndose a instalar posteriormente en el motor.

En Febrero de 2001 se produce nuevamente aumento de la viscosidad y se recomienda la revisión de la centrifugadora de aceite, con lo que limpia la acumulación de residuos, que no permitía el adecuado funcionamiento del equipo.

acumulación de residuos, que no permitía el adecuado funcionamiento del equipo.

Con la revisión de las recomendaciones impartidas, los puntos de trabajo se centran en la repetida acumulación de hollín en la purificadora, por lo que se recomendó que se realice un cambio de los elementos de desgaste en la centrífuga y se revisen los discos de gravedad, para evitar que se taponen repetidamente.

Adicionalmente a ello se recomendó el mantenimiento general al sistema de inyección para precautelar cualquier riesgo de falla a los inyectores y toberas.

A continuación en los gráficos siguientes correspondientes a la viscosidad, TBN, hierro, cobre, silicio y aluminio, se evidencia cronológicamente los resultados que se encuentran fuera de los límites de los parámetros de control.

### Viscosidad

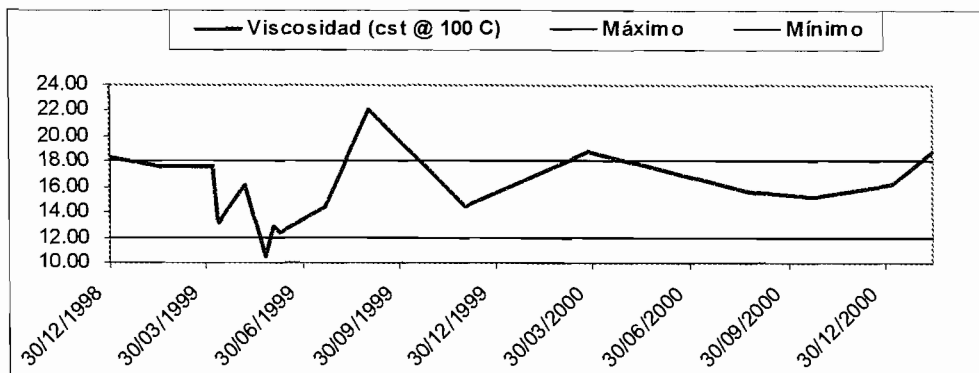


FIGURA 7.7 VISCOSIDAD CRONOLÓGICO MÁQUINA P. DE ESTRIBOR

## TBN

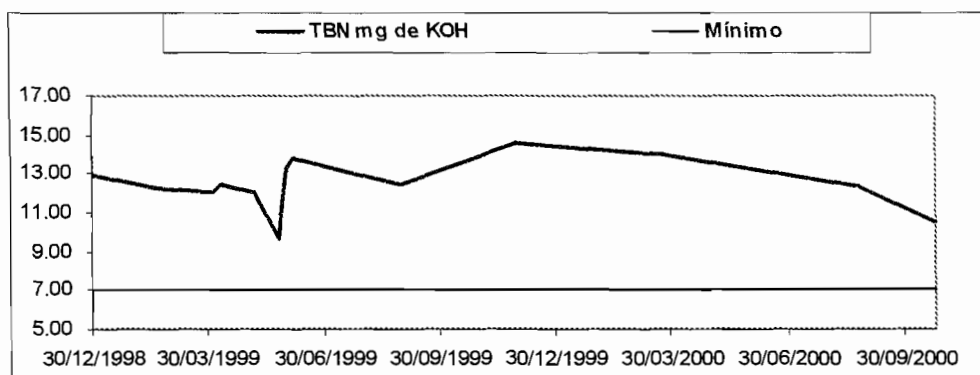


FIGURA 7.8 TBN CRONOLÓGICO MÁQUINA PRINCIPAL DE ESTRIBOR

## Hierro

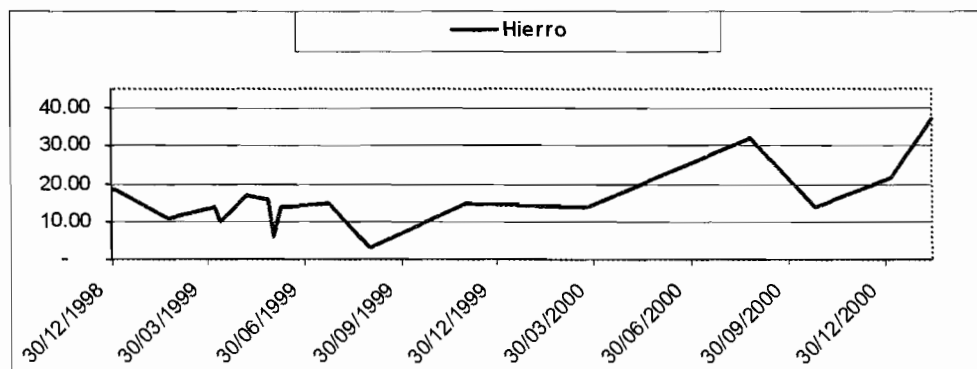


FIGURA 7.9 HIERRO CRONOLÓGICO MÁQUINA P. DE ESTRIBOR

## Cobre

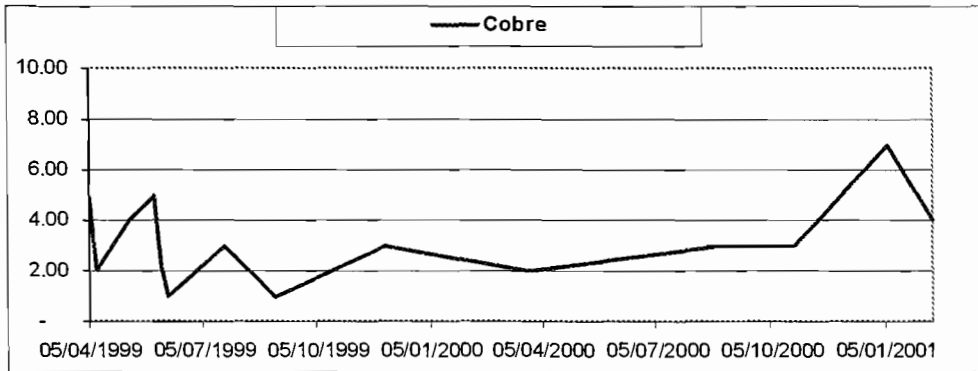


FIGURA 7.10 COBRE CRONOLÓGICO MÁQUINA P. DE ESTRIBOR

## Silicio

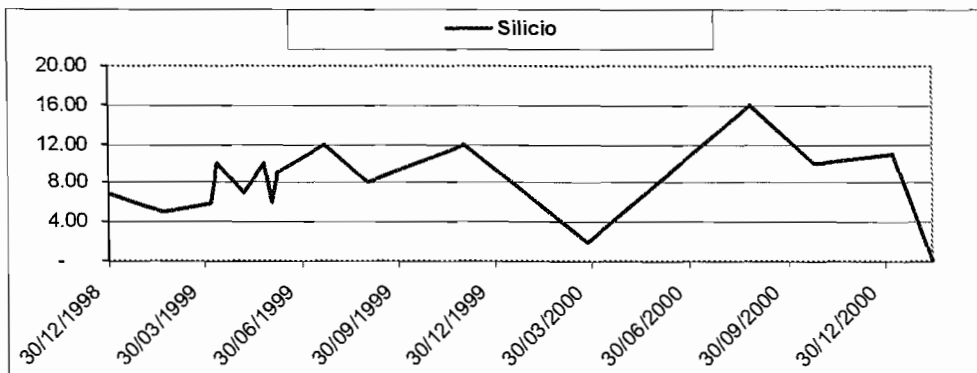


FIGURA 7.11 SILICIO CRONOLÓGICO MÁQUINA P. DE ESTRIBOR

## Aluminio

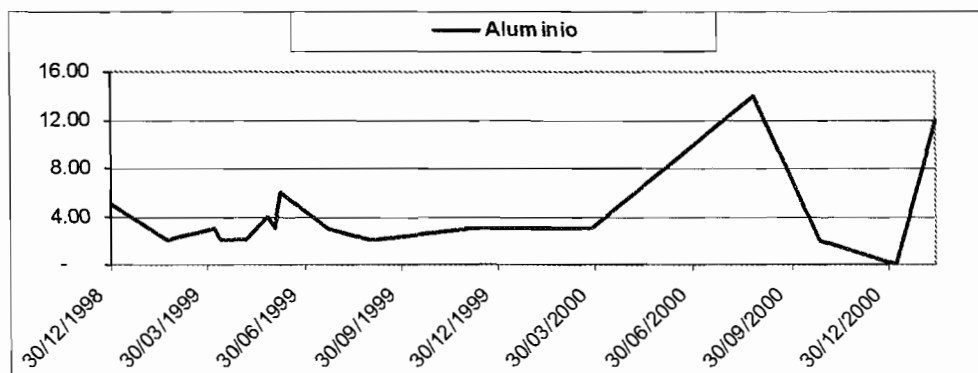


FIGURA 7.12 ALUMINIO CRONOLÓGICO MÁQUINA P. DE ESTRIBOR

## Motor Auxiliar de Babor

En Febrero de 1999, se presentó un efecto de alta viscosidad en el aceite, se recomendó revisar el sistema de inyección. Pero no se encontraron fallas en los inyectores que produzcan una mala combustión.

Para Junio de 1999, se mantenía el estado de alta viscosidad del aceite, pero al revisar la centrifugadora de aceite, presentaba acumulación de residuos y hollín, con lo que se recomendó una limpieza total del equipo.

Para Abril de 2000, se detecta nuevamente un aumento de viscosidad, el cual no se tenía una evidencia de aumento de viscosidad por falla de inyección al no haber un aumento significativo de la temperatura en

ninguno de los cilindros. Sin embargo se recomendó revisar el sistema de inyección para verificar su operación.

Con la historia anterior de alta viscosidad en el aceite se recomendó una revisión y reparación de la centrífuga para controlar el efecto de la viscosidad alta por acumulación de hollín.

A continuación en los gráficos siguientes correspondientes a la viscosidad, TBN, hierro, cobre, silicio y aluminio, se evidencia cronológicamente los resultados que se encuentran fuera de los límites de los parámetros de control.

### Viscosidad

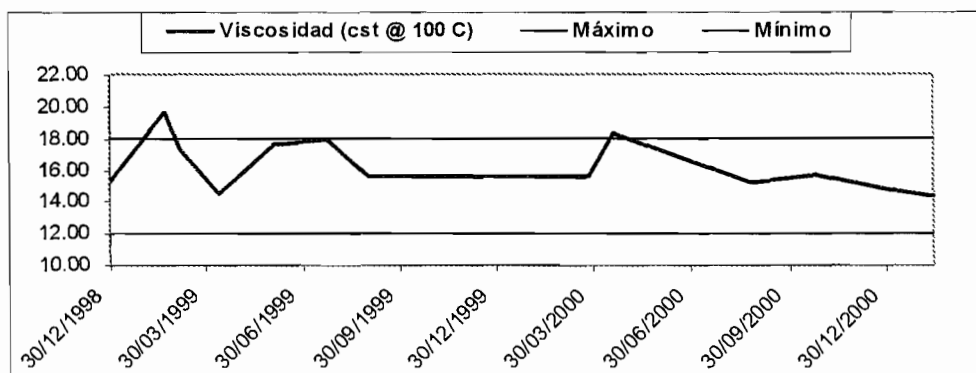


FIGURA 7.13 VISCOSIDAD CRONOLÓGICO MÁQUINA A. DE BABOR

## TBN

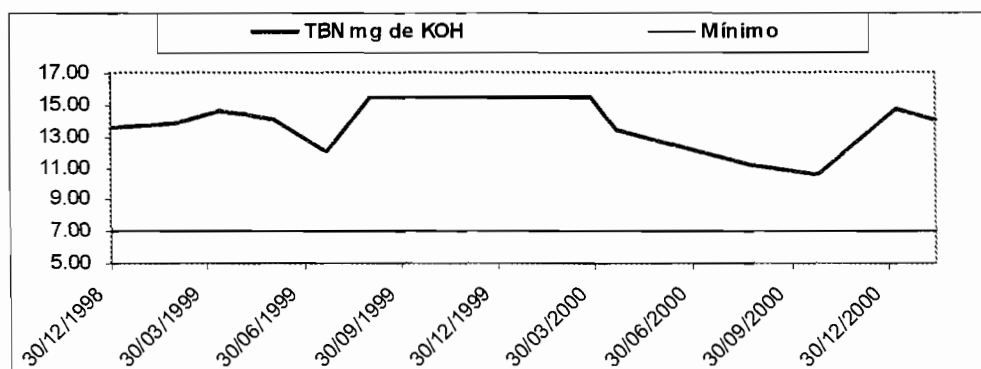


FIGURA 7.14 TBN CRONOLÓGICO MÁQUINA AUXILIAR DE BAVOR

## Hierro

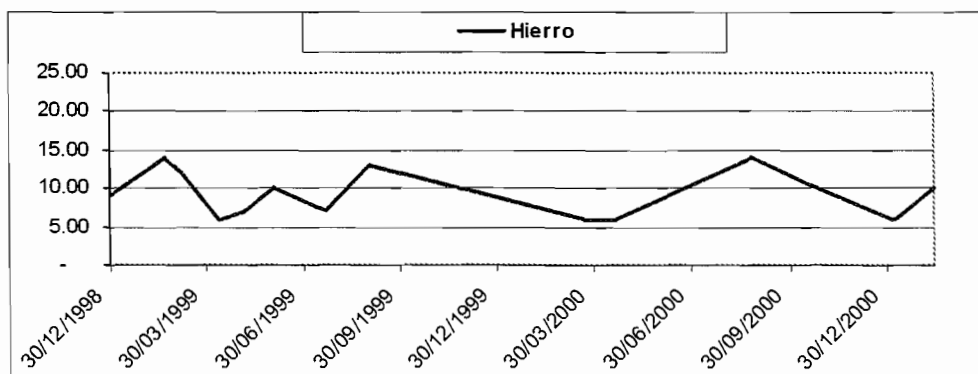


FIGURA 7.15 HIERRO CRONOLÓGICO MÁQUINA AUXILIAR DE BAVOR



## Cobre

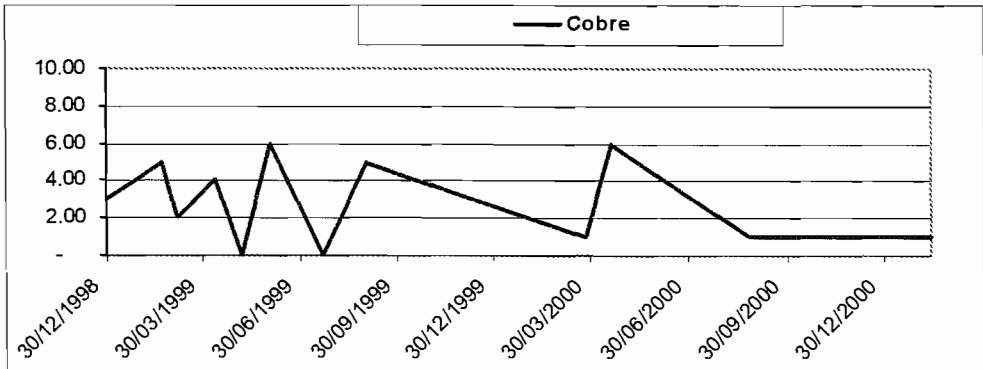


FIGURA 7.16 COBRE CRONOLÓGICO MÁQUINA AUXILIAR DE BAVOR

## Silicio

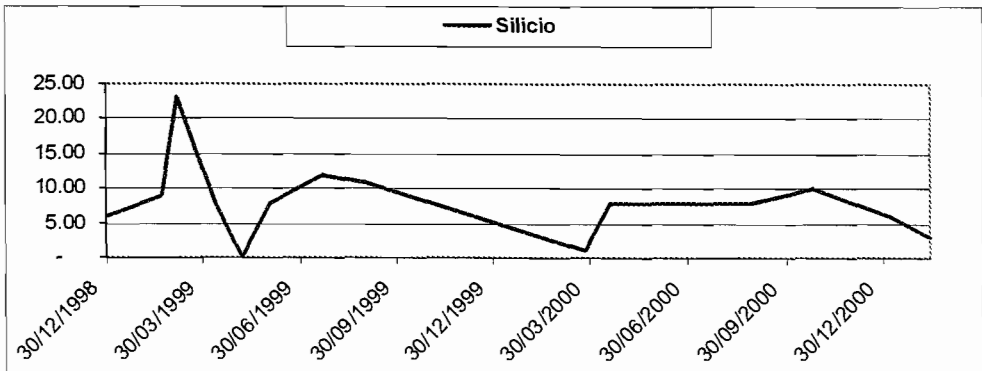


FIGURA 7.17 SILICIO CRONOLÓGICO MÁQUINA AUXILIAR DE BAVOR

## Aluminio

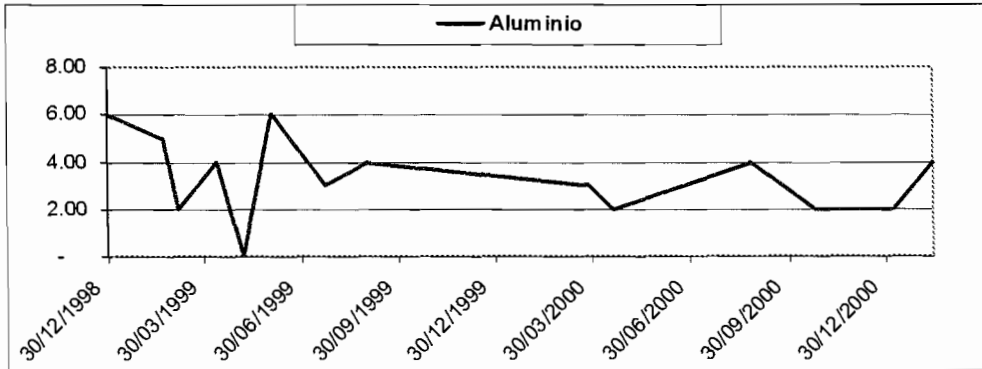


FIGURA 7.18 ALUMINIO CRONOLÓGICO MÁQUINA A. DE BABOR

## Motor Auxiliar de Estribor

En este motor no se reportaron condiciones de operación que se alejen de los parámetros de control. Por lo que las recomendaciones de trabajo estaban dirigidas a limpieza del sistema de inyección y de la purificadora del motor.

A continuación en los gráficos siguientes correspondientes a la viscosidad, TBN, hierro, cobre, silicio y aluminio, se evidencia cronológicamente los resultados que se encuentran dentro de los límites de los parámetros de control.

## Viscosidad

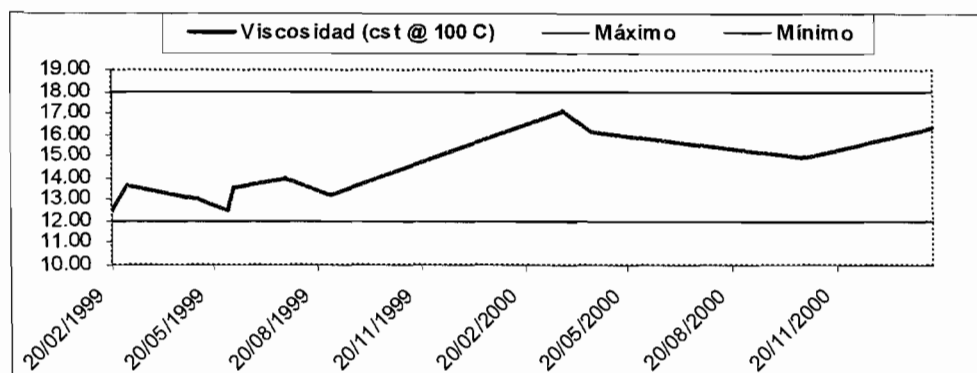


FIGURA 7.19 VISCOSIDAD CRONOLÓGICO MÁQUINA A. DE ESTRIBOR

## TBN

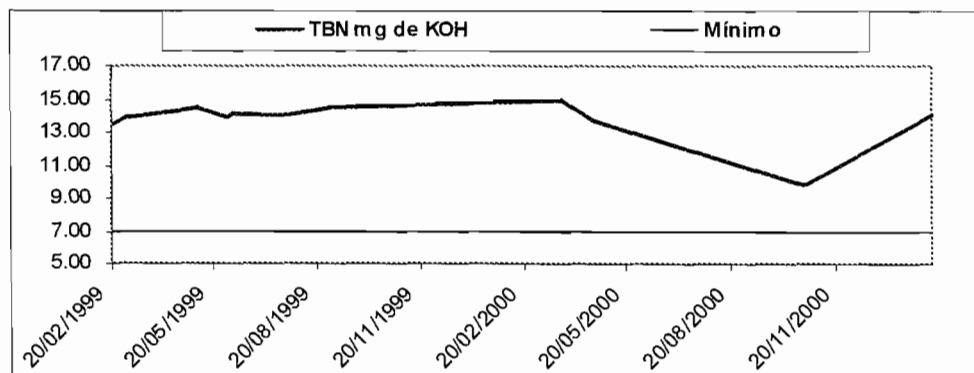


FIGURA 7.20 TBN CRONOLÓGICO MÁQUINA AUXILIAR DE ESTRIBOR

## Hierro

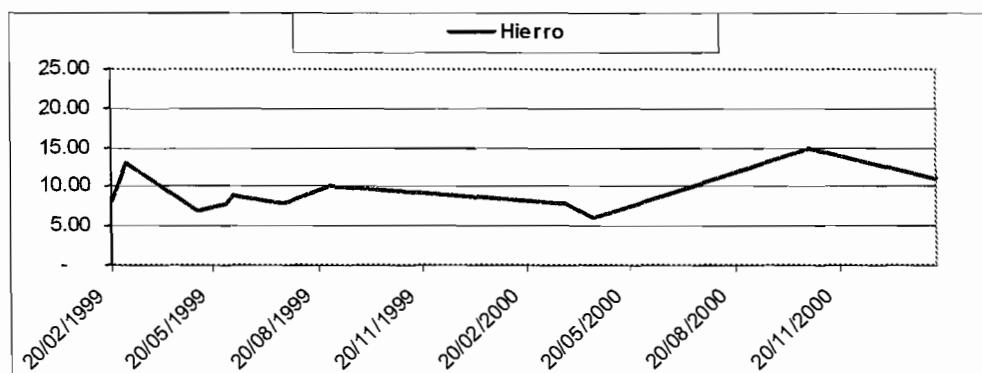


FIGURA 7.21 HIERRO CRONOLÓGICO MÁQUINA A. DE ESTRIBOR

## Cobre

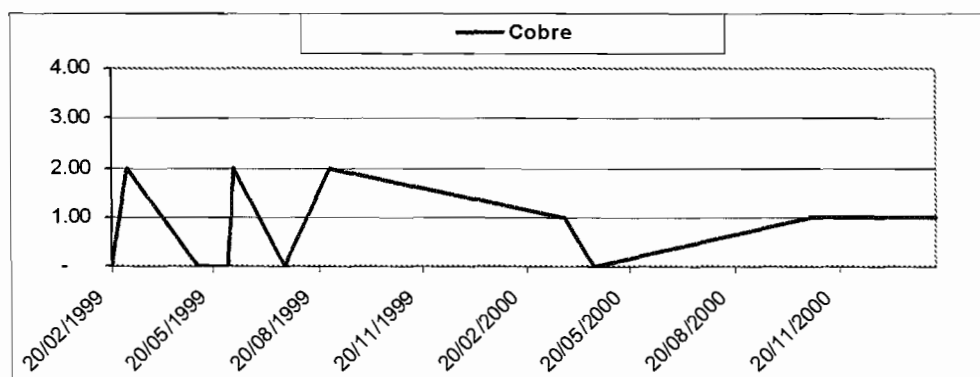


FIGURA 7.22 COBRE CRONOLÓGICO MÁQUINA A. DE ESTRIBOR

## Silicio

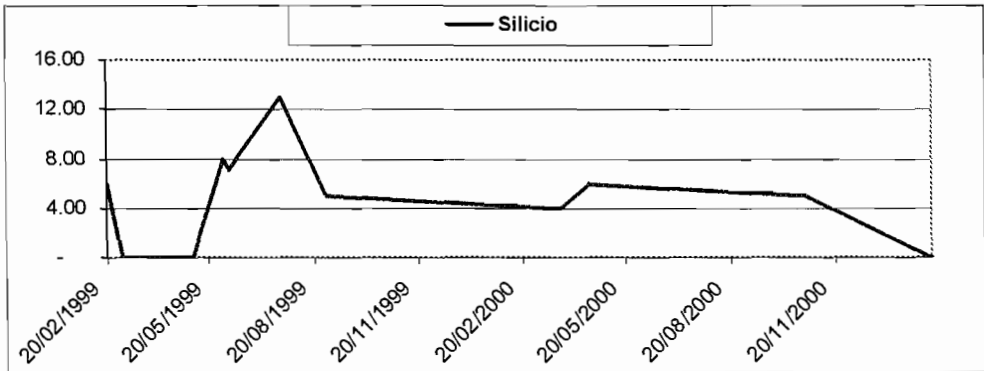


FIGURA 7.23 SILICIO CRONOLÓGICO MÁQUINA A. DE ESTRIBOR

## Aluminio

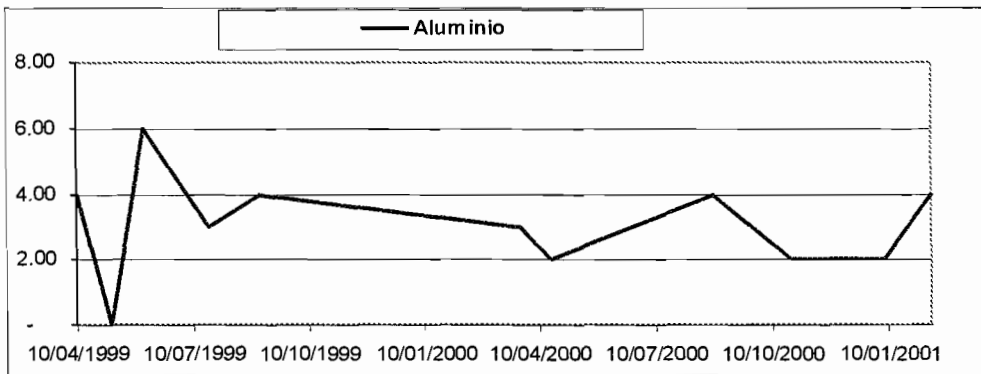


FIGURA 7.24 ALUMINIO CRONOLÓGICO MÁQUINA A. DE ESTRIBOR

## 7.2 Reevaluación de Datos

En esta parte se procede a evaluar nuevamente los datos tomados a partir de las muestras de aceite analizadas.

Se desarrollaron gráficas para algunos de los parámetros evaluados con el objetivo de establecer las tendencias de trabajo y poder revisar que las condiciones de operación de los motores.

En este tipo de gráficas se observó la variación de parámetros, y se pudo determinar cuando un parámetro estaba fuera de límites y como se relacionaba con los demás parámetros. Esta variación no necesariamente significa que el aceite se encuentra fuera de condiciones de operación, sino que había que analizar en conjunto el juego de resultados para realizar una correcta evaluación.

Al generar las gráficas de seguimiento de los parámetros de control en función al tiempo, se tiene el problema de que no se tiene un esquema en el que se diferencia el estado de la muestra de aceite con relación a las horas de trabajo del aceite.

Por esta razón, se generó una nueva evaluación de los datos obtenidos, graficándolos en función a las horas de trabajo. Este tipo de información nos permitió realizar las recomendaciones adecuadas de seguimiento y muestreo de aceite.

Adicionalmente con la información graficada se procedió a establecer la línea de tendencia al realizar un ajuste de la curva generada.

Al generar esta curva de tendencia, se puede obtener la ecuación matemática que generara la curva y la proyección del parámetro evaluado en función a las horas de trabajo.

A través de esta ecuación matemática, y comparándola con los límites de control se pudo establecer el periodo de cambio de aceite adecuado a las condiciones de trabajo. Adicionalmente al revisar los metales de desgaste también se puede estimar la tasa de desgaste contra la cuál se deben evaluar los resultados de laboratorio que se obtienen del equipo.

Al sumar los resultados iniciales de las condiciones del aceite y las condiciones de desgaste a partir de las partículas encontradas en el aceite usado, se puede emitir un criterio de trabajo que permitía revisar cada parámetro y no solamente compararlo contra los límites de control, sino contra las condiciones de operación de cada motor.

En el ajuste de la curva se utilizó el sistema de Ajuste de Curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados. Este método se utilizó para la evaluación de cada uno de los parámetros considerados, pero en el caso del TBN su linealizado no se realizó directamente con este método, sino que se comparó con el Ajuste a partir de una Regresión Curvilínea, debido a que el comportamiento del TBN presenta un esquema de tipo logarítmico.

En los apéndices se encuentran los datos, gráficos y cálculos matemáticos que permiten representar el conjunto de gráficas de cada uno de los motores, en que se ha realizado seguimiento a partir del análisis de aceite usado.

### **Motor Principal de Babor**

En el apéndice A, Gráficas Máquina Principal de Babor se detallan la obtención de cada unas de las siguientes gráficas y líneas de tendencia generadas.

Al evaluar los parámetros de control del Motor Principal de Babor se graficaron los puntos correspondientes a los resultados obtenidos en función a las horas de trabajo del aceite. Adicionalmente se generó la curva de ajuste de la tendencia de los puntos.

En los gráficos siguientes se encuentra la representación de la curva linealizada por cada parámetro de control, en la que se pudo obtener una representación gráfica de la tendencia que mantiene el lubricante en su trabajo en función de las horas de trabajo.



## Viscosidad

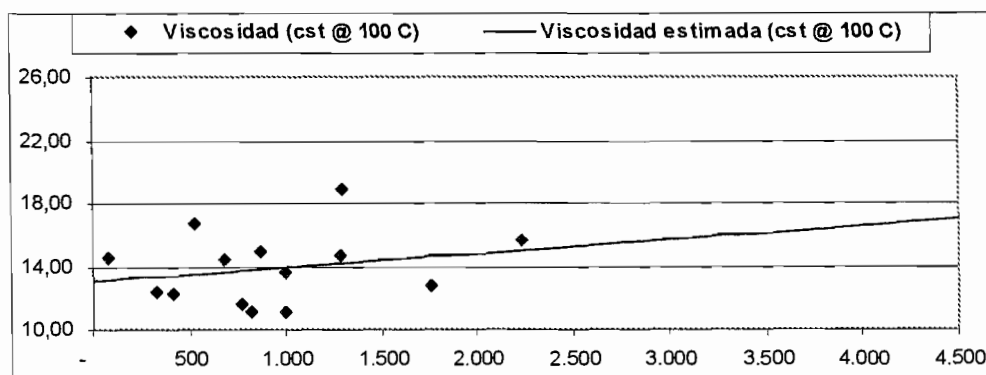


FIGURA 7.25 DATOS Y CURVA VISCOSIDAD MÁQUINA P. DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada.

$$\text{Viscosidad} = 13,07 + 0,000873 \text{ Horas de trabajo}$$

## TBN

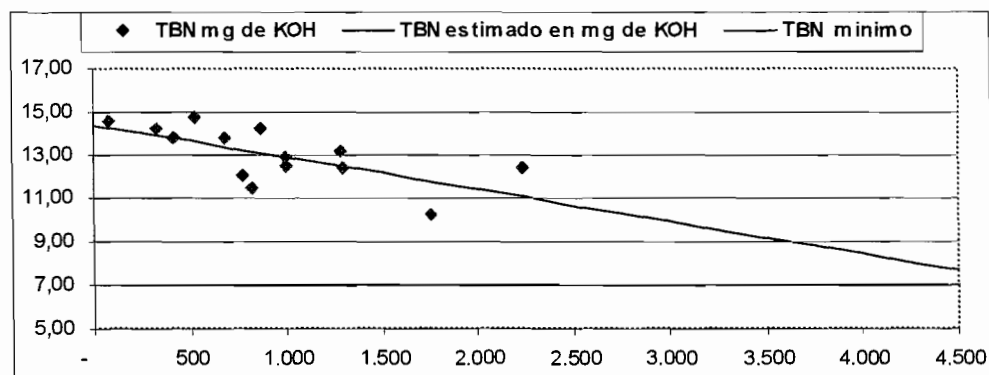


FIGURA 7.26 DATOS Y CURVA TBN MÁQUINA PRINCIPAL DE BABOR I

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada (Mín. Cuadrados)

$$\text{TBN} = 14,42 - 0,0014950 \text{ Horas de trabajo}$$

## TBN

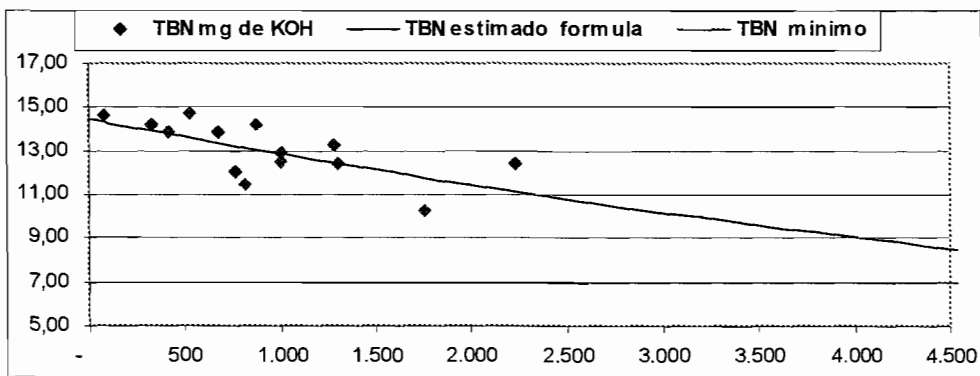


FIGURA 7.27 DATOS Y CURVA TBN MÁQUINA PRINCIPAL DE BABOR II

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada (Reg. Curvilínea)

$$\text{TBN} = 14,46174259 * (0,99988275) ^ \text{ Horas de trabajo}$$

## Hierro

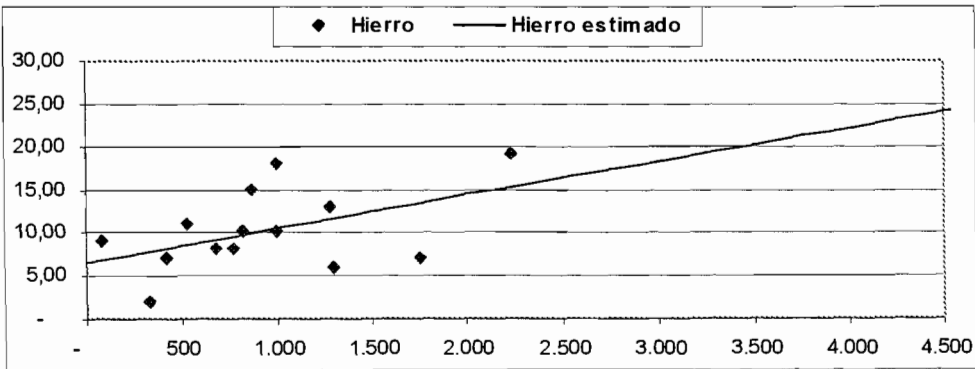


FIGURA 7.28 DATOS Y CURVA HIERRO MÁQUINA P. DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Hierro} = 6,57 + 0,0039009 \text{ Horas de trabajo}$$

## Cobre

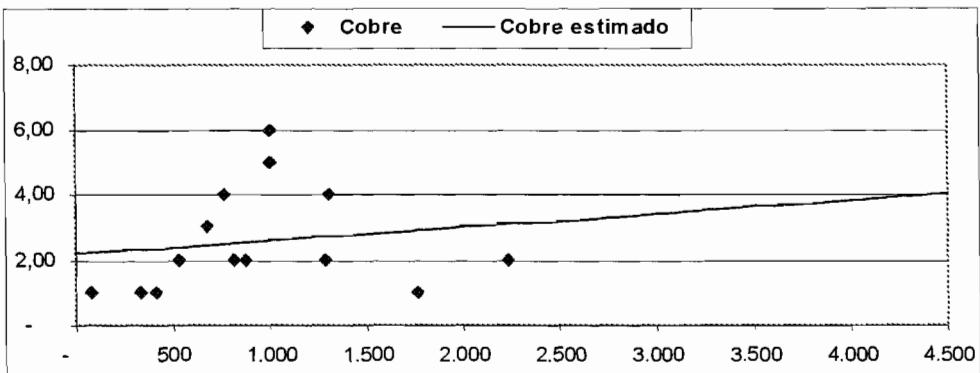


FIGURA 7.29 DATOS Y CURVA COBRE MÁQUINA P. DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Cobre} = 2,19 + 0,0004109 \text{ Horas de trabajo}$$

### Silicio

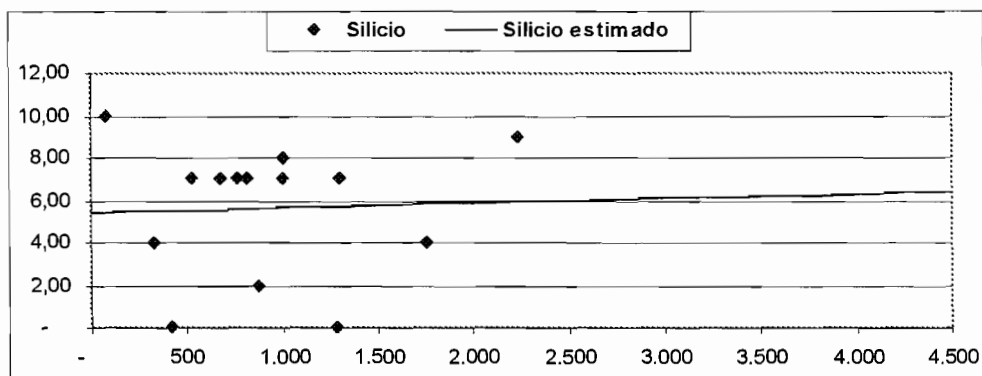


FIGURA 7.30 DATOS Y CURVA SILICIO MÁQUINA P. DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Silicio} = 5,44 + 0,0002208 \text{ Horas de trabajo}$$

## Aluminio

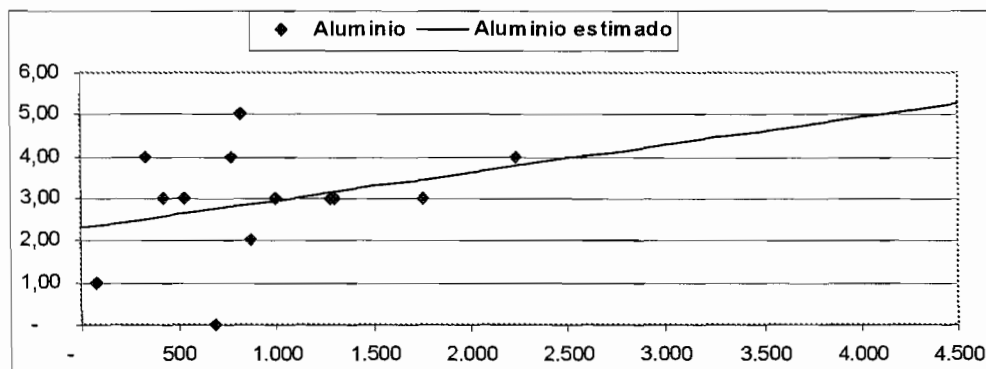


FIGURA 7.31 DATOS Y CURVA ALUMINIO MÁQUINA P. DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Aluminio} = 2,31 + 0,0006604 \text{ Horas de trabajo}$$

## Motor Principal de Estribor

En el apéndice B, Gráficas Máquina Principal de Estribor se detallan la obtención de cada unas de las siguientes gráficas y líneas de tendencia generadas.

Al evaluar los parámetros de control del Motor Principal de Estribor se graficaron los puntos correspondientes a los resultados obtenidos en función a las horas de trabajo del aceite. Adicionalmente se generó la curva de ajuste de la tendencia de los puntos.

En los gráficos siguientes se encuentra la representación de la curva linealizada por cada parámetro de control, en la que se pudo obtener una representación gráfica de la tendencia que mantiene el lubricante en su trabajo en función de las horas de trabajo.

### Viscosidad

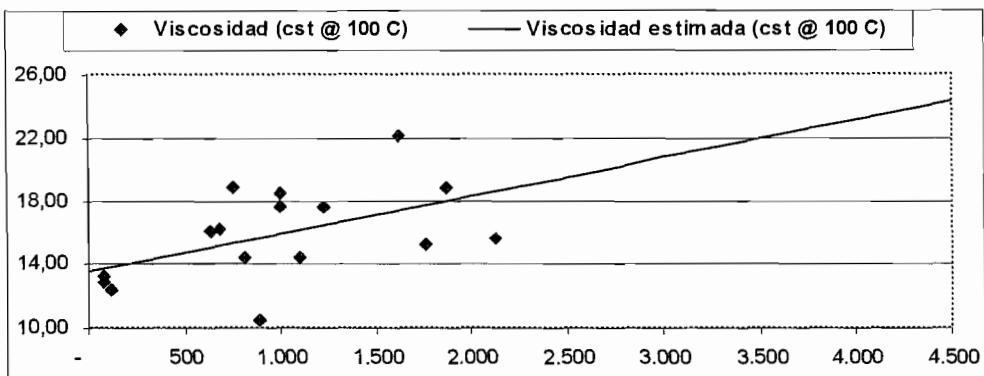


FIGURA 7.32 DATOS Y CURVA VISCOSIDAD MÁQUINA P. ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Viscosidad} = 13,50 + 0,002411 \text{ Horas de trabajo}$$

**TBN**

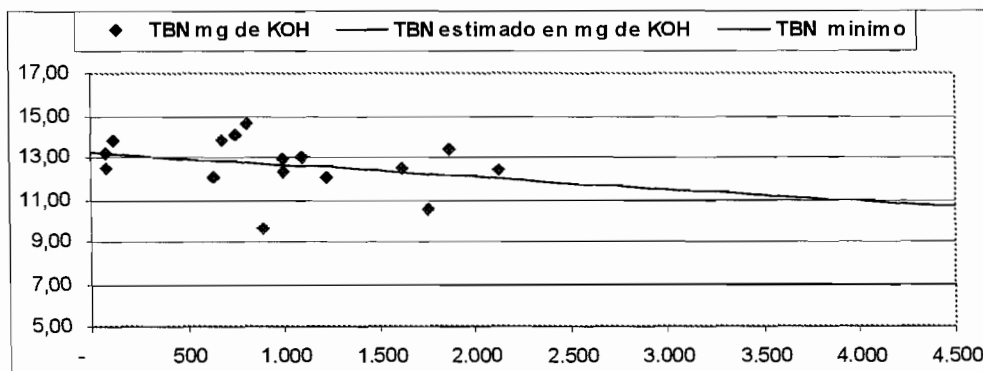


FIGURA 7.33 DATOS Y CURVA TBN MÁQUINA P. DE ESTRIBOR I

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada (Mín. Cuadrados)

$$TBN = 13,23 - 0,0005744 \text{ Horas de trabajo}$$

**TBN**

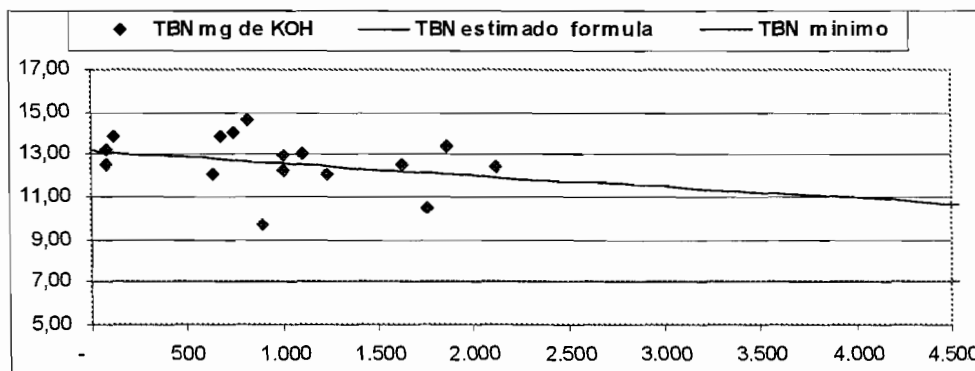


FIGURA 7.34 DATOS Y CURVA TBN MÁQUINA P. DE ESTRIBOR II

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada (Reg. Curvilínea)

$$\text{TBN} = 13,1821876 * (0,999954154) ^ \text{Horas de trabajo}$$

### Hierro

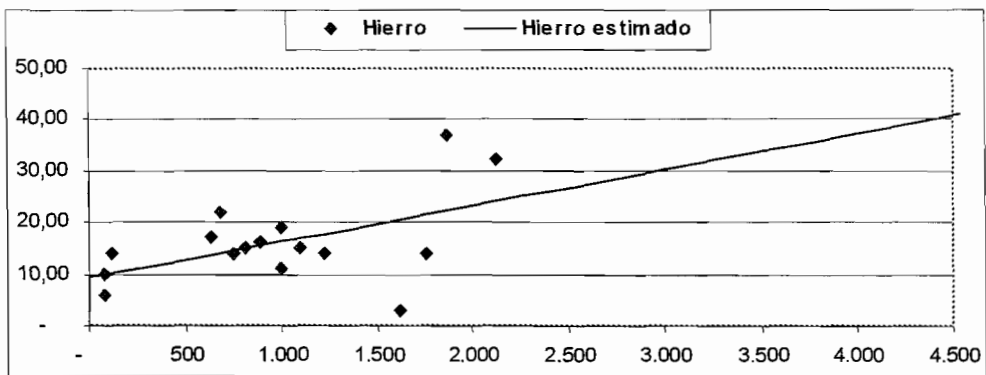


FIGURA 7.35 DATOS Y CURVA HIERRO MÁQUINA P. DE ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Hierro} = 9,31 + 0,0069861 \text{ Horas de trabajo}$$



## Cobre

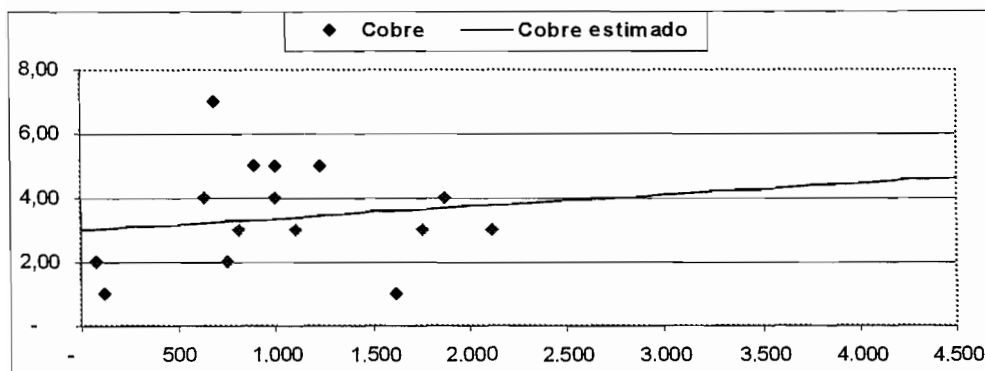


FIGURA 7.36 DATOS Y CURVA COBRE MÁQUINA P. DE ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Cobre} = 3,01 + 0,0003688 \text{ Horas de trabajo}$$

## Silicio

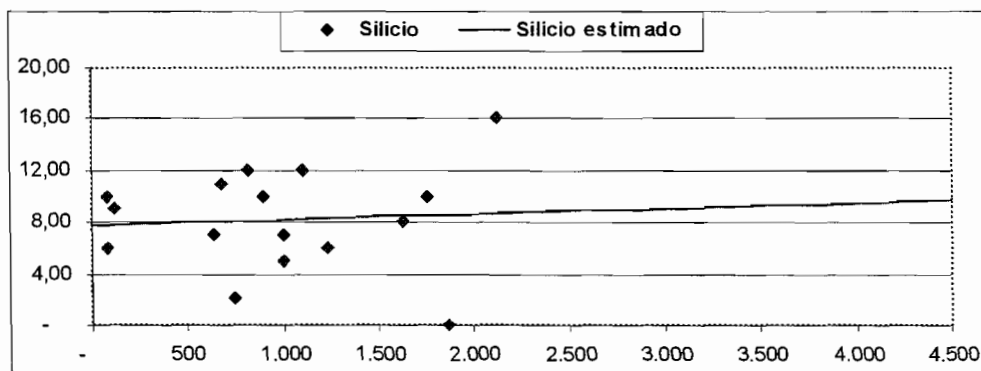


FIGURA 7.37 DATOS Y CURVA SILICIO MÁQUINA P. DE ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Silicio} = 7,75 + 0,0004422 \text{ Horas de trabajo}$$

### Aluminio

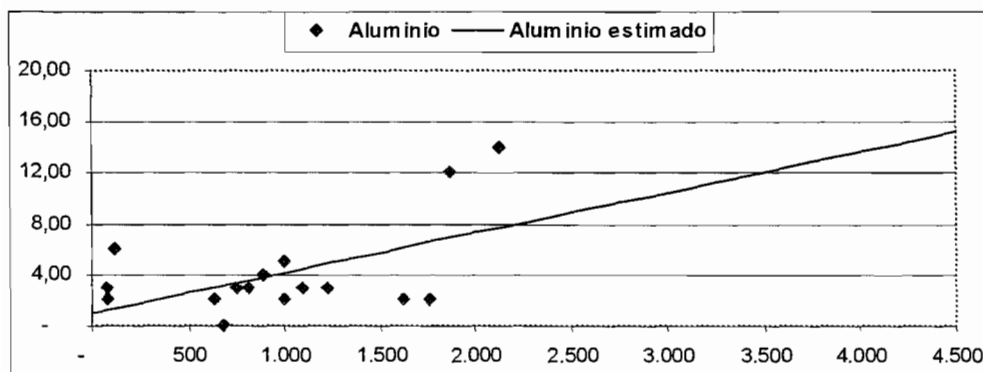


FIGURA 7.38 DATOS Y CURVA ALUMINIO MÁQUINA P. DE ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Aluminio} = 1,01 + 0,0031655 \text{ Horas de trabajo}$$

### Motor Auxiliar de Babor

En el apéndice C, Gráficas Máquina Auxiliar de Babor se detallan la obtención de cada una de las siguientes gráficas y líneas de tendencia generadas.

Al evaluar los parámetros de control del Motor Auxiliar de Babor se graficaron los puntos correspondientes a los resultados obtenidos en función a las horas de trabajo del aceite. Adicionalmente se generó la curva de ajuste de la tendencia de los puntos.

En los gráficos siguientes se encuentra la representación de la curva linealizada por cada parámetro de control, en la que se pudo obtener una representación gráfica de la tendencia que mantiene el lubricante en su trabajo en función de las horas de trabajo.

### Viscosidad

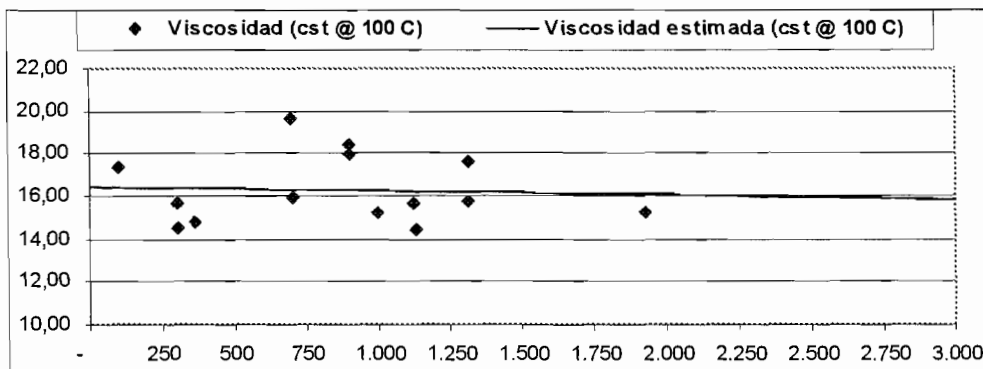


FIGURA 7.39 DATOS Y CURVA VISCOSIDAD MÁQUINA A. DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Viscosidad} = 16,44 - 0,000194 \text{ Horas de trabajo}$$

**TBN**

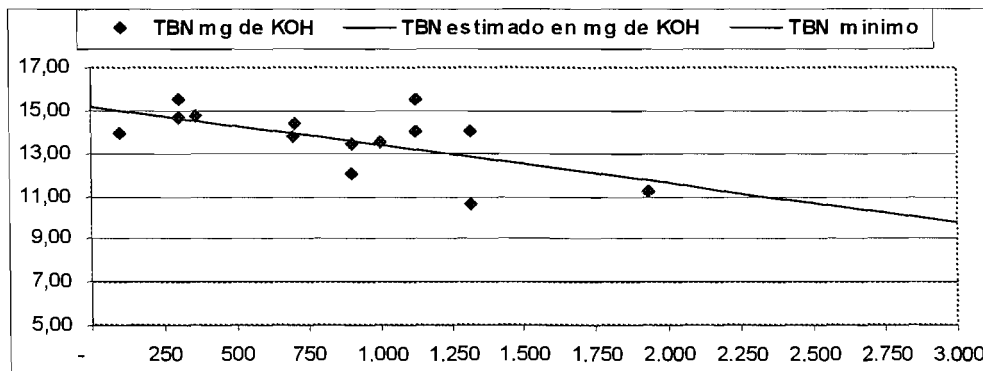


FIGURA 7.40 DATOS Y CURVA TBN MÁQUINA AUXILIAR DE BABOR I

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada (Mín. Cuadrados)

$$TBN = 15,20 - 0,0017919 \text{ Horas de trabajo}$$

**TBN**

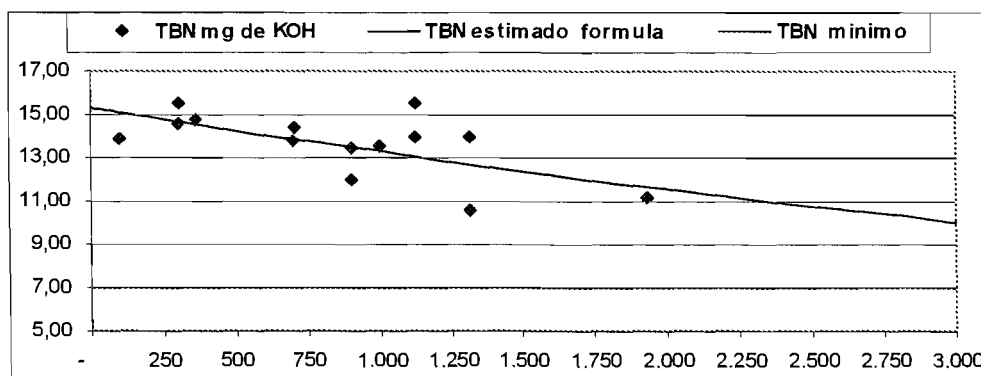


FIGURA 7.41 DATOS Y CURVA TBN MÁQUINA AUXILIAR DE BABOR II

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada (Reg. Curvilínea)

$$\text{TBN} = 15,31660445 * (0,999860119) ^ \text{Horas de trabajo}$$

### Hierro

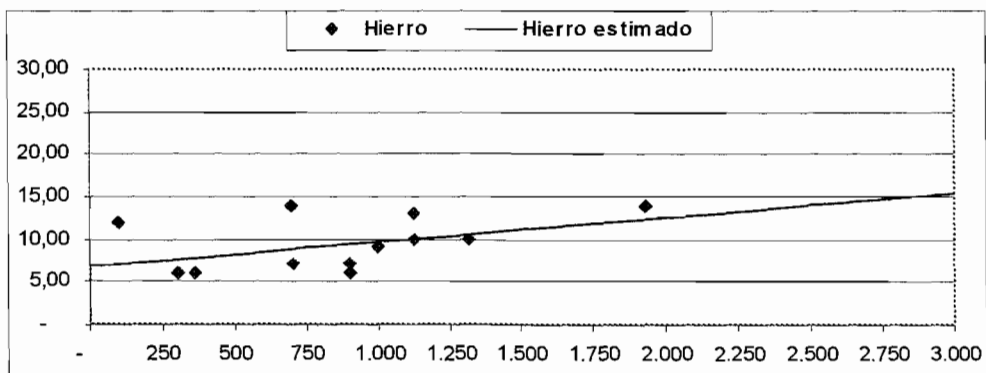


FIGURA 7.42 DATOS Y CURVA HIERRO MÁQUINA A. DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Hierro} = 6,76 + 0,0029249 \text{ Horas de trabajo}$$

## Cobre

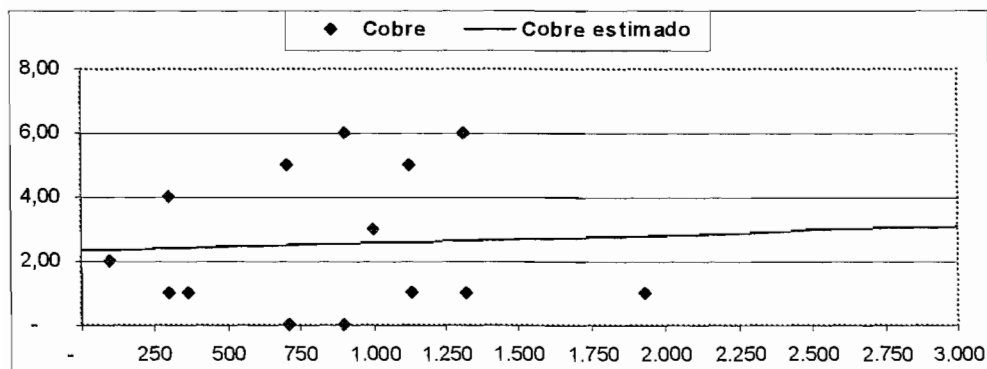


FIGURA 7.43 DATOS Y CURVA COBRE MÁQUINA AUXILIAR DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Cobre} = 2,36 + 0,0002449 \text{ Horas de trabajo}$$

## Silicio

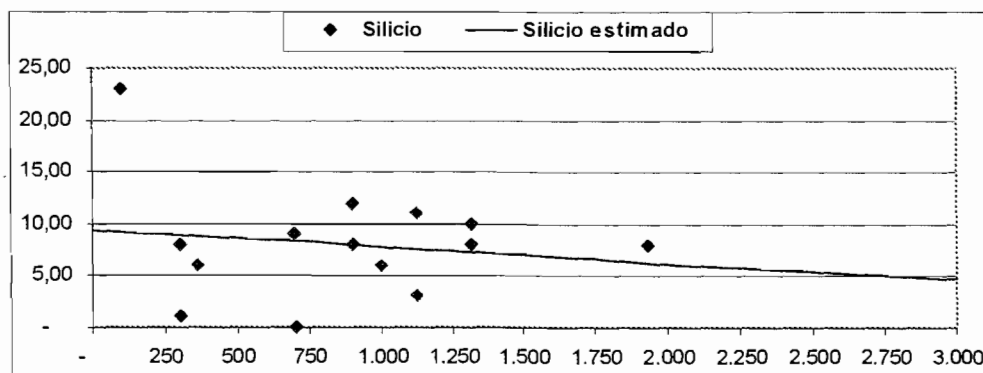


FIGURA 7.44 DATOS Y CURVA SILICIO MÁQUINA AUXILIAR DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Silicio} = 9,46 - 0,0016039 \text{ Horas de trabajo}$$

### Aluminio

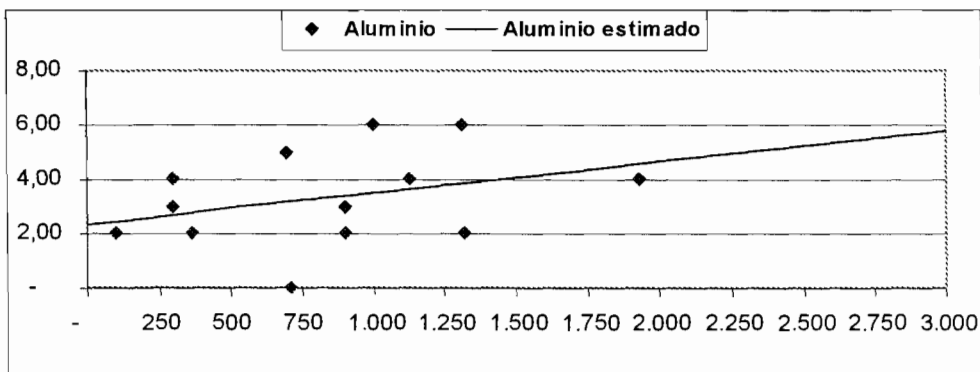


FIGURA 7.45 DATOS Y CURVA ALUMINIO MÁQUINA A. DE BABOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Aluminio} = 2,36 + 0,0011492 \text{ Horas de trabajo}$$

### Motor Auxiliar de Estribor

En el apéndice D, Gráficas Máquina Auxiliar de Estribor se detallan la obtención de cada una de las siguientes gráficas y líneas de tendencia generadas.

Al evaluar los parámetros de control del Motor Auxiliar de Estribor se graficaron los puntos correspondientes a los resultados obtenidos en función a las horas de trabajo del aceite. Adicionalmente se generó la curva de ajuste de la tendencia de los puntos.

En los gráficos siguientes se encuentra la representación de la curva linealizada por cada parámetro de control, en la que se pudo obtener una representación gráfica de la tendencia que mantiene el lubricante en su trabajo en función de las horas de trabajo.

### Viscosidad

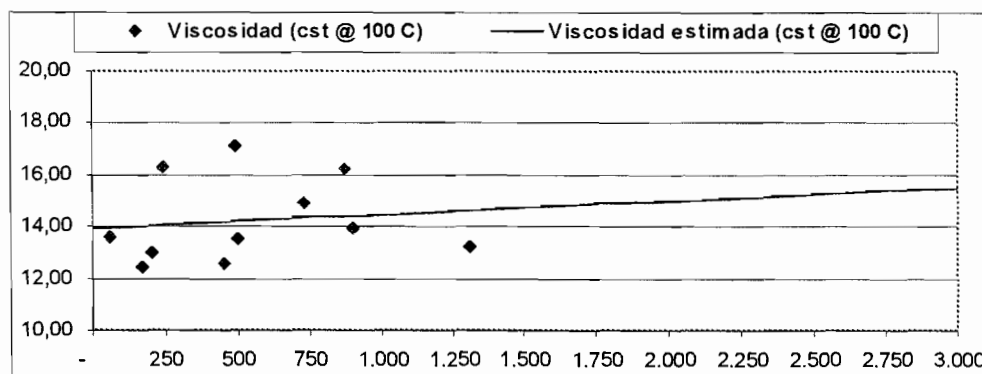


FIGURA 7.46 DATOS Y CURVA VISCOSIDAD MÁQUINA A. ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Viscosidad} = 13,97 - 0,000509 \text{ Horas de trabajo}$$



## TBN

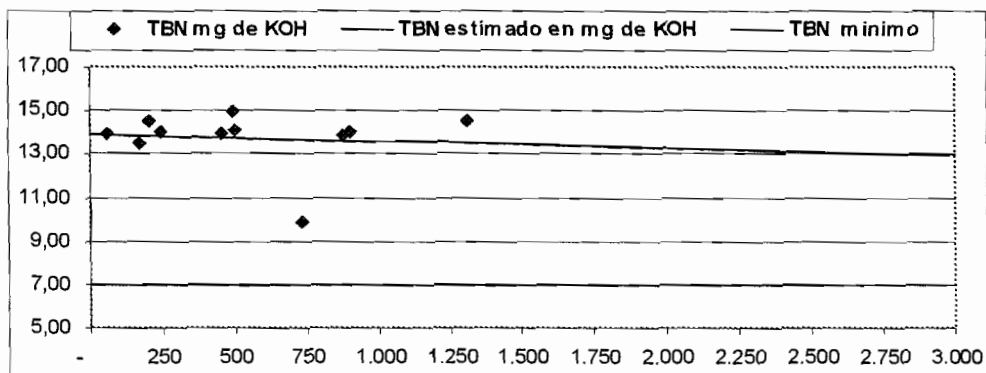


FIGURA 7.47 DATOS Y CURVA TBN MÁQUINA A. DE ESTRIBOR I

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada (Mín. Cuadrados)

$$\text{TBN} = 13,89 - 0,0003025 \text{ Horas de trabajo}$$

## TBN

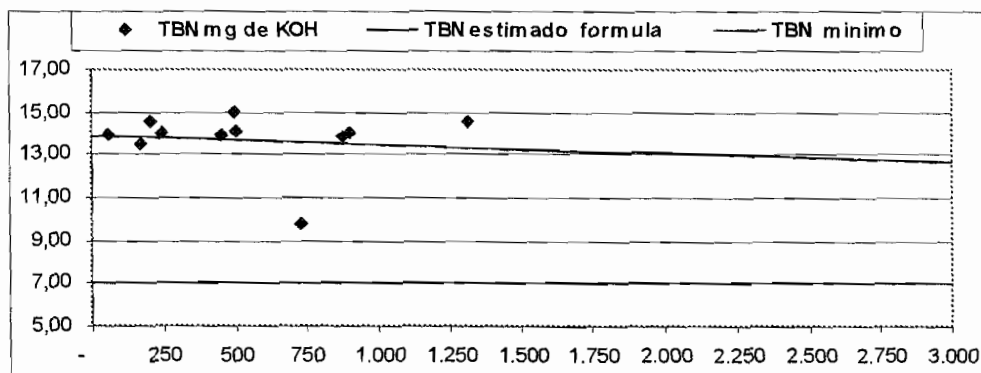


FIGURA 7.48 DATOS Y CURVA TBN MÁQUINA A. DE ESTRIBOR II

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada (Reg. Curvilínea)

$$\text{TBN} = 13,86484804 * (0,999971073) ^ \text{Horas de trabajo}$$

## Hierro

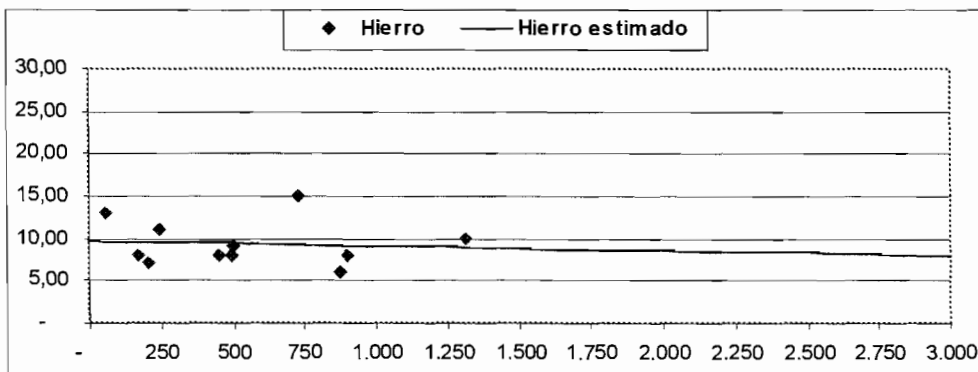


FIGURA 7.49 DATOS Y CURVA HIERRO MÁQUINA A. DE ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Hierro} = 9,66 - 0,0005461 \text{ Horas de trabajo}$$

## Cobre

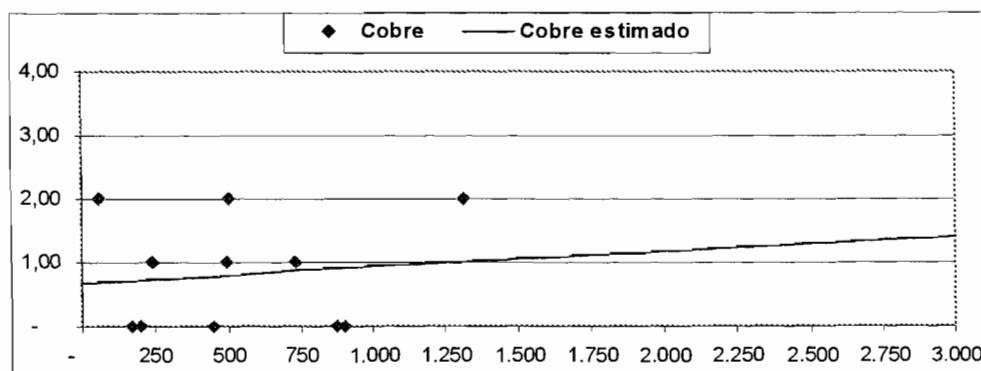


FIGURA 7.50 DATOS Y CURVA COBRE MÁQUINA A. DE ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Cobre} = 0,69 + 0,0002419 \text{ Horas de trabajo}$$

## Silicio

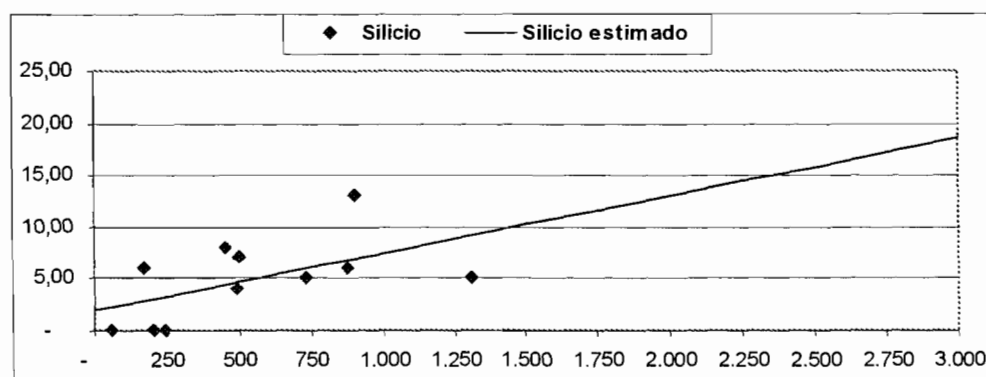


FIGURA 7.51 DATOS Y CURVA SILICIO MÁQUINA A. DE ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Silicio} = 1,90 + 0,0055585 \text{ Horas de trabajo}$$

### Aluminio

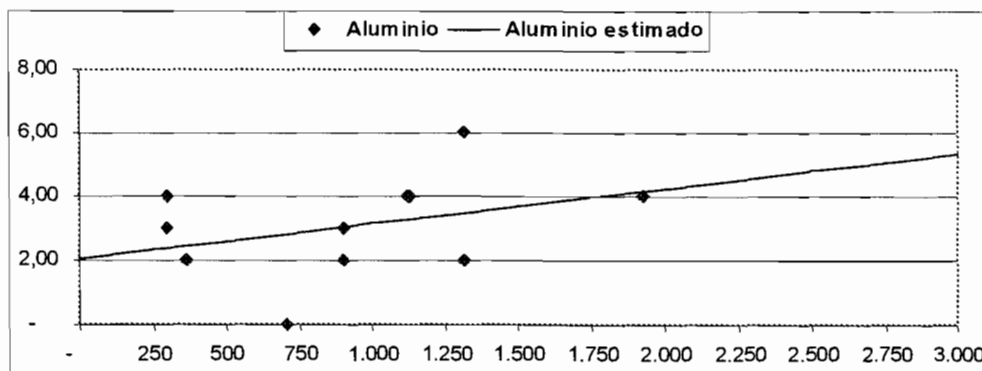


FIGURA 7.52 DATOS Y CURVA ALUMINIO MÁQUINA A. DE ESTRIBOR

Con la gráfica anterior se determinó la siguiente línea de tendencia de la curva generada

$$\text{Aluminio} = 2,06 + 0,0010984 \text{ Horas de trabajo}$$

### 7.3 Programa de seguimiento

Una vez que se ha revisó el esquema que presentaran cada uno de los parámetros de control para cada uno de los motores se pudieron determinar los siguientes lineamientos de seguimiento, que nos permiten evaluar continuamente el desempeño del producto en el motor y adicionalmente el comportamiento de la tasa de desgaste de los equipos.

Al revisar el grupo de curvas de los motores principales se pudieron determinar los siguientes lineamientos de control para el programa de seguimiento:

- Se deben tomar muestras de aceite del depósito de aceite de los motores principales cada 1,000 horas. Esto nos permitirá confirmar la tendencia determinada en los parámetros de control.
- El control del consumo de aceite debe ser tomado en cuenta, para determinar si existe aumento del consumo de aceite por horas de trabajo, en relación al histórico de consumo que mantenga el motor.
- Las muestras de aceite deben ser extraídas siempre en el mismo lugar para lograr una repetibilidad en la toma de muestras.
- El drenaje del aceite de los motores principales se puede pasar a 4,000 horas de operación.

- En la máquina principal de estribor se requiere tener especial seguimiento al funcionamiento del sistema de inyección para evitar la generación y acumulación excesiva de hollín.

Al revisar el grupo de curvas de los motores auxiliares, se determinan los siguientes lineamientos de control para el programa de seguimiento:

- Se deben tomar muestras de aceite del depósito de aceite de los motores auxiliares cada 500 horas a partir de las 1,000 horas de operación. Esto nos permitirá confirmar la tendencia determinada en los parámetros de control.
- El control del consumo de aceite debe ser tomado en cuenta, para determinar si existe aumento del consumo de aceite por horas de trabajo, en relación al histórico de consumo que mantenga el motor.
- Las muestras de aceite deben ser extraídas siempre en el mismo lugar para lograr una repetibilidad en la toma de muestras.
- El drenaje del aceite de los motores auxiliares se puede pasar a 3,000 horas de operación.
- En la máquina principal de estribor se tiene que tener especial seguimiento al funcionamiento del sistema de inyección para evitar la generación y acumulación excesiva de hollín.

# CAPÍTULO 8

## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se revisan los resultados obtenidos en el análisis de datos del capítulo anterior. Al revisar los datos obtenidos se puede estimar el funcionamiento de los motores y confirmar al operador del equipo cuales son las recomendaciones de trabajo para mejorar el desempeño de los motores.

### 8.1 De orden técnico

Comenzamos con la revisión de los resultados más importantes de cada uno de los motores y sus correspondientes detalles, que nos permiten estimar el desempeño del aceite y el comportamiento del desgaste en el motor a partir del seguimiento de los metales de desgaste.

En el análisis del TBN se tienen dos tipos de ajuste de curva. Esto se realizó para generar la comparación entre la determinación de los dos sistemas, ya que la forma en que se presenta el desempeño de la

evolución del TBN hace una baja del tipo logarítmico en función a las horas de trabajo.

A partir del análisis de las curvas se obtienen las tasas de incremento de las variables analizadas, que nos permiten estimar los parámetros de desgaste del equipo en función a las horas de operación del aceite.

Adicionalmente se controlan los parámetros de desgaste del aceite tales como Viscosidad y TBN, en los que se averigua la tasa de incremento por contaminación y en el segundo caso el esquema de estabilidad del TBN en función a las horas trabajadas por el aceite.

### **Motor Principal de Babor**

Al revisar el conjunto de gráficos se puede determinar los siguientes elementos:

- La viscosidad mantiene un esquema estable en relación a las horas de trabajo. Bajo el análisis de la curva de viscosidad en función a las horas de trabajo, el aceite llegaría sin problemas a un periodo de cambio de aceite de 4,500 horas. Al esquema de las 4,500 horas, la viscosidad estimada sería de 17 cst. @ 100 °C., encontrándose dentro del rango de 12 a 18 cst. @ 100 °C.



- El TBN se revisa a partir del ajuste de curva por el método de los mínimos cuadrados como por el de ajuste de una curva a partir de una regresión curvilínea. En los dos ajustes de curva a partir de los datos disponibles se determina que el TBN estimado nunca es menor de 7, lo que determina que el desempeño del producto permite su operación hasta las 4,500 horas. El TBN a 4,500 horas bajo el ajuste de regresión curvilínea llega a 8.53 mg. de KOH, que es superior al mínimo establecido.
- La acumulación de hierro a partir del desgaste metálico ocurrido en el interior del motor, se mide en partes por millón y corresponde a las partículas que se desprenden por el efecto de la fricción dentro del motor. Se determina la curva de acumulación del hierro en la que se estima la condición a las 4,500 horas que es de 24 ppm., que se encuentra muy por debajo de los 125 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.
- La acumulación de cobre a partir del desgaste metálico ocurrido en el interior del motor, se mide en partes por millón y corresponde a las partículas que se desprenden por el efecto de la fricción dentro del motor. Se determina la curva de acumulación del cobre en la que se estima la condición a las 4,500 horas que es de 4 ppm., que se encuentra muy por debajo de los 50 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.
- La acumulación de silicio por ingreso de polvo ambiental genera desgaste en el motor al ser un abrasivo que afecta la operación del

motor y produce desgaste. Se determina la curva de acumulación del silicio en la que se estima la condición a las 4,500 horas que es de 6 ppm., que se encuentra por debajo de los 25 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.

- La acumulación de aluminio a partir del desgaste metálico, se acumula en el interior del motor. Lo que nos permite determinar la curva de acumulación del aluminio en la que se estima la condición a las 4,500 horas que es de 5 ppm., que se encuentra por debajo de los 20 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.

Revisando la configuración mecánica del equipo se puede estimar la cantidad de hierro a desgastar (Datos aproximados a la situación real, que nos permite estimar el desempeño esperado del aceite), lo que nos ayuda a determinar la eficiencia de la protección del aceite al realizar el trabajo en el motor.

Para encontrar el dato de la cantidad del hierro a desgastar en función de las horas de funcionamiento del motor se puede analizar el siguiente esquema.

Asumiendo que la totalidad del desgaste del hierro que se produce solamente por pérdida de material de las camisas de los cilindros, se realiza el siguiente análisis:

Diámetro del cilindro nuevo	225.000 mm.
Diámetro del cilindro a las 50,000 horas de trabajo	226.000 mm.
Carrera del pistón	300 mm.
Número de cilindros	16
Volumen de aceite en el cárter en galones	495
Volumen de aceite en el cárter en litros	1,873.58

Primero se calcula el volumen de hierro de la capa de desgaste de las camisas, que es la cantidad máxima de hierro que se puede perder en la superficie de la camisa, ya que posterior a esta medida es necesario realizar un cambio total de las camisas de los cilindros.

$$\text{Volumen} = \text{PI} * \text{Carrera} * (\text{Diámetro exterior}^2 - \text{Diámetro interior}^2) / 4$$

$$\text{Volumen} = 3.1416 * 0.3 * (0.226^2 - 0.225^2) / 4$$

$$\text{Volumen} = 0.0001063 \text{ m}^3 / \text{por camisa}$$

En 16 cilindros, el volumen final sería:

$$\text{Volumen Total} = 0.0017002 \text{ m}^3.$$

Tomando en consideración la densidad del hierro 7,800 kg. / m<sup>3</sup>.

Se estima de la ecuación  $\text{Masa} = \text{Densidad} * \text{Volumen}$

Cantidad de partículas de hierro (16 cilindros a 50,000 horas)

$$\text{Hierro} = 7,800 * 0.0017002 = 13.26 \text{ kg.} / 50,000 \text{ horas}$$

Cantidad de partículas de hierro (16 cilindros a 1,000 horas)

$$\text{Hierro} = 0.2652 \text{ kg.} / 1,000 \text{ horas}$$

Con un volumen de aceite de 1,873.58 litros y despreciando el consumo de aceite del equipo, la concentración de hierro en el aceite será la siguiente:

Concentración de hierro = Masa de hierro / Volumen de aceite

Hierro = (0.2625 kg. /1,000 h.) / (1,873.58 litros)

Hierro = 0.0001416 kg. / lt. 1,000 h.

Hierro = 141.57 mg. / lt. 1,000 h.

Hierro = 141.57 ppm. / 1,000 h.

Asumiendo que el desgaste normal no se produce en la totalidad de las camisas del cilindro, sino solamente en el lugar que se recuesta el pistón cuando existe desgaste de la camisa, se tomaría como referencia la cuarta parte del volumen a desgastar de la camisa, como la cantidad máxima de hierro a perder por desgaste. Entonces la concentración máxima de hierro a encontrar en el aceite sería la siguiente:

Hierro = 35.39 ppm. / 1,000 h.

Con un cambio de aceite proyectado para este tipo de equipo en 4,000 horas la concentración de hierro a encontrar en el aceite del motor sería la siguiente:

Hierro = 141.57 ppm. / 4,000 h.

Con estos datos estimados se pueden evaluar los parámetros de control del aceite del motor, y se comprueba el desempeño del aceite en el motor.

Al revisar los datos correspondientes al desgaste del hierro a partir de la curva obtenida con los resultados de los análisis de laboratorio, para la condición de cambio de aceite a las 4,000 horas el resultado estimado sería 22.18 ppm.

Con este resultado, comparado con el estimado de la configuración mecánica del equipo, se puede tener la certeza que este mantiene un sistema de protección adecuado con los requerimientos del equipo, e incluso presenta una concentración de hierro inferior a la cantidad máxima permisible.

Al revisar el conjunto de parámetros controlados del aceite, conjuntamente con la comparación de la cantidad máxima de hierro estimado por la configuración del equipo, se puede establecer que las condiciones de operación son adecuadas para la recomendación de cambio de aceite a las 4,000 horas. Con la consideración de que el control de la viscosidad se debe realizar cada 1,000 horas para evitar que por ingreso de combustible al motor disminuya la viscosidad o por el caso de que inyectores que no atomicen correctamente el combustible produzcan gran cantidad de hollín en el motor y suba la viscosidad. En este conjunto evaluado también es de

considera el ingreso de abrasivos al motor por contaminación por polvo, lo que se debe mantener controlado a través del silicio.

En resumen las tasas de variación de los parámetros evaluados son las siguientes, conjuntamente con sus valores iniciales:

- Viscosidad (cst.) =  $13.07 + 0.000873$  Horas de trabajo
- TBN (mg. de KOH) =  $14.42 - 0.0014950$  Horas de trabajo
- TBN (mg. de KOH) =  $14.46174259 * 0.99988275 ^$  Horas de trabajo
- Hierro (ppm.) =  $6.57 + 0.0030009$  Horas de trabajo
- Cobre (ppm.) =  $2.19 + 0.0004109$  Horas de trabajo
- Silicio (ppm.) =  $5.44 + 0.0002208$  Horas de trabajo
- Aluminio (ppm.) =  $2.31 + 0.0006604$  Horas de trabajo

### **Motor Principal de Estribor**

Al revisar el conjunto de gráficos se puede determinar los siguientes elementos:

- La viscosidad mantiene un incremento en relación a las horas de trabajo. Bajo el análisis de la curva de viscosidad en función a las horas de trabajo, el aceite tiene problemas para llegar a las 2,000 horas, en que la viscosidad estimada sería 18.32 cst. Al esquema de

las 4,500 horas, la viscosidad estimada sería de 24.35 cst. @ 100 °C., encontrándose fuera del rango de 12 a 18 cst. @ 100 °C.

- El TBN se revisa a partir del ajuste de curva por el método de los mínimos cuadrados como por el de ajuste de una curva a partir de una regresión curvilínea. En los dos ajustes de curva a partir de los datos disponibles se determina que el TBN estimado nunca es menor de 7, lo que determina que el desempeño del producto permite su operación hasta las 4,500 horas. El TBN a 4,500 horas bajo el ajuste de regresión curvilínea llega a 10.72 mg. de KOH, que es superior al mínimo establecido.
- La acumulación de hierro a partir del desgaste metálico ocurrido en el interior del motor, se mide en partes por millón y corresponde a las partículas que se desprenden por el efecto de la fricción dentro del motor. Se determina la curva de acumulación del hierro en la que se estima la condición a las 4,500 horas que es de 41 ppm., que se encuentra muy por debajo de los 125 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.
- La acumulación de cobre a partir del desgaste metálico ocurrido en el interior del motor, se mide en partes por millón y corresponde a las partículas que se desprenden por el efecto de la fricción dentro del motor. Se determina la curva de acumulación del cobre en la que se estima la condición a las 4,500 horas que es de 5 ppm., que se encuentra muy por debajo de los 50 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.

- La acumulación de silicio por ingreso de polvo ambiental genera desgaste en el motor al ser un abrasivo que afecta la operación del motor y produce desgaste. Se determina la curva de acumulación del silicio en la que se estima la condición a las 4,500 horas que es de 10 ppm., que se encuentra por debajo de los 25 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.
- La acumulación de aluminio a partir del desgaste metálico, se acumula en el interior del motor. Lo que nos permite determinar la curva de acumulación del aluminio en la que se estima la condición a las 4,500 horas que es de 15 ppm., que se encuentra por debajo de los 20 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.

Revisando la configuración mecánica del equipo se puede estimar la cantidad de hierro a desgastar (Datos aproximados a la situación real, que nos permite estimar el desempeño esperado del aceite), lo que nos ayuda a determinar la eficiencia de la protección del aceite al realizar el trabajo en el motor.

Para encontrar el dato de la cantidad del hierro a desgastar en función de las horas de funcionamiento del motor se puede analizar el siguiente esquema.



Asumiendo que la totalidad del desgaste del hierro que se produce solamente por pérdida de material de las camisas de los cilindros, se realiza el siguiente análisis:

Diámetro del cilindro nuevo	225.000 mm.
Diámetro del cilindro a las 50,000 horas de trabajo	226.000 mm.
Carrera del pistón	300 mm.
Número de cilindros	16
Volumen de aceite en el cárter en galones	495
Volumen de aceite en el cárter en litros	1,873.58

Primero se calcula el volumen de hierro de la capa de desgaste de las camisas, que es la cantidad máxima de hierro que se puede perder en la superficie de la camisa, ya que posterior a esta medida es necesario realizar un cambio total de las camisas de los cilindros.

$$\text{Volumen} = \text{PI} * \text{Carrera} * (\text{Diámetro exterior}^2 - \text{Diámetro interior}^2) / 4$$

$$\text{Volumen} = 3.1416 * 0.3 * (0.226^2 - 0.225^2) / 4$$

$$\text{Volumen} = 0.0001063 \text{ m}^3. / \text{por camisa}$$

En 16 cilindros, el volumen final sería:

$$\text{Volumen Total} = 0.0017002 \text{ m}^3.$$

Tomando en consideración la densidad del hierro 7,800 kg. / m<sup>3</sup>.

Se estima de la ecuación  $\text{Masa} = \text{Densidad} * \text{Volumen}$

Cantidad de partículas de hierro (16 cilindros a 50,000 horas)

$$\text{Hierro} = 7,800 * 0.0017002 = 13.26 \text{ kg. / 50,000 horas}$$

Cantidad de partículas de hierro (16 cilindros a 1,000 horas)

$$\text{Hierro} = 0.2652 \text{ kg. / 1,000 horas}$$

Con un volumen de aceite de 1,873.58 litros y despreciando el consumo de aceite del equipo, la concentración de hierro en el aceite será la siguiente:

Concentración de hierro = Masa de hierro / Volumen de aceite

$$\text{Hierro} = (0.2625 \text{ kg. / 1,000 h.}) / (1,873.58 \text{ litros})$$

$$\text{Hierro} = 0.0001416 \text{ kg. / lt. 1,000 h.}$$

$$\text{Hierro} = 141.57 \text{ mg. / lt. 1,000 h.}$$

$$\text{Hierro} = 141.57 \text{ ppm. / 1,000 h.}$$

Asumiendo que el desgaste normal no se produce en la totalidad de las camisas del cilindro, sino solamente en el lugar que se recuesta el pistón cuando existe desgaste de la camisa, se tomaría como referencia la cuarta parte del volumen a desgastar de la camisa, como la cantidad máxima de hierro a perder por desgaste. Entonces la concentración máxima de hierro a encontrar en el aceite sería la siguiente:

$$\text{Hierro} = 35.39 \text{ ppm. / 1,000 h.}$$

Con un cambio de aceite proyectado para este tipo de equipo en 4,000 horas la concentración de hierro a encontrar en el aceite del motor sería la siguiente:

Hierro = 141.57 ppm. / 4,000 h.

Con estos datos estimados se pueden evaluar los parámetros de control del aceite del motor, y se comprueba el desempeño del aceite en el motor.

Al revisar los datos correspondientes al desgaste del hierro a partir de la curva obtenida con los resultados de los análisis de laboratorio, para la condición de cambio de aceite a las 4,000 horas el resultado estimado sería 37.26 ppm.

Con este resultado, comparado con el estimado de la configuración mecánica del equipo, se puede tener la certeza que el mantiene un sistema de protección adecuado con los requerimientos del equipo, e incluso presenta una concentración de hierro inferior a la cantidad máxima permisible.

Al revisar el conjunto de parámetros controlados del aceite, conjuntamente con la comparación de la cantidad máxima de hierro estimado por la configuración del equipo, se puede establecer que las condiciones de operación son adecuadas para la recomendación de cambio de aceite a las

4,000 horas, siempre y cuando se pueda controlar la acumulación de hollín en el motor al realizar revisiones tanto del sistema de inyección como del sistema de purificación de aceite.

Con la evidencia de la presencia de hollín en el aceite, que genera el aumento de viscosidad, se debe mejorar el control del aceite realizando pruebas adicionales cada 500 horas y mantener el control de la viscosidad.

En resumen las tasas de variación de los parámetros evaluados son las siguientes, conjuntamente con sus valores iniciales:

- Viscosidad (cst.) =  $13.50 + 0.002411$  Horas de trabajo
- TBN (mg. de KOH) =  $13.23 - 0.0005744$  Horas de trabajo
- TBN (mg. de KOH) =  $13.1821876 * 0.999954154 ^$  Horas de trabajo
- Hierro (ppm.) =  $9.31 + 0.0069861$  Horas de trabajo
- Cobre (ppm.) =  $3.01 + 0.0003688$  Horas de trabajo
- Silicio (ppm.) =  $7.75 + 0.0004422$  Horas de trabajo
- Aluminio (ppm.) =  $1.01 + 0.0031655$  Horas de trabajo

### **Motor Auxiliar de Babor**

Al revisar el conjunto de gráficos se puede determinar los siguientes elementos:

- La viscosidad se mantiene estable en relación a las horas de trabajo. Bajo el análisis de la curva de viscosidad en función a las horas de trabajo, el aceite mantiene su viscosidad a las 2,000 horas, ya que la viscosidad estimada sería 16.05 cst. Al esquema de las 3,000 horas, la viscosidad estimada sería de 15.85 cst. @ 100 °C., encontrándose dentro del rango de 12 a 18 cst. @ 100 °C.
- El TBN se revisa a partir del ajuste de curva por el método de los mínimos cuadrados como por el de ajuste de una curva a partir de una regresión curvilínea. En los dos ajustes de curva a partir de los datos disponibles se determina que el TBN estimado nunca es menor de 7, lo que determina que el desempeño del producto permite su operación hasta las 3,000 horas. El TBN a 3,000 horas bajo el ajuste de regresión curvilínea llega a 10.07 mg. de KOH, que es superior al mínimo establecido.
- La acumulación de hierro a partir del desgaste metálico ocurrido en el interior del motor, se mide en partes por millón y corresponde a las partículas que se desprenden por el efecto de la fricción dentro del motor. Se determina la curva de acumulación del hierro en la que se estima la condición a las 3,000 horas que es de 16 ppm., que se encuentra muy por debajo de los 125 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.
- La acumulación de cobre a partir del desgaste metálico ocurrido en el interior del motor, se mide en partes por millón y corresponde a las partículas que se desprenden por el efecto de la fricción dentro

del motor. Se determina la curva de acumulación del cobre en la que se estima la condición a las 3,000 horas que es de 3 ppm., que se encuentra muy por debajo de los 50 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.

- La acumulación de silicio por ingreso de polvo ambiental genera desgaste en el motor al ser un abrasivo que afecta la operación del motor y produce desgaste. Se determina la curva de acumulación del silicio en la que se estima la condición a las 3,000 horas que es de 5 ppm., que se encuentra por debajo de los 25 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.
- La acumulación de aluminio a partir del desgaste metálico, se acumula en el interior del motor. Lo que nos permite determinar la curva de acumulación del aluminio en la que se estima la condición a las 3,000 horas que es de 6 ppm., que se encuentra por debajo de los 20 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.

Al revisar el conjunto de parámetros controlados del aceite, conjuntamente con la comparación de la cantidad máxima de hierro estimado por la configuración del equipo, se puede establecer que las condiciones de operación son adecuadas para la recomendación de cambio de aceite a las 3,000 horas, siempre y cuando se pueda controlar la acumulación de hollín en el motor al realizar revisiones tanto del sistema de inyección como del sistema de purificación de aceite.

Con la consideración de que el control del aceite se debe realizar cada 1,000 horas para evitar que por ingreso de combustible al motor se baje la viscosidad o por el caso de que inyectores que no atomicen correctamente el combustible produzcan gran cantidad de hollín en el motor y suba la viscosidad. En este conjunto también se considera el ingreso de abrasivos al motor por contaminación con polvo ambiental, que se debe mantener controlado a través del silicio.

En resumen las tasas de variación de los parámetros evaluados son las siguientes, conjuntamente con sus valores iniciales:

- Viscosidad (cst.) =  $16.44 - 0.000194 \text{ Horas de trabajo}$
- TBN (mg. de KOH) =  $15.20 - 0.0017919 \text{ Horas de trabajo}$
- TBN (mg. de KOH) =  $15.31660445 * 0.999860119 ^ \text{ Horas de trabajo}$
- Hierro (ppm.) =  $6.76 + 0.0029249 \text{ Horas de trabajo}$
- Cobre (ppm.) =  $2.36 + 0.0002449 \text{ Horas de trabajo}$
- Silicio (ppm.) =  $9.46 - 0.0016039 \text{ Horas de trabajo}$
- Aluminio (ppm.) =  $2.36 + 0.0011492 \text{ Horas de trabajo}$

### **Motor Auxiliar de Estribor**

Al revisar el conjunto de gráficos se puede determinar los siguientes elementos:

- La viscosidad se mantiene estable en relación a las horas de trabajo. Bajo el análisis de la curva de viscosidad en función a las horas de trabajo, el aceite mantiene su viscosidad a las 2,000 horas, ya que la viscosidad estimada sería 14.99 cst. Al esquema de las 3,000 horas, la viscosidad estimada sería de 15.50 cst. @ 100 °C., encontrándose dentro del rango de 12 a 18 cst. @ 100 °C.
- El TBN se revisa a partir del ajuste de curva por el método de los mínimos cuadrados como por el de ajuste de una curva a partir de una regresión curvilínea. En los dos ajustes de curva a partir de los datos disponibles se determina que el TBN estimado nunca es menor de 7, lo que determina que el desempeño del producto permite su operación hasta las 3,000 horas. El TBN a 3,000 horas bajo el ajuste de regresión curvilínea llega a 12.71 mg. de KOH, que es superior al mínimo establecido.
- La acumulación de hierro a partir del desgaste metálico ocurrido en el interior del motor, se mide en partes por millón y corresponde a las partículas que se desprenden por el efecto de la fricción dentro del motor. Se determina la curva de acumulación del hierro en la que se estima la condición a las 3,000 horas que es de 8 ppm., que se encuentra muy por debajo de los 125 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.
- La acumulación de cobre a partir del desgaste metálico ocurrido en el interior del motor, se mide en partes por millón y corresponde a las partículas que se desprenden por el efecto de la fricción dentro



del motor. Se determina la curva de acumulación del cobre en la que se estima la condición a las 3,000 horas que es de 1 ppm., que se encuentra muy por debajo de los 50 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.

- La acumulación de silicio por ingreso de polvo ambiental genera desgaste en el motor al ser un abrasivo que afecta la operación del motor y produce desgaste. Se determina la curva de acumulación del silicio en la que se estima la condición a las 3,000 horas que es de 19 ppm., que se encuentra por debajo de los 25 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.
- La acumulación de aluminio a partir del desgaste metálico, se acumula en el interior del motor. Lo que nos permite determinar la curva de acumulación del aluminio en la que se estima la condición a las 3,000 horas que es de 5 ppm., que se encuentra por debajo de los 20 ppm. que se tiene como límite máximo de acumulación.

Al revisar el conjunto de parámetros controlados del aceite, conjuntamente con la comparación de la cantidad máxima de hierro estimado por la configuración del equipo, se puede establecer que las condiciones de operación son adecuadas para la recomendación de cambio de aceite a las 3,000 horas, siempre y cuando se pueda controlar la acumulación de hollín en el motor al realizar revisiones tanto del sistema de inyección como del sistema de purificación de aceite.

Con la consideración de que el control del aceite se debe realizar cada 1,000 horas para evitar que por ingreso de combustible al motor se baje la viscosidad o por el caso de que inyectores que no atomicen correctamente el combustible produzcan gran cantidad de hollín en el motor y suba la viscosidad. En este conjunto también se considera el ingreso de abrasivos al motor por contaminación con polvo ambiental, que se debe mantener controlado a través del silicio.

En resumen las tasas de variación de los parámetros evaluados son las siguientes, conjuntamente con sus valores iniciales:

- Viscosidad (cst.) =  $13.97 + 0.000509$  Horas de trabajo
- TBN (mg. de KOH) =  $13.89 - 0.0003025$  Horas de trabajo
- TBN (mg. de KOH) =  $13.86484804 * 0.999971073 ^$  Horas de trabajo
- Hierro (ppm.) =  $9.66 - 0.0005461$  Horas de trabajo
- Cobre (ppm.) =  $0.69 + 0.0002419$  Horas de trabajo
- Silicio (ppm.) =  $1.90 - 0.0055585$  Horas de trabajo
- Aluminio (ppm.) =  $2.06 + 0.0010984$  Horas de trabajo

## 8.2 De orden económico

Al realizar la revisión de los resultados obtenidos a través del análisis de las tendencias de operación del aceite en cada uno de los equipos, se puede realizar la proyección del cambio en los tiempos de drenaje del

aceite, que va a permitir el reducir el consumo de aceite al aumentar el periodo de cambio de aceite.

Al controlar la viscosidad del aceite en cada uno de los equipos, se puede mantener un control sobre la eficiencia de combustión, ya que en los casos de goteo de combustible por parte de los inyectores o la atomización del combustible no sea adecuada se producen fallas en el aprovechamiento de la combustión, que generan en el primer caso una baja de viscosidad y en el segundo un aumento de viscosidad.

### **Motor Principal de Babor**

Al revisar el nuevo esquema presentado, que es llegar a las 4,000 horas de trabajo en el cambio de aceite se pueden evidenciar ahorros en la utilización del aceite, que genera un beneficio al disminuir el consumo de aceite.

En el esquema siguiente se puede evidenciar el ahorro proyectado en la evaluación.

TABLA 15

## AHORROS PROYECTADOS MÁQUINA PRINCIPAL DE BABOR

## Datos de Equipos

Marca/Modelo	Echebarrie 16V23L
Tipo	Principal Babor
Potencia (Hp)	
Horas Anuales de Operación	6.000,00
Unidad de Volumen	USG
Unidad de Consumo	USG/día

## Lubricante

Intervalo de cambio (Hr)	1500,0	4000,0	
Volumen por cambio (USG)	495,0	495,0	
Cambio anual volumen (USG)	1980,0	742,5	
Consumo (USG/día/24 op. Hrs.)	10,0	10,0	
Consumo anual por cebado (USG)	2500,0	2500,0	
Consumo Anual (USG)	4480,0	3242,5	
Precio (por USG)	\$6,04	\$6,04	
<b>Costo Anual</b>	<b>\$27.059,20</b>	<b>\$19.584,70</b>	<b>\$7.474,50</b>

	Antes	Ahora	Ahorros Anuales
<b>Costos Totales</b>	<b>\$27.059,20</b>	<b>\$19.584,70</b>	<b>\$7.474,50</b>

En este cuadro se puede verificar el potencial ahorro al administrar adecuadamente el control del aceite y sobre todo con este control el lograr que el nuevo periodo de drenaje de aceite sea lo que el equipo requiere.

**Motor Principal de Estribor**

Al revisar el nuevo esquema presentado, que es llegar a las 4,000 horas de trabajo en el cambio de aceite se pueden evidenciar ahorros en la

utilización del aceite, que genera un beneficio al disminuir el consumo de aceite.

En este motor es de especial atención el controlar las fuentes de contaminación del aceite para conseguir el objetivo planteado. En el esquema siguiente se puede evidenciar el ahorro proyectado en la evaluación.

**TABLA 16**

**AHORROS PROYECTADOS MÁQUINA PRINCIPAL DE ESTRIBOR**

**Datos de Equipos**

Marca/Modelo	Echebarrie 16V23L
Tipo	Principal Estribor
Potencia (Hp)	
Horas Anuales de Operación	6.000,00
Unidad de Volumen	USG
Unidad de Consumo	USG/día

**Lubricante**

Intervalo de cambio (Hr)	1500,0	4000,0	
Volumen por cambio (USG)	495,0	495,0	
Cambio anual volumen (USG)	1980,0	742,5	
Consumo (USG/día/24 op. Hrs.)	10,0	10,0	
Consumo anual por cebado (USG)	2500,0	2500,0	
Consumo Anual (USG)	4480,0	3242,5	
Precio (por USG)	\$6,04	\$6,04	
<b>Costo Anual</b>	<b>\$27.059,20</b>	<b>\$19.584,70</b>	<b>\$7.474,50</b>

	<b>Antes</b>	<b>Ahora</b>	<b>Ahorros Anuales</b>
<b>Costos Totales</b>	<b>\$27.059,20</b>	<b>\$19.584,70</b>	<b>\$7.474,50</b>

## Motor Auxiliar de Babor

Al revisar el nuevo esquema presentado, que es llegar a las 3,000 horas de trabajo en el cambio de aceite se pueden evidenciar ahorros en la utilización del aceite, que genera un beneficio al disminuir el consumo de aceite.

En el esquema siguiente se puede evidenciar el ahorro proyectado en la evaluación.

**TABLA 17**

### AHORROS PROYECTADOS MÁQUINA AUXILIAR DE BABOR

#### Datos de Equipos

Marca/Modelo	Echebarrie 6T23LH
Tipo	Auxiliar Babor
Potencia (Hp)	
Horas Anuales de Operación	7.000,00
Unidad de Volumen	USG
Unidad de Consumo	USG/día

#### Lubricante

Intervalo de cambio (Hr)	1000,0	3000,0	
Volumen por cambio (USG)	225,0	225,0	
Cambio anual volumen (USG)	1575,0	525,0	
Consumo (USG/día/24 op. Hrs.)	4,0	4,0	
Consumo anual por cebado (USG)	1166,7	1166,7	
Consumo Anual (USG)	2741,7	1691,7	
Precio (por USG)	\$6,04	\$6,04	
<b>Costo Anual</b>	<b>\$16.559,67</b>	<b>\$10.217,67</b>	<b>\$6.342,00</b>

	Antes	Ahora	Ahorros Anuales
<b>Costos Totales</b>	<b>\$16.559,67</b>	<b>\$10.217,67</b>	<b>\$6.342,00</b>

## Motor Auxiliar de Estribor

Al revisar el nuevo esquema presentado, que es llegar a las 3,000 horas de trabajo en el cambio de aceite se pueden evidenciar ahorros en la utilización del aceite, que genera un beneficio al disminuir el consumo de aceite.

En el esquema siguiente se puede evidenciar el ahorro proyectado en la evaluación.

**TABLA 18**

### AHORROS PROYECTADOS MÁQUINA AUXILIAR DE ESTRIBOR

#### Datos de Equipos

Marca/Modelo	Burmeister Wain
Tipo	Auxiliar Estribor
Potencia (Hp)	
Horas Anuales de Operación	7.000,00
Unidad de Volumen	USG
Unidad de Consumo	USG/día

#### Lubricante

Intervalo de cambio (Hr)	1000,0	3000,0	
Volumen por cambio (USG)	225,0	225,0	
Cambio anual volumen (USG)	1575,0	525,0	
Consumo (USG/día/24 op. Hrs.)	3,0	3,0	
Consumo anual por cebado (USG)	875,0	875,0	
Consumo Anual (USG)	2450,0	1400,0	
Precio (por USG)	\$6,04	\$6,04	
<b>Costo Anual</b>	<b>\$14.798,00</b>	<b>\$8.456,00</b>	<b>\$6.342,00</b>

	Antes	Ahora	Ahorros Anuales
<b>Costos Totales</b>	<b>\$14.798,00</b>	<b>\$8.456,00</b>	<b>\$6.342,00</b>

# CAPÍTULO 9

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1. Revisando los resultados obtenidos tanto del orden técnico como del orden económico se puede establecer que el control adecuado de los parámetros de seguimiento en los aceites usados, permite realizar modificaciones o reparaciones en los motores diesel, que permiten mejorar las condiciones de operación y por consiguiente ayudan a los equipos a poder trabajar con un rendimiento superior.
2. Cuando se revisan las condiciones de desgaste en los motores principales se pudo estimar de una manera teórica la proporción de desgaste a encontrar, y contra este valor se puede comparar los resultados de la tendencia de crecimiento del desgaste por horas de trabajo de los equipos.



3. Al revisar las tendencias de cada uno de los equipos se pudo estimar los parámetros que se pueden considerar normales en la operación de estos equipos, ya que al compararlos con los límites de control, nos encontramos que los límites de desgaste de metales y contaminación con polvo ambiental corresponden a valores inferiores a los que se reportan como condiciones críticas para la operación de los motores.
4. Realizando el conjunto de tendencias se estimaron los valores de los parámetros evaluados para comprobar que la propuesta de racionalización de utilización de los aceites es posible, y adicionalmente se tienen los valores contra los cuales se tiene que comparar al final de la evaluación.
5. La sumatoria de los ahorros por la utilización adecuada del aceite permite estimar cual es el efecto de controlar estos parámetros y sobre todo el beneficio del control hacia la operación del dueño de la embarcación.

## RECOMENDACIONES

Al concluir esta evaluación sobre la operación de los motores diesel en un barco pesquero se pueden emitir las siguientes recomendaciones:

1. La toma de muestras periódica (mismo periodo de toma de muestra, por ejemplo cada 1000 horas de trabajo), en el mismo lugar de extracción, con motor caliente o máximo 15 minutos después de detener su funcionamiento, nos permite obtener una muestra representativa de la operación del equipo.
2. Realizar seguimiento del consumo de aceite en el equipo, que permite establecer la tasa de consumo por horas de trabajo, ya que al producirse cambios en este parámetro nos ayuda a establecer cuando el equipo empieza a perder su eficiencia.
3. Contra los resultados de las tendencias de crecimiento de los parámetros controlados, es posible comparar los resultados de las muestras que se realicen y por consiguiente el saber si el equipo muestra indicios anormales de trabajo.
4. Es necesario tener especial atención al sistema de inyección de combustible, en particular a la revisión periódica de los elementos de los inyectores, bombas de transferencia, bombas de inyección y cañerías de combustible, lo cual permitirá proteger al motor de la

contaminación por combustible. Esta falla de producirse, debe controlarse y prestarle la adecuada atención, ya que los equipos corren el riesgo de perder protección contra el desgaste al no tener la película requerida que provee el aceite al caer la viscosidad.

5. El sistema de filtración del aire del sistema de admisión y turbocompresores debe mantenerse libre de polvo ambiental, y sobre todo revisar periódicamente si los sellos y empaquetaduras del mismo mantienen la protección adecuada contra el ingreso de aire sin filtrar. Esto es de vital importancia en función que los rastros de silicio nos indican la presencia de este contaminante y pueden generar un efecto de desgaste por abrasión en el equipo al mezclarse con el lubricante.
6. De la misma manera en que se ha visto que el control de los metales de desgaste nos permite establecer que el funcionamiento del equipo es adecuado, de la misma manera hay que tomar en cuenta que la presencia de agua en el aceite es indicativo de ingreso de agua al motor, ya sea por goteo del sistema de enfriamiento o porque el equipo no logra mantener la temperatura adecuada de operación por el tiempo que permita evaporar el agua condensada en las paredes del motor.

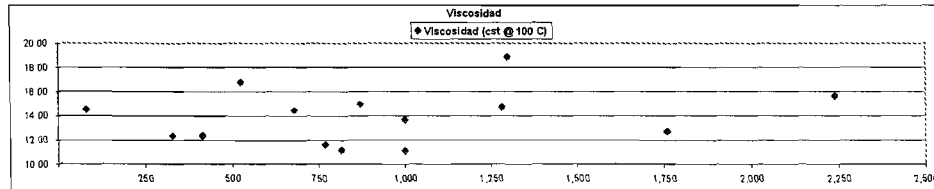
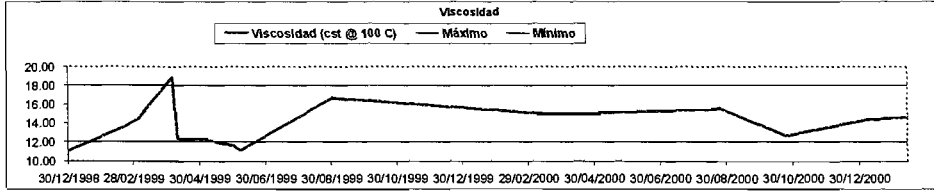
# APÉNDICES

## **APÉNDICE A**

# **GRÁFICOS MÁQUINA PRINCIPAL DE BABOR**

**Viscosidad**

Fecha de Muestreo	12/2/01	8/1/01	24/10/00	24/8/00	25/3/00	31/8/99	1/8/99	1/8/99	8/5/99	10/4/99	6/4/99	5/3/99	20/2/99	30/1/99
Viscosidad (cst @ 100 C)	14.70	14.40	12.70	15.80	14.93	18.70	11.13	11.58	12.30	12.33	18.83	14.50	13.64	11.09
Máximo	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Mínimo	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
Horas	1,282	879	1,760	2,240	870	525	816	788	415	329	1,300	80	1,000	1,000
Viscosidad (cst @ 100 C)	14.70	14.40	12.70	15.80	14.93	18.70	11.13	11.58	12.30	12.33	18.83	14.50	13.64	11.09



Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados

$Y_i = a + b X_i$   
 $\sum Y_i = n a + b \sum X_i$   
 $\sum X_i Y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2$

Horas	1,282	879	1,760	2,240	870	525	816	788	415	329	1,300	80	1,000	1,000
Viscosidad (cst @ 100 C)	14.70	14.40	12.70	15.80	14.93	18.70	11.13	11.58	12.30	12.33	18.83	14.50	13.64	11.09

$\sum X_i$ (Horas)	13,085.00													
$\sum Y_i$ (Visc)	194.43													
$\sum X_i^2$ (Horas) <sup>2</sup>	16,485,667.00													
$\sum X_i Y_i$	18,845	9,778	22,352	94,844	12,989	8,769	5,082	8,893	5,117	4,057	24,479	1,160	13,640	11,090
Muestras	14													
$\sum Y_i = a n + b \sum X_i$	Ecuación 1	194.43 =		14 a	+				13.085 b					
$\sum X_i Y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2$	Ecuación 2	185,193 =		13,085 a	+				16,485,667 b					

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = \frac{13,897,857.14}{939.21} = 14,799.6$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$185,193 = 13,085 \cdot (14,799.6) + b \cdot (16,485,667)$

$b = \frac{4,283,222}{16,485,667} = 0.000260073152$

El valor de a con el valor despejado de b es

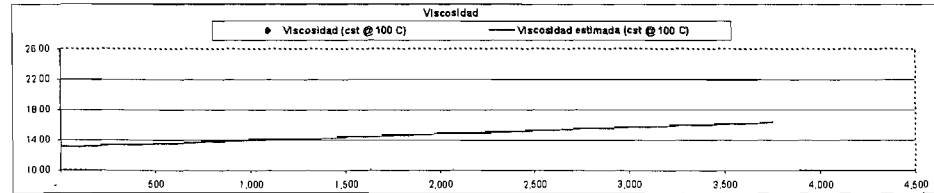
$a = 13.07$

Ecuación de la viscosidad:  $Viscosidad = 13.07 + 0.000873 \text{ Horas de trabajo}$

Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al periodo de cambio que se desee determinar

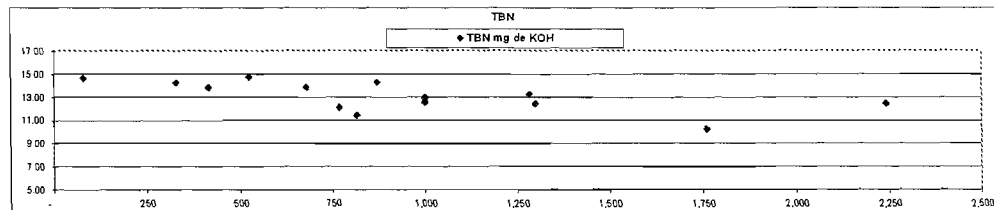
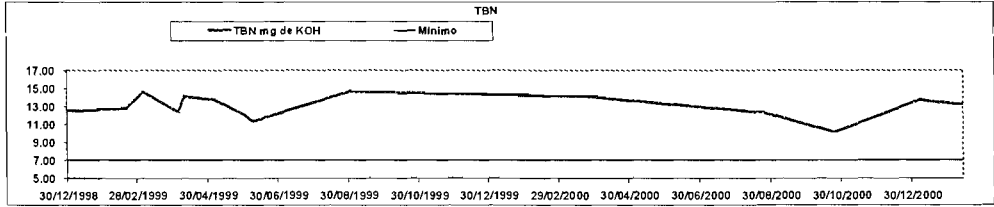
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250
Viscosidad estimada (cst @ 100 C)	13.51	13.73	13.95	14.16	14.38	14.60	14.82	15.04	15.26	15.47	15.69	15.91	16.13	16.35	16.57	16.78

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000
Viscosidad (cst @ 100 C)													
Viscosidad estimada (cst @ 100 C)	13.07	13.29	13.51	13.73	13.95	14.18	14.38	14.60	14.82	15.04	15.26	15.47	15.69



**TBN**

Fecha de muestreo	12/201	6/1/01	24/0/00	24/6/00	26/0/00	31/8/99	7/6/99	16/9/99	8/6/99	10/4/99	5/4/99	5/5/99	20/2/99	30/12/98
TBN mg de KOH	13.20	13.90	10.20	12.40	14.20	14.70	11.40	12.05	13.90	14.20	12.41	14.80	12.90	12.50
Mínimo	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Horas	1,282	679	1,780	2,240	870	525	816	768	416	329	1,300	80	1,000	1,000
TBN mg de KOH	13.20	13.90	10.20	12.40	14.20	14.70	11.40	12.05	13.90	14.20	12.41	14.80	12.90	12.50



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$Z_{ij} = a + b Z_{ij}$   
 $Z_{ij} = a Z_{ij} + b Z_{ij}^2$

**Tabla**

Horas	1,282	679	1,780	2,240	870	525	816	768	416	329	1,300	80	1,000	1,000
TBN mg de KOH	13.20	13.90	10.20	12.40	14.20	14.70	11.40	12.05	13.90	14.20	12.41	14.80	12.90	12.50

$\Sigma Z_{ij}$ (Horas)	13,065.00													
$\Sigma Z_{ij}^2$ (Horas)	162.38													
$\Sigma Z_{ij}^3$ (Horas)	16,485,987.00													
$\Sigma Z_{ij} Z_{ij}$	16,922	8,370	17,852	27,776	12,354	7,718	9,302	9,254	5,741	4,672	16,133	1,168	12,900	12,500
Muestras	14													

$Z_{ij} = a + b Z_{ij}$  Ecuación 1  $192.38 = 14 a + 13,065 b$   
 $Z_{ij} = a Z_{ij} + b Z_{ij}^2$  Ecuación 2  $163,782.50 = 16,922 a + 16,485,987 b$

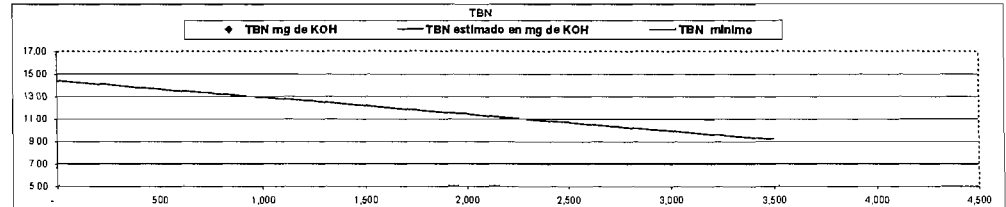
De la ecuación 1 despejamos la variable a  
 $a = 13.03 - 933.21 b$   
 Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b  
 $163,782.50 = 13,065 (13.03 - 933.21 b) + 16,485,987 b$   
 $4,293,222.38 = -15,000,149.50 b + 16,485,987 b$   
 $b = 0.0014950$   
 El valor de a con el valor despejado de b es  
 $a = 14.42$

Ecuación del TBN  $TBN = 14.42 - 0.0014950 \text{ Horas de trabajo}$

Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al penado de cambio que se desea determinar

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
TBN estimado en mg de KOH	14.42	14.05	13.67	13.30	12.93	12.55	12.18	11.80	11.43	11.06	10.68	10.31	9.94

Horas	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500
TBN mg de KOH	14.42	14.05	13.67	13.30	12.93	12.55	12.18	11.80	11.43	11.06	10.68	10.31	9.94	9.56
TBN mínimo	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00



**Ajuste de la curva a partir de una Regresión Curvilínea**

$$y = \alpha \cdot \beta^x$$

$$\log y = \log \alpha + x \log \beta$$

$$\Sigma \log y = n \log \alpha + \Sigma x \log \beta$$

$$\Sigma x \log y = \Sigma x \log \alpha + \Sigma x^2 \log \beta$$

Entonces se pueden generar pares de valores (x, log y)

Tabla

Horas	1,292	879	1,780	2,240	870	525	816	788	416	329	1,300	80	1,000	1,000
TBN mg de KOH	13,20	13,80	10,20	12,40	14,20	14,70	11,40	12,05	13,80	14,20	12,41	14,60	12,90	12,50
Log TBN	1,121	1,140	1,009	1,083	1,152	1,167	1,057	1,081	1,140	1,150	1,094	1,184	1,111	1,087

$\Sigma x$ (Horas)	13,085.00													
$\Sigma \log y$ (TBN)	15.58													
$\Sigma x^2$ (Horas)	16,485,867.00													
$\Sigma x \log y$	1,437	774	1,775	2,445	1,002	613	862	830	474	379	1,422	83	1,111	1,097
Muestras	14													
$\Sigma \log y = n \log \alpha + \Sigma x \log \beta$ Ecuación 1	15.58 =					14 \log \alpha +		13,085 \log \beta						
$\Sigma x \log y = \Sigma x \log \alpha + \Sigma x^2 \log \beta$ Ecuación 2	14,318.76 =					13,085 \log \alpha +		16,485,867 \log \beta						

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$$\log \alpha = \frac{15.58}{14} = 1.11270$$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor log b

$$14,318.76 = 13,085 (1.11270) + 16,485,867 \log b$$

$$4,233,222.36 \log b = -0.000050924 \quad b = 0.99998275 \quad 1.000117264$$

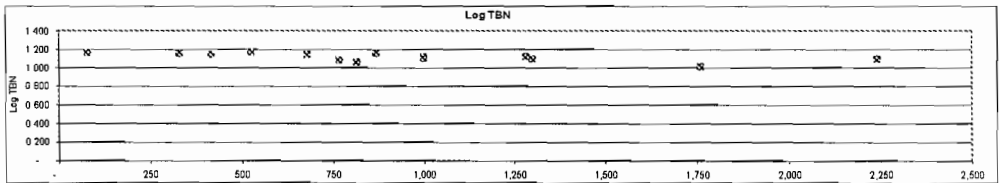
El valor de a con el valor despejado de b es

$$\log \alpha = 1.160220827 \quad a = 14.48174259 \quad 14.4817426$$

$$\log y = \log \alpha + x \log b$$

$$\log y = 1.160220827 - 0.000050924 x$$

$$y = \alpha \cdot \beta^x \quad y = 14.48174259 (0.99998275)^x$$

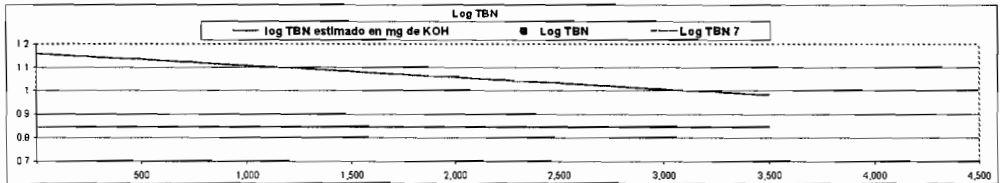


Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al penoso de cambio que se desee determinar

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500
log TBN estimado en mg de KOH	1.18	1.15	1.13	1.12	1.11	1.10	1.09	1.07	1.06	1.05	1.03	1.02	1.01	0.99	0.98
TBN estimado fórmula	14.48	14.04	13.84	13.24	12.86	12.49	12.13	11.78	11.44	11.11	10.79	10.48	10.17	9.81	9.47

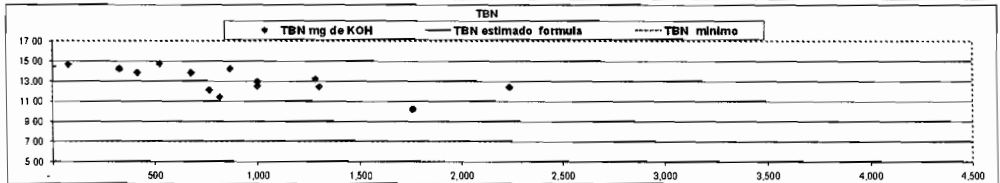
  

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500
log TBN estimado en mg de KOH	1.18	1.15	1.13	1.12	1.11	1.10	1.09	1.07	1.06	1.05	1.03	1.02	1.01	0.99	0.98
Log TBN	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451
Log TBN 7	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451



Gráfica resultante de curva aproximada con puntos analizados

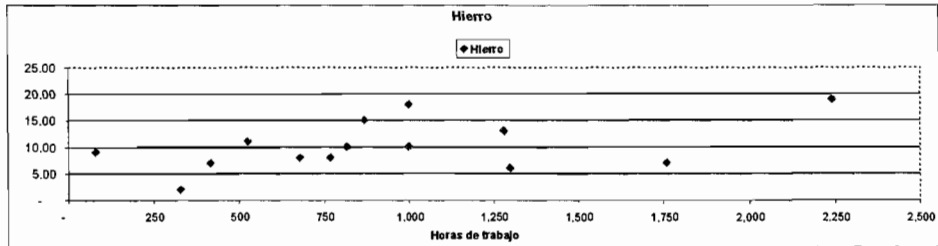
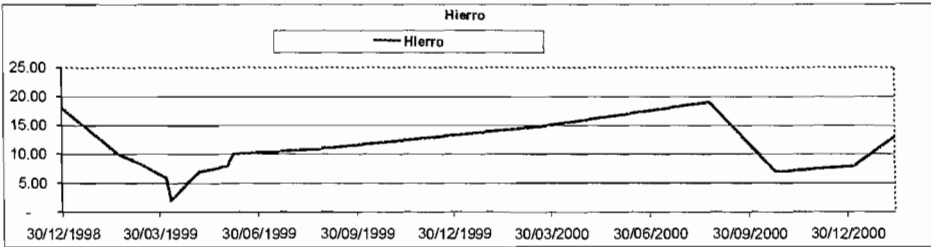
Horas	1,292	879	1,780	2,240	870	525	816	788	416	329	1,300	80	1,000	1,000	20
TBN mg de KOH	13,20	13,80	10,20	12,40	14,20	14,70	11,40	12,05	13,80	14,20	12,41	14,60	12,90	12,50	
TBN estimado fórmula															14.48
TBN mínimo	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Diferencia en la baja de TBN est															0.03





**Hierro**

Fecha de muestra	12/201	6/1/01	24/10/00	24/0/00	25/3/00	31/8/99	7/8/99	1/8/99	6/5/99	10/4/99	5/4/99	5/3/99	20/2/99	30/1/98
Horas	1,202	676	1,700	2,240	870	525	816	786	416	328	1,300	80	1,000	1,000
Hierro	13.00	8.00	7.00	18.00	15.00	11.00	10.00	8.00	7.00	2.00	6.00	9.00	10.00	18.00
Máximo	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$$Y_{ij} = m + b X_{ij}$$

$$\sum X_{ij} Y_{ij} = a \sum X_{ij} + b \sum X_{ij}^2$$

**Tabla**

Horas	1,202.00	679.00	1,700.00	2,240.00	870.00	525.00	816.00	786.00	416.00	328.00	1,300.00	80.00	1,000.00	1,000.00
Hierro	13.00	8.00	7.00	18.00	15.00	11.00	10.00	8.00	7.00	2.00	6.00	9.00	10.00	18.00

$\sum X_{ij}$ (Horas)	13,065.00
$\sum Y_{ij}$ (Vie)	143.00
$\sum X_{ij}^2$ (Horas) <sup>2</sup>	16,485,667.00
$\sum X_{ij} Y_{ij}$	16,666
$\sum X_{ij}^3$	150,197.00
Muestras	14
$\sum Y_{ij} = m + b \sum X_{ij}$ Ecuación 1	143 = 14 a + 13,065 b
$\sum X_{ij} Y_{ij} = a \sum X_{ij} + b \sum X_{ij}^2$ Ecuación 2	150,197 = 13,065 a + 16,485,667 b

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = 10.21 - 933.21 b$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$150,197 = 13,065 (10.21 - 933.21 b) + 16,485,667 b$   
 $4,293,222.36 = b = 16747.4$

$b = 0.00390088$

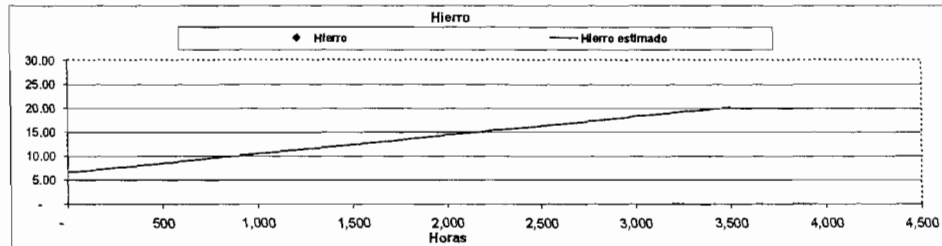
El valor de a con el valor despejado de b es

$a = 6.57$

**Ecuación del Hierro** 
$$\text{Hierro} = 6.57 + 0.0039009 \text{ Horas de trabajo}$$

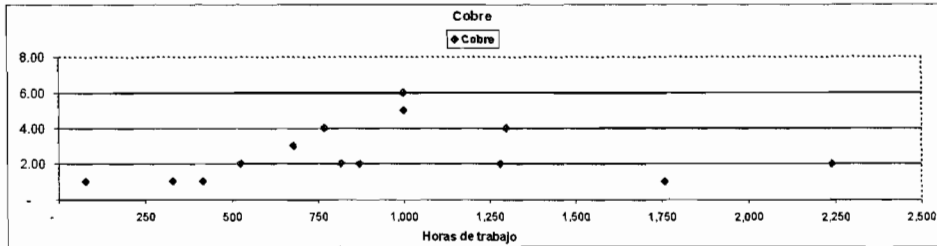
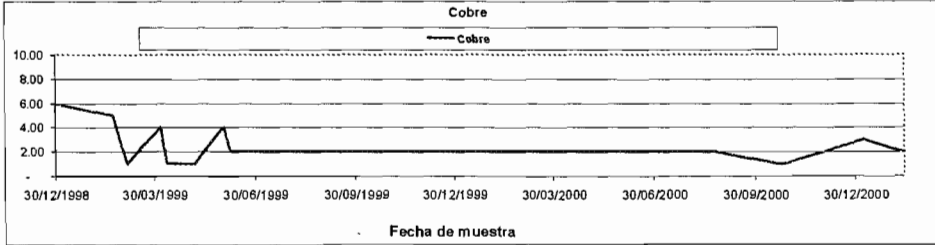
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000
Hierro estimado	8.52	9.50	10.47	11.45	12.43	13.40	14.38	15.35	16.33	17.30	18.28	19.25	20.23	21.20	22.18

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500
Hierro															
Hierro estimado	6.57	7.55	8.52	9.50	10.47	11.45	12.43	13.40	14.38	15.35	16.33	17.30	18.28	19.25	20.23



**Cobre**

Fecha de muestreo	12/201	8/1/01	24/10/00	24/8/00	25/3/00	31/8/99	7/8/99	1/8/99	8/5/99	10/4/99	5/4/99	5/3/99	20/2/99	20/12/98
Horas	1,282	879	1,780	2,240	870	525	816	788	418	329	1,300	80	1,000	1,000
Cobre	2.00	3.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	1.00	1.00	4.00	1.00	5.00	6.00
Máximo	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$E_{xi} = a n + b \sum X_i$

$\sum X_i y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2$

**Tabla**

Horas	1,282	879	1,780	2,240	870	525	816	788	418	329	1,300	80	1,000	1,000
Cobre	2.00	3.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	1.00	1.00	4.00	1.00	5.00	6.00

$\sum X_i$ (Horas)	13,065.00			
$\sum X_i$ (Vires)	36.00			
$\sum X_i^2$ (Horas) <sup>2</sup>	16,485,667.00			
$\sum X_i y_i$	2,564			
$\sum X_i y_i^2$	35,360.00			
Muestras	14			
$\sum X_i = a n + b \sum X_i$	Ecuación 1	36 =	14 a +	13,065 b
$\sum X_i y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2$	Ecuación 2	35,360 =	13,065 a +	16,485,667 b

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = \frac{2.57}{14} - \frac{933.21}{13,065} b$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$35,360 = \frac{35,360}{14} \left( \frac{2.57}{14} - \frac{933.21}{13,065} b \right) + 16,485,667 b$

$b = \frac{0.00041095}{16,485,667 - \frac{35,360 \cdot 933.21}{14 \cdot 13,065}}$

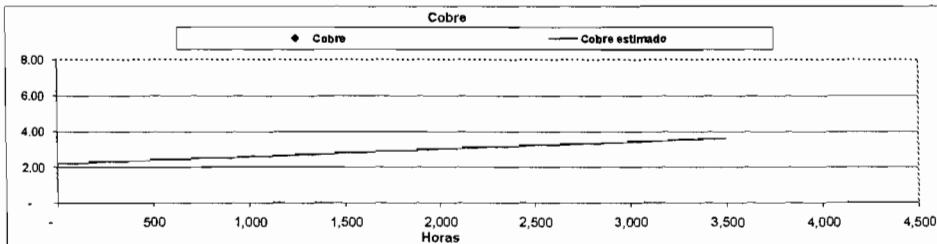
El valor de a con el valor despejado de b es

$a = 2.19$

**Ecuación del Cobre**  $Cobre = 2.19 + 0.00041095 \text{ Horas de trabajo}$

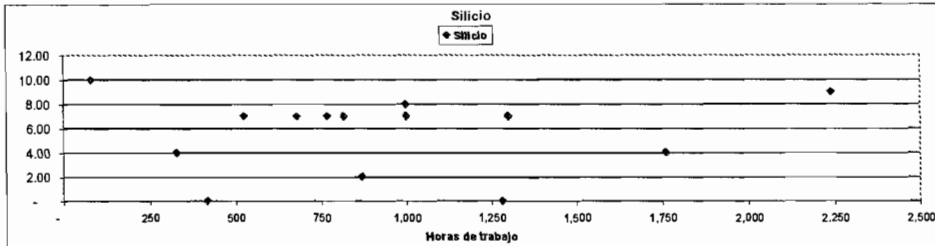
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000
Cobre estimado	2.39	2.50	2.60	2.70	2.80	2.91	3.01	3.11	3.22	3.32	3.42	3.52	3.63	3.73	3.83

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500
Cobre estimado	2.19	2.29	2.39	2.50	2.60	2.70	2.80	2.91	3.01	3.11	3.22	3.32	3.42	3.52	3.63



**Silicio**

Fecha de muestreo	12/2/01	6/1/01	24/10/00	24/8/00	25/3/00	31/8/99	7/8/99	1/8/99	8/5/99	10/4/99	5/4/99	5/3/99	20/2/99	30/12/98
Horas	1,282	878	1,760	2,240	870	525	816	788	416	328	1,300	80	1,000	1,000
Silicio	-	7.00	4.00	8.00	2.00	7.00	7.00	7.00	-	4.00	7.00	10.00	7.00	8.00
Máximo	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$Y_i = a + b X_i$   
 $\Sigma X_i Y_i = a \Sigma X_i + b \Sigma X_i^2$

Horas	1,282	878	1,760	2,240	870	525	816	788	416	328	1,300	80	1,000	1,000
Silicio	-	7.00	4.00	8.00	2.00	7.00	7.00	7.00	-	4.00	7.00	10.00	7.00	8.00

$\Sigma X_i$ (Horas)	13,065.00			
$\Sigma Y_i$ (Silicio)	79.00			
$\Sigma X_i^2$ (Horas) <sup>2</sup>	16,485,667.00			
$\Sigma X_i Y_i$	74,672.00			
Muestras	14			
$\Sigma Y_i = a + b X_i$	Ecuación 1	79 =	14 a +	13,065 b
$\Sigma X_i Y_i = a \Sigma X_i + b \Sigma X_i^2$	Ecuación 2	74,672 =	13,065 a +	16,485,667 b

De la ecuación 1 despejamos la variable **a**  
 $a = \frac{5.64}{-} - \frac{933.21}{b}$

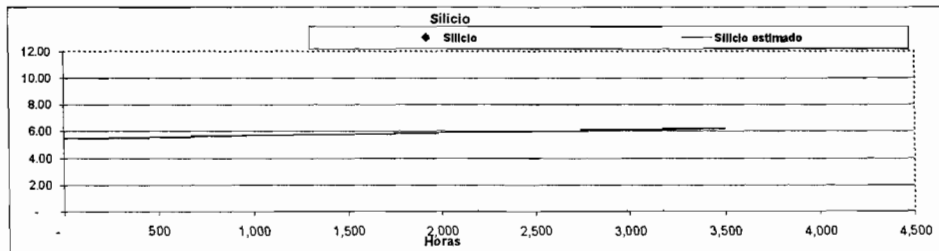
Al introducir la variable **a** en la ecuación 2, se despeja el valor **b**  
 $74,672 = \frac{13,065}{4,293,222.36} b - \frac{933.21}{948.071} b + 16,485,667 b$

$b = 0.00022083$   
 El valor de **a** con el valor despejado de **b** es  
 $a = 5.44$

Ecuación del Silicio:  $Silicio = 5.44 + 0.0002208 \text{ Horas de trabajo}$

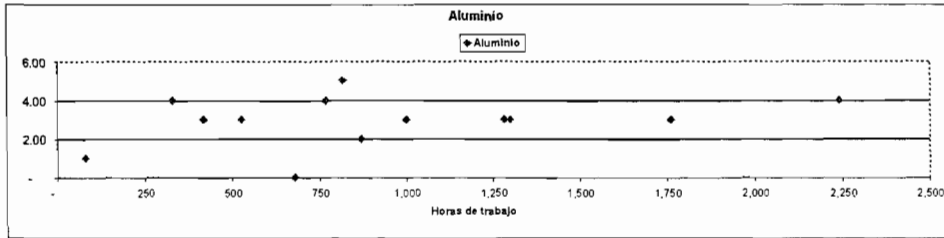
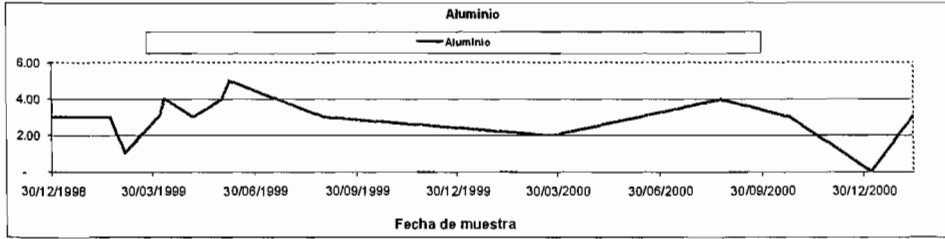
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000
Silicio estimado	5.55	5.60	5.66	5.71	5.77	5.82	5.88	5.93	5.99	6.04	6.10	6.15	6.21	6.26	6.32

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500
Silicio															
Silicio estimado	5.44	5.49	5.55	5.60	5.66	5.71	5.77	5.82	5.88	5.93	5.99	6.04	6.10	6.15	6.21



**Aluminio**

Fecha de muestreo	1/2/01	6/1/01	24/10/00	24/0/00	25/3/00	31/0/99	7/0/99	1/0/99	0/5/99	10/4/99	5/4/99	5/3/99	20/2/99	30/1/99
Horas	1,282	878	1,760	2,240	870	525	816	768	416	328	1,300	80	1,000	1,000
Aluminio	3.00	-	3.00	4.00	2.00	3.00	5.00	4.00	3.00	4.00	3.00	1.00	3.00	3.00
Máximo	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$E_{yi} = a n + b \sum X_i$   
 $\sum X_i y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2$

Tabla

Horas	1,282	878	1,760	2,240	870	525	816	768	416	328	1,300	80	1,000	1,000
Aluminio	3.00	-	3.00	4.00	2.00	3.00	5.00	4.00	3.00	4.00	3.00	1.00	3.00	3.00

$\sum X_i$ (Horas)	13,065.00
$\sum Y_i$ (Visco)	41.00
$\sum X_i^2$ (Horas) <sup>2</sup>	16,485,667.00
$\sum X_i Y_i$	3,846
$\sum Y_i^2$	41,097.00
Muestras	14
$\sum Y_i = a n + b \sum X_i$ Ecuación 1	41 = 14 a + 13,065 b
$\sum X_i Y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2$ Ecuación 2	41,097 = 13,065 a + 16,485,667 b

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = 2.93 - 933.21 b$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$41,097 = 13,065 (2.93 - 933.21 b) + 16,485,667 b$   
 $4,293,222.36 b = 28,352.1$

$b = 0.00086039$

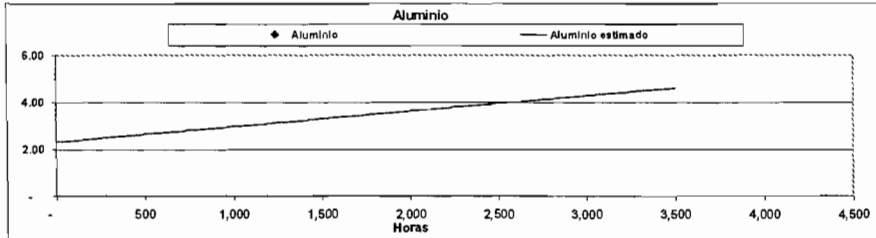
El valor de a con el valor despejado de b es

$a = 2.31$

Ecuación del Silicio:  $Aluminio = 2.31 + 0.0008604 \text{ Horas de trabajo}$

Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000
Aluminio estimado	2.84	2.81	2.97	3.14	3.30	3.47	3.63	3.80	3.96	4.13	4.29	4.46	4.62	4.78	4.95

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500
Aluminio															
Aluminio estimado	2.31	2.48	2.64	2.81	2.97	3.14	3.30	3.47	3.63	3.80	3.96	4.13	4.29	4.46	4.62



### Estimación Desgaste máximo del Hierro

Asumiendo que la totalidad del desgaste de hierro que se produce solamente por desgaste de las camisas de los cilindros se realiza este análisis

Diámetro cilindro nuevo	225.000 mm
Diámetro cilindro 50.000 horas trabajo	226.000 mm
Carrera	300 mm
No. de cilindros	16
Volumen de aceite carter galones	495
Volumen de aceite carter litros	1,873.58
Volumen de Fe en camisas	Vol = Pl . Carrera / 4 (D ext <sup>2</sup> - D int <sup>2</sup> )
	Vol = (3,1416*0,3/4) * (0,226 <sup>2</sup> - 0,225 <sup>2</sup> )
	Vol 0.0001063 m <sup>3</sup> / por camisa
16 cilindros	Vol total 0.0017002 m <sup>3</sup>

Densidad del hierro 7.800 kg/m<sup>3</sup>

Cantidad partículas en peso (16 cilindros a 50.000 h)	13.261825 kg
Cantidad partículas en peso (16 cilindros a 1.000 h)	0.2652365 kg

Con un volumen de aceite 1,873.58 litros y despreciando el consumo, la concentracion de Fe sera

Fe =	0.26523649 kg/1000 h entre	1,873.58 litros
Fe =	0.0001416 kg / lt . 1000 h	
Fe =	141.57 mg / lt . 1000 h	
Fe =	141.57 p.p.m. / 1000 h	

Asumiendo que el desgaste normal no se produzca en la totalidad de las camisas de los cilindros, sino solamente en el lugar que se recuesta el piston cuando existe desgaste de la camisa, se tomaria como referencia la cuarta parte del volumen a desgastar de la camisa como la cantidad maxima de material a perder por desgaste

Fe=	35.39 p.p.m. / 1000 h
-----	-----------------------

Con un cambio de aceite a las 4.000 horas la concentración sería

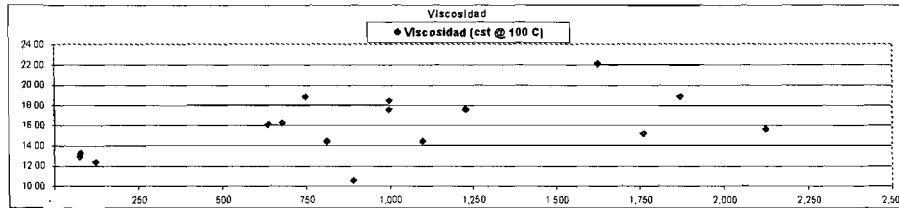
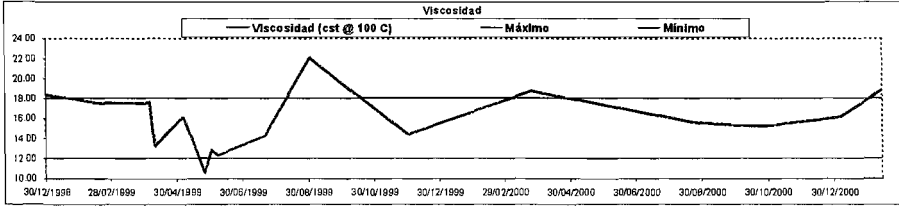
Fe=	141.57 p.p.m. / 4000 h
-----	------------------------

## **APÉNDICE B**

# **GRÁFICOS MÁQUINA PRINCIPAL DE ESTRIBOR**

**Viscosidad**

Fecha de muestreo	12/02/2001	06/01/2001	24/10/2000	24/08/2000	25/03/2000	30/11/1999	31/08/1999	22/07/1999	7/6/99	1/6/99	26/5/99	6/5/99	1/04/99	5/4/99	20/2/99	30/12/98
Viscosidad (cst @ 100 C)	18.80	16.20	15.20	15.50	18.81	14.40	22.05	14.40	12.33	12.87	10.49	18.00	13.18	17.57	17.54	18.41
Máximo	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Mínimo	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
Horas	1870	679	1760	2,123	748	812	1,625	1,100	122	75	891	635	80	1,230	1,000	1,000
Viscosidad (cst @ 100 C)	18.80	16.20	15.20	15.50	18.81	14.40	22.05	14.40	12.33	12.87	10.49	18.00	13.18	17.57	17.54	18.41



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$Dy = a + b Dx$   
 $Dy = a Dx + b Dx^2$

Tabla																
Horas	1870	679	1760	2,123	748	812	1,625	1,100	122	75	891	635	80	1,230	1,000	1,000
Viscosidad (cst @ 100 C)	18.80	16.20	15.20	15.50	18.81	14.40	22.05	14.40	12.33	12.87	10.49	18.00	13.18	17.57	17.54	18.41

$\Sigma Dx$ (Horas)	15,750.00															
$\Sigma Dy$ (Visc)	253.93															
$\Sigma Dx^2$ (Horas) <sup>2</sup>	21,368,058.00															
$\Sigma Dyx$	35,156	11,000	28,752	33,119	14,070	11,699	38,831	16,840	1,504	885	9,347	10,211	1,054	21,611	17,540	16,410
$\Sigma Dyx^2$	264,102.93															
Muestras	18															
$Dy = a + b Dx$	Ecuación 1	253.93 =	16 a	+	15,750 b											
$Dy = a Dx + b Dx^2$	Ecuación 2	264,103 =	15,750 a	+	21,368,058 b											

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = 15.670635$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$264,103 = 15,750 * (15.670635 - 15.670635) + 21,368,058 b$

$b = 0.00241095$

El valor de a con el valor despejado de b es

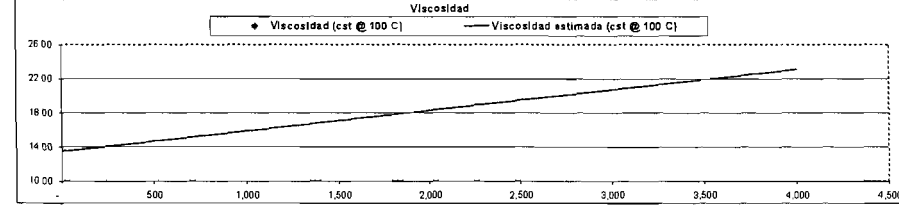
$a = 13.50$

Ecuación de la viscosidad  $Viscosidad = 13.50 + 0.002411 \text{ Horas de trabajo}$

Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al periodo de cambio que se desee determinar

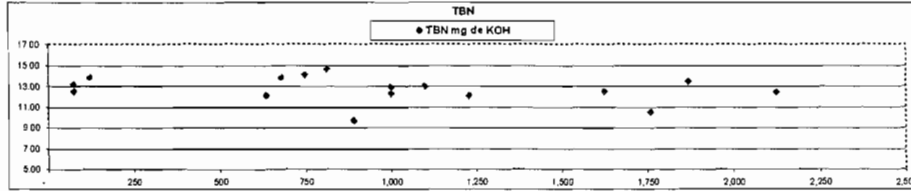
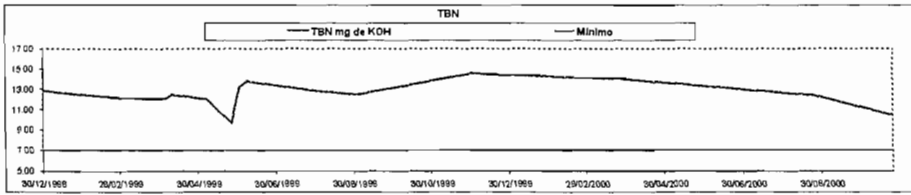
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	
Viscosidad estimada (cst @ 100 C)	14.70	15.31	15.81	16.31	16.81	17.32	17.82	18.32	18.82	19.32	19.82	20.32	20.82	21.33	21.84	22.34	22.84	23.35

Horas	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500	3,750	4,000
Viscosidad (cst @ 100 C)	13.50	14.10	14.70	15.31	15.91	16.51	17.11	17.72	18.32	18.92	19.52	20.13	20.73	21.33	21.94	22.54
Viscosidad estimada (cst @ 100 C)	13.50	14.10	14.70	15.31	15.91	16.51	17.11	17.72	18.32	18.92	19.52	20.13	20.73	21.33	21.94	22.54



**TBN**

Fecha de muestreo	15/02/2000	08/03/2000	24/03/2000	24/08/2000	22/02/2001	30/11/1999	21/08/1999	20/01/1999	1/9/98	1/8/98	28/5/98	1/5/98	1/04/98	5/4/98	29/2/98	19/12/98
TBN mg de KOH	13.40	13.80	12.50	12.40	14.04	14.85	12.55	13.00	13.80	13.20	8.84	12.05	12.50	12.05	12.25	12.80
Mínimo	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Horas	1,872	879	1,786	2,123	749	813	1,825	1,150	122	75	891	625	75	1,220	1,008	1,020
TBN mg de KOH	13.40	13.80	12.50	12.40	14.04	14.86	12.55	13.00	13.80	13.20	8.84	12.05	12.50	12.05	12.25	12.80



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$Y_a = m \cdot X + b$   
 $Y_a = a \cdot X + b$

Fecha	1,872	879	1,786	2,123	749	813	1,825	1,150	122	75	891	625	75	1,220	1,008	1,020
TBN mg de KOH	13.40	13.80	12.50	12.40	14.04	14.86	12.55	13.00	13.80	13.20	8.84	12.05	12.50	12.05	12.25	12.80

$\sum X$ (Horas)	15,745.00			
$\sum Y$ (TBN)	202.63			
$\sum X^2$ (Horas <sup>2</sup> )	21,368,283.00			
$\sum Y^2$	25,058			
$\sum XY$	196,026.61			
Muestras	16			
$\sum X = m \cdot \sum X + b \cdot n$	Ecuación 1	202.63 =	16 a +	15,745 b
$\sum Y = a \cdot \sum X + b \cdot n$	Ecuación 2	196,026.61 =	15,745 a +	21,368,283 b

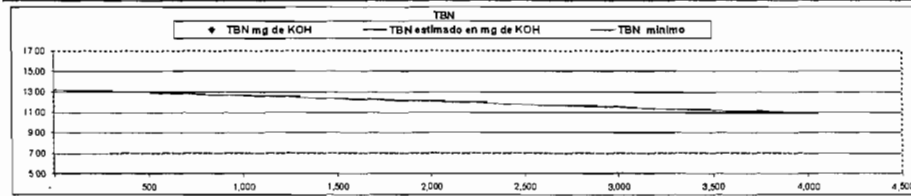
De la ecuación 1 despejamos la variable a  
 $a = \frac{202.63 - 16b}{15,745}$   
 Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b  
 $196,026.61 = \frac{15,745}{15,745} (202.63 - 16b) + 16b$   
 $196,026.61 = 3,174.218 - 251.92b + 16b$   
 $b = -0.0005144$   
 El valor de a con el valor despejado de b es  
 $a = 13.23$

Ecuación del TBN:  $TBN = 13.23 - 0.0005144 \cdot \text{Horas de trabajo}$

Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al periodo de cambio que se desee determinar

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
TBN estimado en mg de KOH	13.23	13.09	12.94	12.80	12.66	12.51	12.37	12.22	12.08	11.94	11.79	11.65	11.51

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500	3,750	4,000
TBN mg de KOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TBN estimado en mg de KOH	13.23	13.09	12.94	12.80	12.66	12.51	12.37	12.22	12.08	11.94	11.79	11.65	11.51	11.36	11.22	11.08	10.93
TBN mínimo	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00





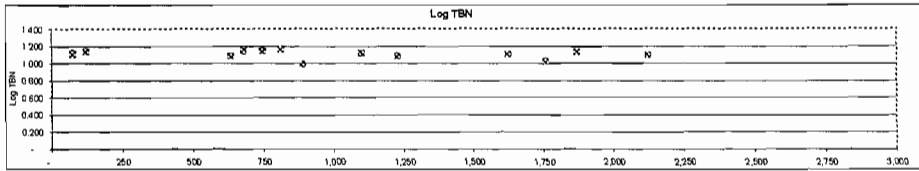
**Ajuste de la curva a partir de una Regresión Curvilínea**

$y = \alpha \cdot \beta^x$   
 $\log y = \log \alpha + x \log \beta$  Entonces se pueden generar pares de valores (x, log y)  
 $\sum \log y = n \log \alpha + \sum x \log \beta$   
 $\sum x \log y = \sum x \log \alpha + \sum x^2 \log \beta$

Horas	1,870	679	1,760	2,123	749	812	1,625	1,109	122	75	891	635	75	1,230	1,000	1,000
TBN mg de KOH	13.45	13.85	10.50	12.45	14.04	14.80	12.50	13.00	13.80	13.20	9.84	12.05	12.50	12.05	12.25	12.90
Log TBN	1.127	1.143	1.021	1.092	1.147	1.164	1.097	1.114	1.140	1.121	0.994	1.081	1.087	1.091	1.081	1.111

$\sum x$ (Horas)	15,745.00															
$\sum x \log y$ (TBN)	17.61															
$\sum x^2$ (Horas) <sup>2</sup>	21,369,269.00															
$\sum x \log x$	2,109	774	1,797	2,321	658	945	1,782	1,225	139	64	877	686	82	1,200	1,089	1,111
$\sum x \log x^2$	17,209.75															
Muestras	16															
$\sum \log y = n \log \alpha + \sum x \log \beta$ Ecuación 1	17.61 =															
$\sum x \log y = \sum x \log \alpha + \sum x^2 \log \beta$ Ecuación 2	17,209.75 =															

De la ecuación 1 despejamos la variable  $\alpha$   
 $\log \alpha = \frac{17.61 - \sum x \log \beta}{n}$   
 Al introducirle el valor de  $\alpha$  en la ecuación 2, se despeja el valor de  $\log \beta$   
 $17,209.75 = 15,745 \cdot \log \beta + \sum x^2 \log \beta$   
 $5,874.21894 = \log \beta \cdot \sum x^2$   
 $\log \beta = \frac{5,874.21894}{21,369,269} = -0.00019911$   
 El valor de  $\alpha$  con el valor despejado de  $\log \beta$   
 $\log \alpha = \frac{17.61 - \sum x \log \beta}{n} = \frac{17.61 - \sum x (-0.00019911)}{16} = 1.119987480$   
 $\log y = \log \alpha + x \log \beta$   
 $\log y = 1.119987480 - 0.000199106 \cdot x$   
 $y = \alpha \cdot \beta^x$   
 $y = 13.1821976 \cdot (0.999954154)^{-x}$

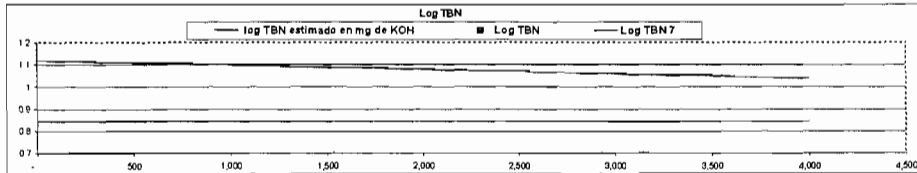


Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al período de cambio que se desee determinar

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000
log TBN estimado en mg de KOH	1.12	1.12	1.11	1.11	1.10	1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05	1.04
TBN estimado formula	13.18	13.03	12.86	12.74	12.59	12.45	12.31	12.17	12.03	11.89	11.75	11.62	11.49	11.36	11.22	11.10	10.97

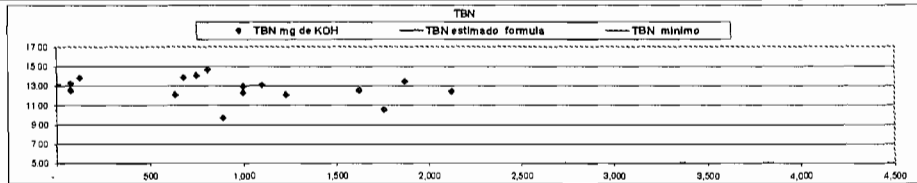
  

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000
log TBN estimado en mg de KOH	1.12	1.12	1.11	1.11	1.10	1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05	1.04
Log TBN 7	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451



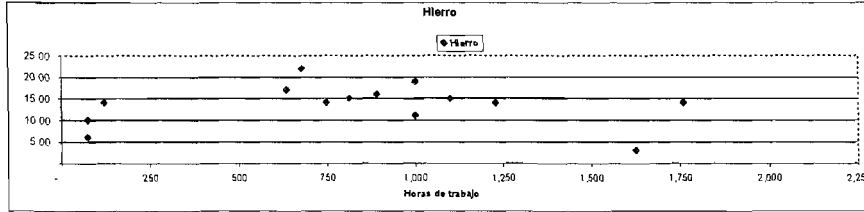
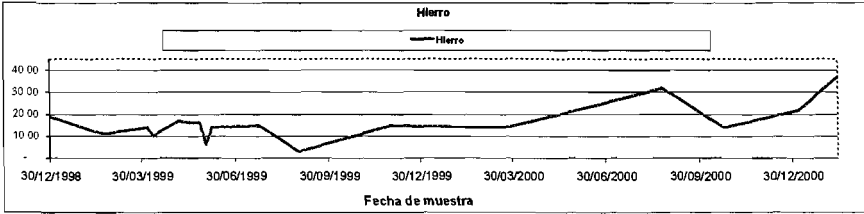
Gráfica resultante de curva aproximada con puntos alejados

Horas	1,870	679	1,760	2,123	749	812	1,625	1,109	122	75	891	635	75	1,230	1,000	1,000	20
TBN mg de KOH	13.45	13.85	10.50	12.45	14.04	14.80	12.50	13.00	13.80	13.20	9.84	12.05	12.50	12.05	12.25	12.90	
TBN estimado formula																	13.18
TBN mínimo	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Diferencia en la baja con TBN est																	0.01



**Hierro**

Fecha de muestreo	12/02/2001	06/01/2001	24/10/2002	24/06/2000	25/03/2000	30/11/1999	31/08/1998	22/07/1999	7/6/99	1/6/99	26/5/99	6/5/99	10/4/99	5/4/99	20/2/99	30/12/98
Horas	1,870	678	1,735	2,123	748	812	1,825	1,100	122	75	881	635	75	1,230	1,000	1,000
Hierro	37.00	22.00	14.00	32.00	14.00	15.00	3.00	15.00	14.00	6.00	16.00	17.00	10.00	14.00	11.00	19.00
Máximo	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$Y_x = a + b \cdot X_x$   
 $\Sigma Y_x = a \cdot \Sigma X_x + b \cdot \Sigma X_x^2$

**Tabla**

Horas	1,870	678	1,735	2,123	748	812	1,825	1,100	122	75	881	635	75	1,230	1,000	1,000
Hierro	37.00	22.00	14.00	32.00	14.00	15.00	3.00	15.00	14.00	6.00	16.00	17.00	10.00	14.00	11.00	19.00

$\Sigma X_x$ (Horas)	15,745.00
$\Sigma Y_x$ (Hierro)	258.00
$\Sigma X_x^2$ (Horas <sup>2</sup> )	21,388,283.00
$\Sigma X_x Y_x$	69,130
$\Sigma Y_x^2$	285,910.00
Muestras	16
$\Sigma Y_x = a \cdot \Sigma X_x + b \cdot \Sigma X_x^2$ Ecuación 1	258 = 16 a + 15,745 b
$\Sigma X_x Y_x = a \cdot \Sigma X_x + b \cdot \Sigma X_x^2$ Ecuación 2	285,910 = 15,745 a + 21,388,283 b

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = \frac{258 - 16 \cdot 15,745 b}{16 - 16 \cdot 15,745}$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$285,910 = \frac{258 - 16 \cdot 15,745 b}{16 - 16 \cdot 15,745} \cdot 15,745 + 21,388,283 b$

$b = \frac{5,874,218.84}{4,103,7813} = 0.00698809$

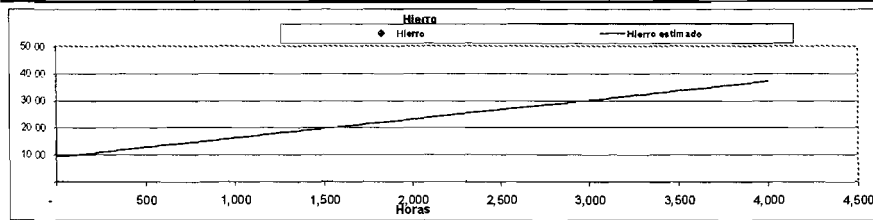
El valor de a con el valor despejado de b es

$a = 9.31$

Ecuación del Hierro:  $Hierro = 9.31 + 0.0069881 \cdot \text{Horas de trabajo}$

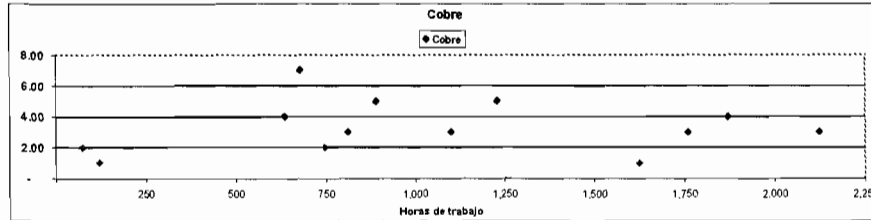
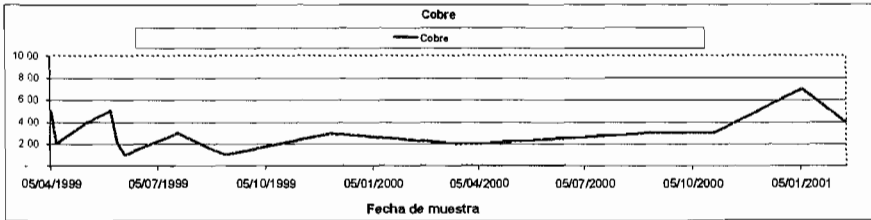
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500
Hierro estimado	12.81	14.55	16.30	18.05	19.79	21.54	23.28	25.03	26.78	28.52	30.27	32.02	33.76	35.51	37.26	39.00	40.75

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500	3,750	4,000
Hierro																	
Hierro estimado	8.31	11.05	12.81	14.55	16.30	18.05	19.79	21.54	23.28	25.03	26.78	28.52	30.27	32.02	33.76	35.51	37.26



**Cobre**

Fecha de muestreo	12/02/2001	06/01/2001	24/10/2000	24/09/2000	25/03/2000	30/11/1999	31/08/1999	22/07/1999	7/6/99	1/6/99	26/5/99	6/5/99	10/4/99	5/4/99	20/2/99	30/12/98
Horas	1,870	878	1,760	2,123	748	812	1,825	1,100	122	75	891	635	75	1,230	1,000	1,000
Cobre	4.00	7.00	3.00	3.00	2.00	3.00	1.00	3.00	1.00	2.00	5.00	4.00	2.00	5.00	4.00	5.00
Máximo	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$\Sigma y = a + b \Sigma x$   
 $\Sigma xy = a \Sigma x + b \Sigma x^2$

**Tabla**

Horas	1,870.00	878.00	1,760.00	2,123.00	748.00	812.00	1,825.00	1,100.00	122.00	75.00	891.00	635.00	75.00	1,230.00	1,000.00	1,000.00
Cobre	4.00	7.00	3.00	3.00	2.00	3.00	1.00	3.00	1.00	2.00	5.00	4.00	2.00	5.00	4.00	5.00

$\Sigma x$ (Horas)	15,745.00
$\Sigma y$ (Viso)	54.00
$\Sigma x^2$ (Horas) <sup>2</sup>	21,368,283.00
$\Sigma xy$	7,480
$\Sigma x^2$	4,753
$\Sigma xy$	5,280
$\Sigma x^2$	6,369
$\Sigma xy$	1,496
$\Sigma x^2$	2,436
$\Sigma xy$	1,625
$\Sigma x^2$	3,300
$\Sigma xy$	122
$\Sigma x^2$	150
$\Sigma xy$	4,455
$\Sigma x^2$	2,540
$\Sigma xy$	150
$\Sigma x^2$	6,150
$\Sigma xy$	4,000
$\Sigma x^2$	5,000

$\Sigma y = a + b \Sigma x$  Ecuación 1      54 =                      16 a +                      15,745 b  
 $\Sigma xy = a \Sigma x + b \Sigma x^2$  Ecuación 2      55,306 =                      15,745 a +                      21,368,283 b

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = 3.38 - 994.06 b$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$55,306 = 15,745 (3.38 - 994.06 b) + 21,368,283 b$   
 $5,874,218.94 = 2166.625 b$

$b = 0.0036884$

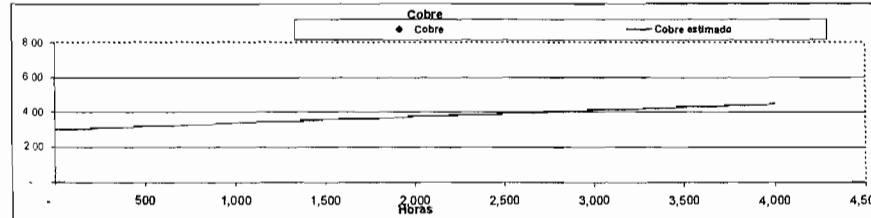
El valor de a con el valor despejado de b es

$a = 3.01$

Ecuación del Cobre    Cobre = 3.01 + 0.003688 Horas de trabajo

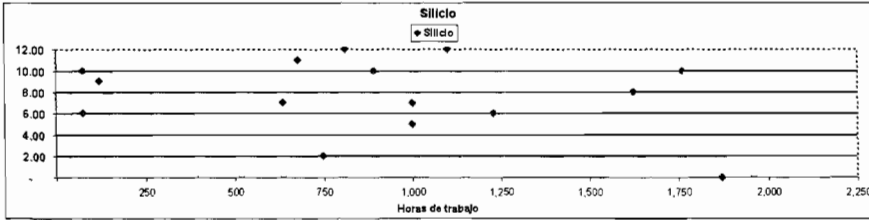
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500
Cobre estimado	3.20	3.29	3.38	3.47	3.57	3.66	3.75	3.84	3.93	4.03	4.12	4.21	4.30	4.40	4.49	4.58	4.67

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500	3,750	4,000
Cobre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobre estimado	3.01	3.10	3.20	3.29	3.38	3.47	3.57	3.66	3.75	3.84	3.93	4.03	4.12	4.21	4.30	4.40	4.49



**Silicio**

Fecha de muestreo	12/02/2001	04/01/2001	24/10/2000	24/09/2000	25/02/2000	30/11/1999	31/09/1999	22/07/1999	7/6/99	1/6/99	26/5/99	6/5/99	10/4/99	5/4/99	20/2/99	30/12/98
Horas	1.870	679	1.760	2.123	748	812	1.625	1.300	122	75	891	635	75	1.290	1.000	1.000
Silicio	-	11,00	10,00	16,00	2,00	12,00	8,00	12,00	9,00	6,00	10,00	7,00	10,00	6,00	5,00	7,00
Módulo	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$\sum Y_i = an + b \sum X_i$   
 $\sum X_i Y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2$

**Tabla**

Horas	1.870,00	679,00	1.760,00	2.123,00	748,00	812,00	1.625,00	1.300,00	122,00	75,00	891,00	635,00	75,00	1.290,00	1.000,00	1.000,00
Silicio	-	11,00	10,00	16,00	2,00	12,00	8,00	12,00	9,00	6,00	10,00	7,00	10,00	6,00	5,00	7,00

$\sum X_i$ (Horas)	15.745,00
$\sum Y_i$ (Visa)	131,00
$\sum X_i^2$ (Horas) <sup>2</sup>	21.368.283,00
$\sum X_i Y_i$	7.469,17.600,33.968,1.496,9.744,13.000,13.200,1.098,450,8.910,4.445,750,7.380,5.000,7.000
$\sum Y_i^2$	131.510,00
Mostradas	16
$\sum Y_i = an + b \sum X_i$ Ecuación 1	131 = 16 a + 15.745 b
$\sum X_i Y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2$ Ecuación 2	131.510 = 15.745 a + 21.368.283 b

De la ecuación 1 despejamos la variable a =

$a = \frac{8,19}{984,05} b$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$131,510 = 15,745 \left( \frac{8,19}{984,05} b \right) + 21,368,283 b$

$b = \frac{5,874,218,94}{0,00044224} = 13,282,579,8125$

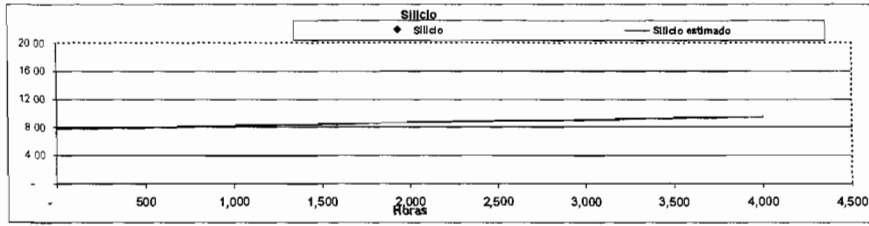
El valor de a con el valor despejado de b es

$a = 7,75$

Ecuación del Silicio:  $Silicio = 7,75 + 0,0004422 \text{ Horas de trabajo}$

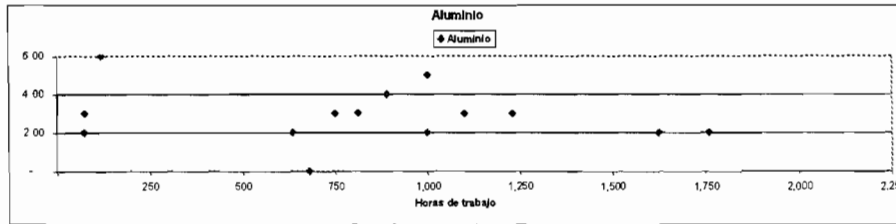
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500
Silicio estimado	7,97	8,08	8,19	8,31	8,42	8,53	8,64	8,75	8,86	8,97	9,08	9,19	9,30	9,41	9,52	9,63	9,74

Horas	250	500	750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750	3.000	3.250	3.500	3.750	4.000
Silicio	-	7,75	7,86	7,97	8,08	8,19	8,31	8,42	8,53	8,64	8,75	8,86	8,97	9,08	9,19	9,30
Silicio estimado	7,75	7,86	7,97	8,08	8,19	8,31	8,42	8,53	8,64	8,75	8,86	8,97	9,08	9,19	9,30	9,41



**Aluminio**

Fecha de muestreo	13/02/2001	04/01/2001	24/10/2000	24/09/2000	25/03/2000	30/11/1999	31/08/1999	22/07/1999	7/6/99	16/5/99	29/5/99	05/5/99	10/4/99	5/4/99	20/2/99	30/12/98
Horas	1.870	879	1.780	2.120	748	812	1.825	1.100	122	75	891	635	75	1.230	1.000	1.000
Aluminio	12.00	-	2.00	14.00	3.00	3.00	2.00	3.00	6.00	3.00	4.00	2.00	2.00	3.00	2.00	5.00
Máximo	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$\sum y_i = an + b \sum x_i$   
 $\sum x_i y_i = a \sum x_i + b \sum x_i^2$

**Tabla**

Horas	1.870.00	879.00	1.780.00	2.120.00	748.00	812.00	1.825.00	1.100.00	122.00	75.00	891.00	635.00	75.00	1.230.00	1.000.00	1.000.00
Aluminio	12.00	-	2.00	14.00	3.00	3.00	2.00	3.00	6.00	3.00	4.00	2.00	2.00	3.00	2.00	5.00

$\sum x_i$ (Horas)	15,745.00
$\sum y_i$ (Alu)	68.00
$\sum x_i^2$ (Horas <sup>2</sup> )	21,368,283.00
$\sum x_i y_i$	22,440
$\sum x_i y_i$	83,543.00
Muestras	16
$\sum y_i = an + b \sum x_i$ Ecuación 1	66 = 18 a + 15,745 b
$\sum x_i y_i = a \sum x_i + b \sum x_i^2$ Ecuación 2	83,543 = 15,745 a + 21,368,283 b

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = \frac{4.13}{984.06} b$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$83,543 = \frac{4.13}{984.06} b + 21,368,283 b$   
 $5,874,218.94 b = 18,594.875$

b = 0.00316551

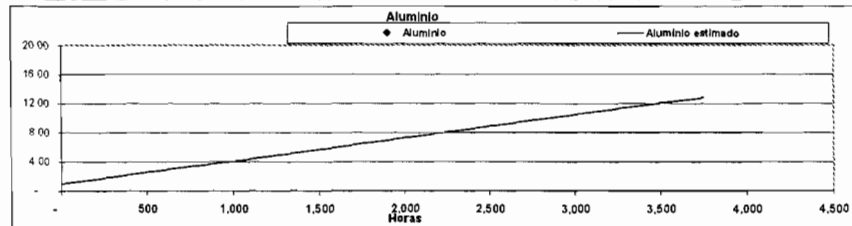
El valor de a con el valor despejado de b es

$a = 1.01$

Ecuación del Sillco Aluminio =  $1.01 + 0.0031655$  Horas de trabajo

Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250
Aluminio estimado	2.59	3.38	4.18	4.97	5.76	6.55	7.34	8.13	8.92	9.72	10.51	11.30	12.09	12.88	13.67	14.46

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	3,250	3,500	3,750
Aluminio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminio estimado	1.01	1.80	2.59	3.38	4.18	4.97	5.76	6.55	7.34	8.13	8.92	9.72	10.51	11.30	12.09	12.88



### Estimación Desgaste máximo del Hierro

Asumiendo que la totalidad del desgaste de hierro que se produce solamente por desgaste de las camisas de los cilindros se realiza este análisis

Diámetro cilindro nuevo	225.000 mm
Diámetro cilindro 30.000 horas trabajo	226.000 mm
Carrera	300 mm
No. de cilindros	16
Volumen de aceite carter galones	495
Volumen de aceite carter litros	1,873.58
Volumen de Fe en camisas	$Vol = PI \cdot Carrera / 4 (D_{ext}^2 - D_{int}^2)$
	$Vol = (3,1416 \cdot 0,3/4) \cdot (0,226^2 - 0,225^2)$
	Vol 0.0001063 m <sup>3</sup> / por camisa
16 cilindros	Vol total 0.0017002 m <sup>3</sup>

Densidad del hierro 7.800 kg/m<sup>3</sup>

Cantidad particulas en peso (16 cilindros a 50.000 h)	13.261825 kg
Cantidad particulas en peso (16 cilindros a 1.000 h)	0.2652365 kg

Con un volumen de aceite 1,873.58 litros y despreciando el consumo, la concentracion de Fe sera

Fe =	0.26523649 kg/1000 h entre	1,873.58 litros
Fe =	0.0001416 kg / lt . 1000 h	
Fe =	141.57 mg / lt . 1000 h	
Fe =	141.57 p.p.m. / 1000 h	

Asumiendo que el desgaste normal no se produzca en la totalidad de las camisas de los cilindros, sino solamente en el lugar que se recuesta el piston cuando existe desgaste de la camisa, se tomaria como referencia la cuarta parte del volumen a desgastar de la camisa como la cantidad maxima de material a perder por desgaste

Fe=	35.39 p.p.m. / 1000 h
-----	-----------------------

Con un cambio de aceite a las 4.000 horas la concentraci3n ser3a

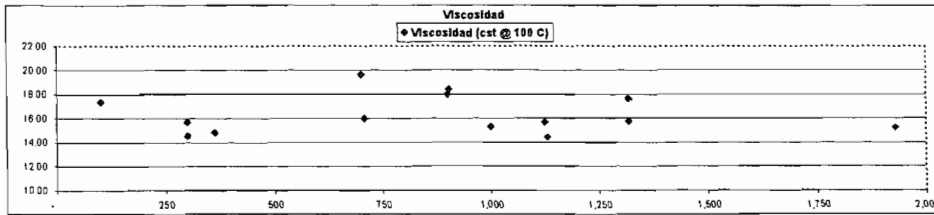
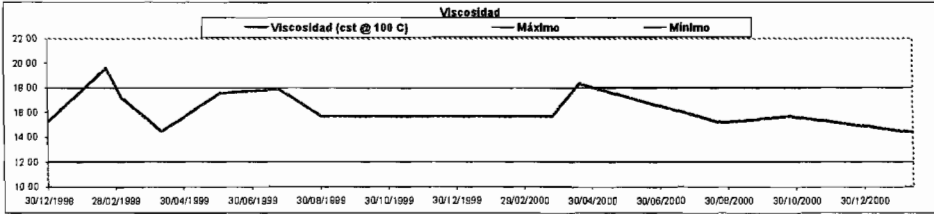
Fe=	141.57 p.p.m. / 4000 h
-----	------------------------

## **APÉNDICE C**

### **GRÁFICOS MÁQUINA AUXILIAR DE BABOR**

**Viscosidad**

Fecha de muestra	12/02/2001	06/01/2001	24/10/2000	24/08/2000	18/04/2000	25/02/2000	31/08/1999	22/07/1999	01/06/1999	06/05/1999	10/04/1999	05/03/1999	20/02/1999	30/01/1999
Viscosidad (cst @ 100 C)	14.40	14.80	15.70	15.20	18.37	15.83	15.83	17.94	17.58	15.95	14.48	17.30	19.58	15.24
Máximo	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Mínimo	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
Horas	1,130	362	1,318	1,930	803	300	1,125	900	1,317	797	300	100	700	1,066
Viscosidad (cst @ 150 C)	14.40	14.80	15.70	15.20	18.37	15.83	17.94	17.58	15.95	14.48	17.30	19.58	15.24	



Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados

$Dy = an + b Dn$   
 $Dxny = a Dnx + b Dnx^2$

Tabla

Horas	1,130	362	1,318	1,930	803	300	1,125	900	1,317	797	300	100	700	1,066
Viscosidad (cst @ 100 C)	14.40	14.80	15.70	15.20	18.37	15.83	17.94	17.58	15.95	14.48	17.30	19.58	15.24	

$Dn$ (Horas)	12,082.00													
$Dn$ (Vise)	227.78													
$Dnx^2$ (Horas) <sup>2</sup>	13,675,340.00													
$Dxny$	16,272	5,368	20,893	28,336	16,588	4,889	17,584	16,146	23,153	11,277	4,338	1,730	13,706	15,240
$Dxny^2$	186,108.57													

Muestras 14

$Dy = an + b Dn$  Ecuación 1

$Dxny = a Dnx + b Dnx^2$  Ecuación 2

$227.78 = 14a + 12,082b$

$156,108 = 12,082a + 13,675,340b$

$156,108 = 12,082(16.27 - 863.7143b) + 13,675,340b$

$3,231,307 = -629b + 13,675,340b$

$b = -0.000194432$

El valor de a con el valor deseado de b es

$a = 16.44$

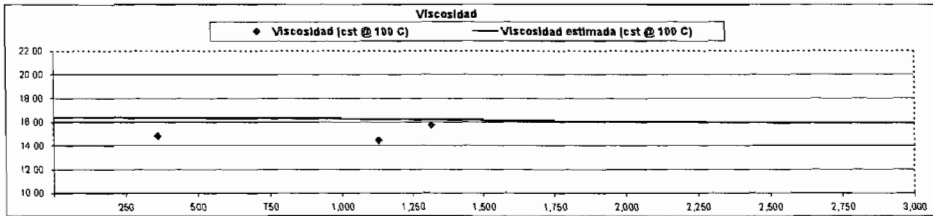
Ecuación de la viscosidad  $Viscosidad = 16.44 + -0.000194 \text{ Horas de trabajo}$

Ecuación de la viscosidad  $Viscosidad = 16.44 + -0.000194 \text{ Horas de trabajo}$

Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al periodo de cambio que se desea determinar

Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Viscosidad estimada (cst @ 100 C)	16.34	16.29	16.24	16.19	16.15	16.10	16.05	16.00	15.95	15.90	15.85

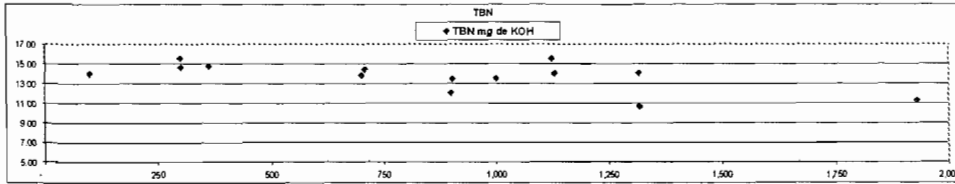
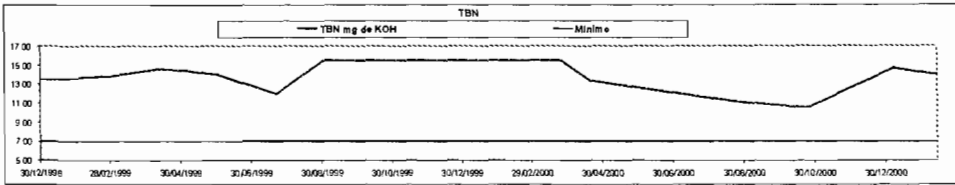
Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	1,130	362	1,318
Viscosidad (cst @ 100 C)																
Viscosidad estimada (cst @ 100 C)	16.44	16.39	16.34	16.29	16.24	16.18	16.15	16.10	16.05	16.00	15.95	15.90	15.85	14.40	14.80	15.70





**TBN**

Fecha de medición	12/02/2001	06/03/2001	24/03/2001	24/03/2001	18/04/2001	25/03/2001	31/03/1999	22/07/1999	04/05/1999	08/05/1999	10/04/1999	05/09/1998	20/02/1998	23/11/1998
TBN mg de KOH	14.00	14.70	10.60	11.30	13.41	15.50	15.50	12.00	14.00	14.40	14.80	13.00	12.80	13.90
Horas	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Horas	1.130	367	1.318	1.430	893	300	1.131	892	1.317	797	300	1.00	790	1.030
TBN mg de KOH	14.00	14.70	10.60	11.30	13.41	15.50	15.50	12.00	14.00	14.40	14.80	13.00	12.80	13.90



Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados

$Y_x = m \cdot X + b$   
 $Y_x = a \cdot X + b$

Horas	1.130	367	1.318	1.430	893	300	1.131	892	1.317	797	300	1.00	790	1.030
TBN mg de KOH	14.00	14.70	10.60	11.30	13.41	15.50	15.50	12.00	14.00	14.40	14.80	13.00	12.80	13.90

$\Sigma X$ (Horas)	12,092.00			
$\Sigma Y$ (TBN)	151.12			
$\Sigma X^2$ (Horas <sup>2</sup> )	13,675,340.00			
$\Sigma X \cdot Y$	15,200			
$\Sigma Y^2$	158,262.76			
Muestras	14			
$\Sigma X = a \cdot X + b \cdot \Sigma Y$	Ecuación 1	151.12 =	14 a +	12,092 b
$\Sigma Y = a \cdot \Sigma X + b \cdot \Sigma X^2$	Ecuación 2	158,262.76 =	12,092 a +	13,675,340 b

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = (151.12 - 150.218) / 14 = 13.66$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$158,262.76 = 12,092 (13.66) + 13,675,340 b$

$b = (158,262.76 - 164,100.72) / 13,675,340 = -0.0017919$

El valor de a con el valor despejado de b es

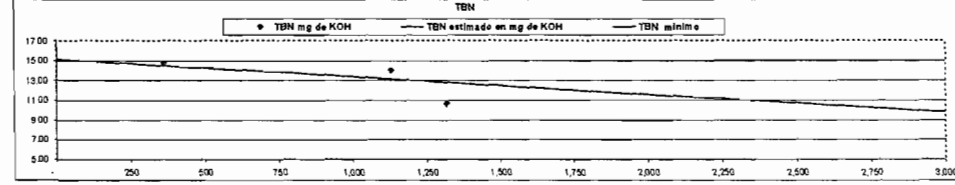
$a = 15.20$

Ecuación del TBN:  $TBN = 15.20 - 0.0017919 \cdot \text{Horas de trabajo}$

Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al periodo de cambio que se desea determinar

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
TBN estimado en mg de KOH	15.20	14.75	14.30	13.86	13.41	12.96	12.51	12.06	11.62	11.17	10.72	10.27	9.82

Horas	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	1,130	367	1,318
TBN mg de KOH	14.75	14.30	13.86	13.41	12.96	12.51	12.06	11.62	11.17	10.72	10.27	9.82	14.00	14.70	10.60
TBN estimado en mg de KOH	14.75	14.30	13.86	13.41	12.96	12.51	12.06	11.62	11.17	10.72	10.27	9.82			
TBN mínimo	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00



Ajuste de la curva a partir de una Regresión Curvilínea

$y = a \cdot x^b$   
 $\log y = \log a + b \log x$   
 $\sum \log y = n \log a + b \sum \log x$   
 $\sum x \log y = \sum x \log a + \sum x^2 \log b$

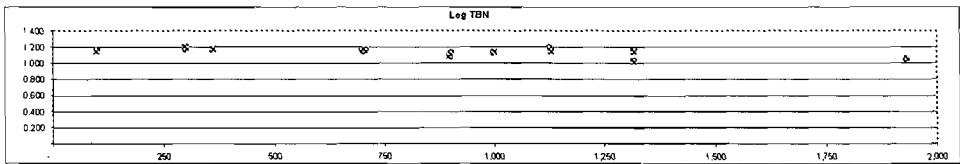
Entonces se pueden generar pares de valores (x, log y)

Horas	362	1.318	1.950	303	300	1.125	900	1.217	207	300	100	700	1.200
TBN mg de KOH	14.00	14.70	10.80	11.20	13.42	15.80	15.50	12.80	14.40	14.40	13.90	13.80	13.60
Log TBN	1.144	1.167	1.035	1.049	1.128	1.195	1.195	1.073	1.146	1.158	1.134	1.143	1.138

$\sum x \log a = 12,952,00$   
 $\sum \log y (\text{TBN}) = 15,86$   
 $\sum x^2 \log a = 13,675,340,00$   
 $\sum x \log y = 1,295$   
 $\sum x \log x = 13,900,15$   
 Muestras = 14

$\sum \log y = n \log a + \sum x \log b$  Ecuación 1  $15,86 = 14 \log a + 12,952 \log b$   
 $\sum x \log y = \sum x \log a + \sum x^2 \log b$  Ecuación 2  $13,900,15 = 13,675,340 \log a + 1,295 \log b$

De la ecuación 1 despejamos la variable a  $1,3289$   $883,71 \log b$   
 $\log a = 1,3289$   
 Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor log b  $13,900,15 = 13,675,340 (1,3289) + 1,295 \log b$   
 $3,231,306,86 \log b = -0,00000754$   $b = 0,999860119$   
 El valor de a con el valor despejado de b es  $a = 15,3160445$   
 $\log y = \log a + b \log x$   
 $\log y = 1,186162487 - 0,0000607540 x$   
 $y = a \cdot x^b = 15,3160445 (0,999860119)^x$

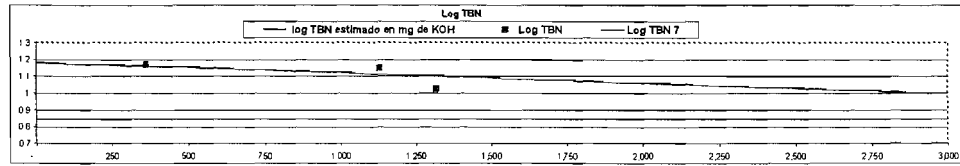


Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al periodo de cambio que se desea determinar

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
log TBN estimado en mg de KOH	1.18	1.17	1.15	1.14	1.12	1.11	1.09	1.08	1.06	1.05	1.03	1.02	1.00
TBN estimado formula	15.92	14.72	14.28	13.78	13.32	12.86	12.42	11.99	11.58	11.18	10.80	10.43	10.07

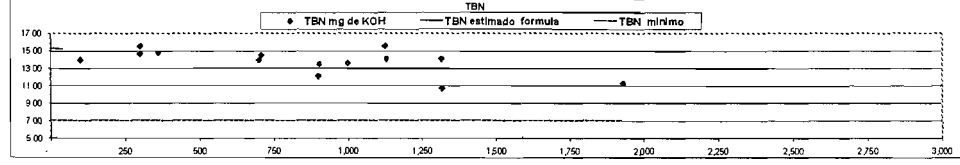
  

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	1.30	362	1.318
log TBN estimado en mg de KOH	1.18	1.17	1.15	1.14	1.12	1.11	1.09	1.08	1.06	1.05	1.03	1.02	1.00			
log TBN	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	1.15	1.17	1.12



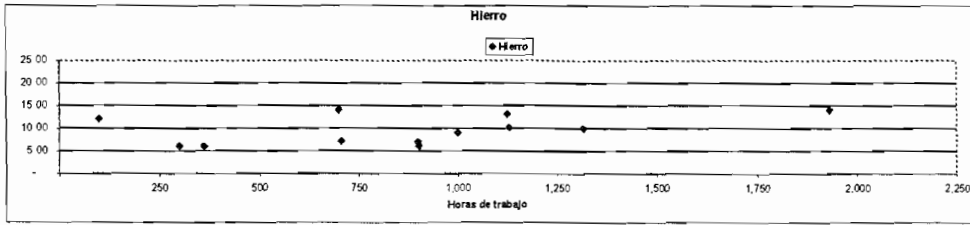
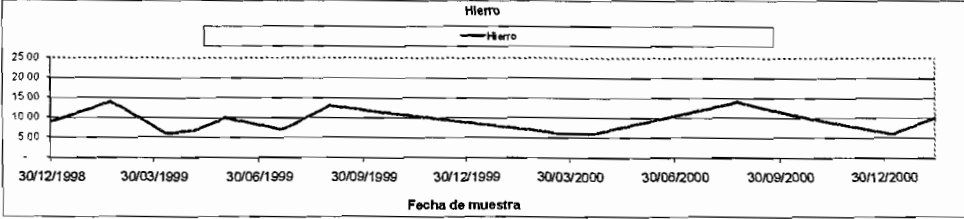
Gráfica resultante de curva ajustada con curvas ajustadas

Horas	1.130	362	1.318	1.950	303	300	1.125	900	1.217	207	300	100	700	1.000	20	40
TBN mg de KOH	14.00	14.70	10.80	11.20	13.42	15.50	15.50	17.00	14.00	14.40	14.60	13.90	13.90	15.90		
TBN estimado formula															15.92	15.77
TBN mínimo	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Diferencia en la base de TBN est															0.04	0.04



**Hierro**

Fecha de muestra	12/02/2001	06/01/2001	24/10/2000	24/09/2000	18/04/2000	25/02/2000	31/09/1999	22/07/1999	01/06/1999	06/05/1998	10/04/1999	05/03/1999	20/02/1999	30/12/1998
Horas	1.130	362	1.318	1.890	903	300	1.125	900	1.317	707	300	100	700	1.000
Hierro	10,00	6,00	10,00	14,00	6,00	6,00	13,00	7,00	10,00	7,00	6,00	13,00	14,00	9,00
Milivoto	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00



Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados

$Dy = an + b \cdot Dx$   
 $\Sigma Dy = a \cdot \Sigma n + b \cdot \Sigma Dx$   
 $\Sigma aDy = a \cdot \Sigma n + b \cdot \Sigma Dx^2$

Tabla

Horas	1.130	362	1.318	1.890	903	300	1.125	900	1.317	707	300	100	700	1.000
Hierro	10,00	6,00	10,00	14,00	6,00	6,00	13,00	7,00	10,00	7,00	6,00	13,00	14,00	9,00

$\Sigma n$ (Horas)	12,092	00													
$\Sigma n^2$ (Horas) <sup>2</sup>	13,675,340	00													
$\Sigma Dx$	11,300		2,172	13,180	27,020	5,418	1,800	14,625	6,300	13,170	4,949	1,800	1,200	9,800	9,000
$\Sigma Dx^2$	121,734	00													
Muestras	14														
$\Sigma Dy = an + b \cdot \Sigma Dx$	Ecuación 1	130 =		14	a +		12,092	b							
$\Sigma aDy = a \cdot \Sigma n + b \cdot \Sigma Dx^2$	Ecuación 2	121,734 =		12,092	a +		13,675,340	b							

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = 9.29 - 853.71 \cdot b$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$121,734 = 12,092 (9.29 - 853.71 \cdot b) + 13,675,340 \cdot b$

$b = 0.00292487$

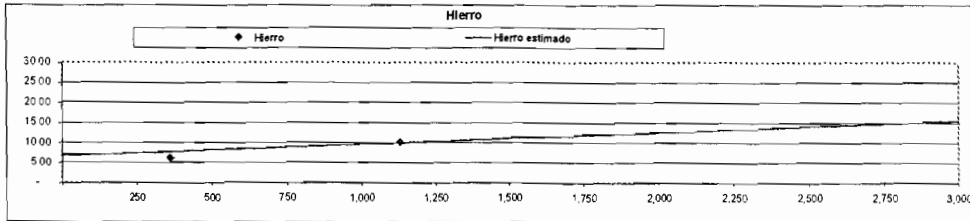
El valor de a con el valor despejado de b es

$a = 6.76$

Ecuación del Hierro:  $Hierro = 6.76 + 0.0029249 \cdot \text{Horas de trabajo}$

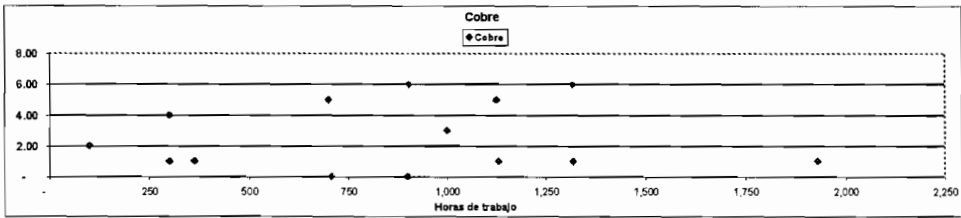
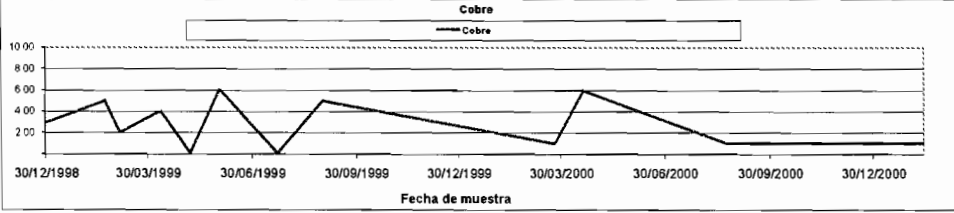
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Hierro estimado	8.22	8.95	9.68	10.42	11.15	11.88	12.61	13.34	14.07	14.80	15.53

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	1,130	362	
Hierro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,00	6,00	
Hierro estimado	-	6.76	7.49	8.22	8.95	9.68	10.42	11.15	11.88	12.61	13.34	14.07	14.80	15.53	-	-



**Cobre**

Fecha de muestreo	12/02/2001	06/01/2001	24/10/2000	24/08/2000	19/04/2000	25/03/2000	31/08/1999	22/07/1999	01/06/1999	08/06/1999	10/04/1999	05/03/1999	20/02/1999	30/12/1998
Horas	1.130	362	1.318	1.930	803	300	1.125	900	1.317	707	300	100	700	1.000
Cobre	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00	1.00	5.00	-	6.00	-	4.00	2.00	5.00	3.00
Muestras	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00



Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados

$\sum y_i = an + b \sum x_i$   
 $\sum x_i y_i = a \sum x_i + b \sum x_i^2$

Tabla

Horas	1.130	362	1.318	1.930	803	300	1.125	900	1.317	707	300	100	700	1.000
Cobre	1.00	1.00	1.00	1.00	6.00	1.00	5.00	-	6.00	-	4.00	2.00	5.00	3.00

$\sum x_i$ (Horas)	12,092.00													
$\sum y_i$ (Cobre)	36.00													
$\sum x_i^2$ (Horas) <sup>2</sup>	13,875,340.00													
$\sum x_i y_i$	1,130	362	1,318	1,930	5,418	300	5,925	-	7,802	-	1,200	200	3,500	3,000
Muestras	31,885.00													
Muestras	14													
$\sum y_i = an + b \sum x_i$	Ecuación 1	36 =		14 a +	12,092 b									
$\sum x_i y_i = a \sum x_i + b \sum x_i^2$	Ecuación 2	31,885 =		12,092 a +	13,875,340 b									

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$a = \frac{36 - 14b}{12,092}$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$31,885 = \frac{36 - 14b}{12,092} (12,092) + 13,875,340 b$

$b = \frac{3,231,306.88}{791,285,714} = 0.0024488$

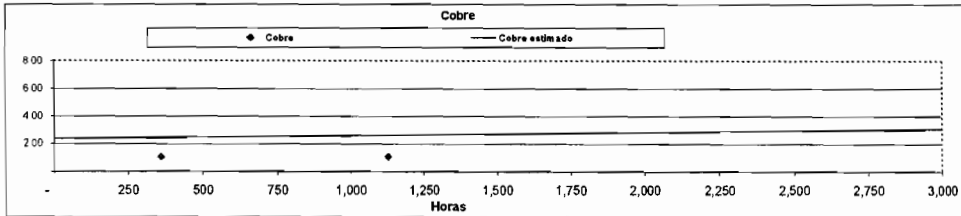
El valor de a con el valor despejado de b es

$a = \frac{36 - 14(0.0024488)}{12,092} = 2.98$

Ecuación del Cobre:  $Cobre = 2.98 + 0.0024488 \text{ Horas de trabajo}$

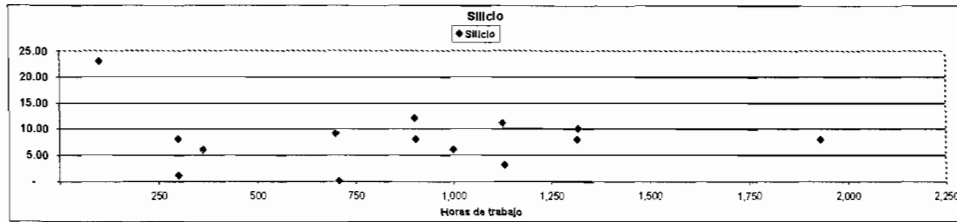
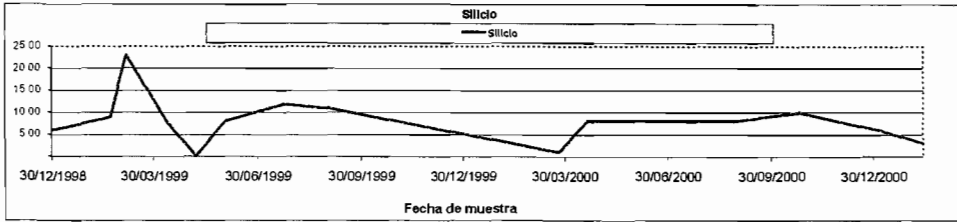
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Cobre estimado	2.48	2.54	2.60	2.67	2.73	2.79	2.85	2.91	2.97	3.03	3.09

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	1,130	362
Cobre	-													1	1
Cobre estimado	2.38	2.42	2.48	2.54	2.60	2.67	2.73	2.79	2.85	2.91	2.97	3.03	3.09		



**Silicio**

Fecha de Muestra	12/02/2001	06/01/2001	24/10/2000	24/08/2000	16/04/2000	29/03/2000	31/06/1999	22/07/1999	01/06/1999	09/05/1999	10/04/1999	05/03/1999	20/02/1999	30/12/1998
Horas	1.130	362	1.318	1.930	903	300	1.125	900	1.317	707	300	100	700	1.000
Silicio	3.00	6.00	10.00	8.00	8.00	1.00	11.00	12.00	8.00	-	8.00	29.00	9.00	8.00
Momento	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$D_{ij} = a + b \cdot X_{ij}$   
 $E_{ij} = a + b \cdot X_{ij} + E_{ij}^2$

**Tabla**

Horas	1.130	362	1.318	1.930	903	300	1.125	900	1.317	707	300	100	700	1.000
Silicio	3.00	6.00	10.00	8.00	8.00	1.00	11.00	12.00	8.00	-	8.00	29.00	9.00	8.00

$\sum X_{ij}$  (Horas) 12,092 00  
 $\sum Y_{ij}$  (Silicio) 113 00  
 $\sum X_{ij}^2$  (Horas)<sup>2</sup> 13,675,340 00  
 $\sum Y_{ij}^2$  (Silicio)<sup>2</sup> 3,390 00  
 $\sum X_{ij} Y_{ij}$  92,417 00  
 Muestras 14

$D_{ij} = a + b \cdot X_{ij}$  Ecuación 1  $113 = 14 a + 12,092 b$   
 $E_{ij} = a + b \cdot X_{ij} + E_{ij}^2$  Ecuación 2  $92,417 = 12,092 a + 13,675,340 b$

De la ecuación 1 despejamos la variable a  
 $a = 8.07 - 863.71 b$

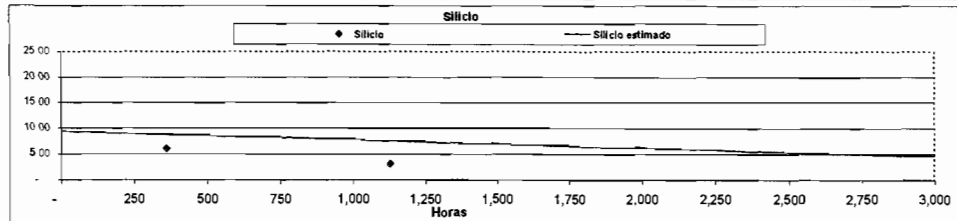
Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b  
 $92,417 = 12,092 (8.07 - 863.71 b) + 13,675,340 b$   
 $3,231,306.86 = b = -5182.7143$

$b = -0.00160391$   
 El valor de a con el valor despejado de b es  
 $a = 9.46$

Ecuación del Silicio  $Silicio = 9.46 + -0.0016039 \cdot \text{Horas de trabajo}$

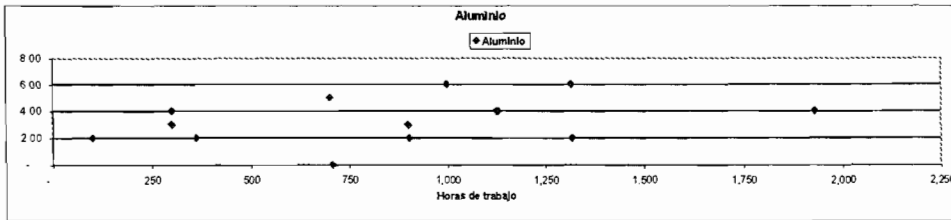
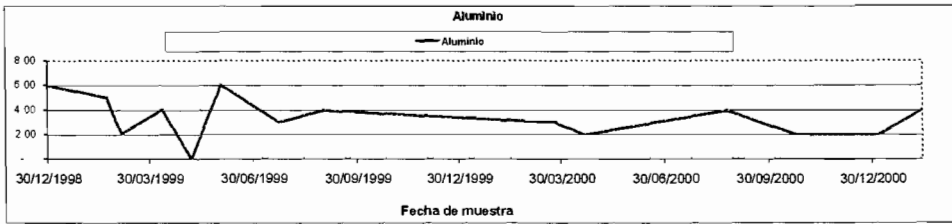
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Silicio estimado	8.65	8.25	7.85	7.45	7.05	6.65	6.25	5.85	5.45	5.05	4.65

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	1,130	362
Silicio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	6
Silicio estimado	9.46	9.06	8.65	8.25	7.85	7.45	7.05	6.65	6.25	5.85	5.45	5.05	4.65	-	-



**Aluminio**

Fecha de muestreo	12/02/2001	06/01/2001	24/10/2000	24/09/2000	19/04/2000	25/03/2000	31/08/1999	22/07/1999	01/06/1999	09/05/1999	10/04/1999	09/03/1999	23/02/1999	30/12/1998
Horas	1.130	362	1.318	1.930	800	300	1.125	900	1.317	707	300	100	700	1.000
Aluminio	4,00	2,00	2,00	4,00	2,00	3,00	4,00	3,00	8,00	-	4,00	2,00	5,00	6,00
Máximo	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$Dy = ax + b$   
 $Dxy = a \sum Dx + b \sum Dn$

**Tabla**

Horas	1.130	362	1.318	1.930	800	300	1.125	900	1.317	707	300	100	700	1.000
Aluminio	4,00	2,00	2,00	4,00	2,00	3,00	4,00	3,00	8,00	-	4,00	2,00	5,00	6,00

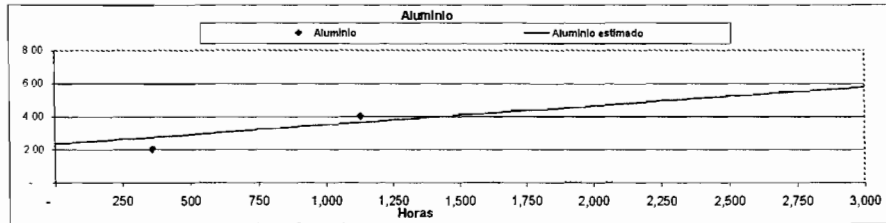
$\sum Dx$ (Horas)	12,092.00
$\sum Dy$ (Vms)	47.00
$\sum Dx^2$ (Horas) <sup>2</sup>	13,675,340.00
$\sum Dxy$	4,520
$\sum Dxy$	44,308.00
Muestras	14
$Dy = ax + b$ Ecuación 1	47 = 14 a + 12,092 b
$Dxy = a \sum Dx + b \sum Dn$ Ecuación 2	44,308 = 12,092 a + 13,675,340 b

De la ecuación 1 despejamos la variable a = 3.36 - 863.71 b  
 Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b  
 $44,308 = 12,092 ( 3.36 - 863.71 b ) + 13,675,340 b$   
 $3,231,306.86 = 3713,4266 b$   
 $b = 0.00114920$   
 El valor de a con el valor despejado de b es  
 $a = 2.36$

Ecuación del Silicio  $Aluminio = 2.36 + 0.0011492 \text{ Horas de trabajo}$

Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Aluminio estimado	2.94	3.23	3.51	3.80	4.09	4.38	4.66	4.95	5.24	5.52	5.81

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	1,130	362
Aluminio														4	2
Aluminio estimado	2.36	2.85	2.94	3.23	3.51	3.80	4.09	4.38	4.66	4.95	5.24	5.52	5.81		

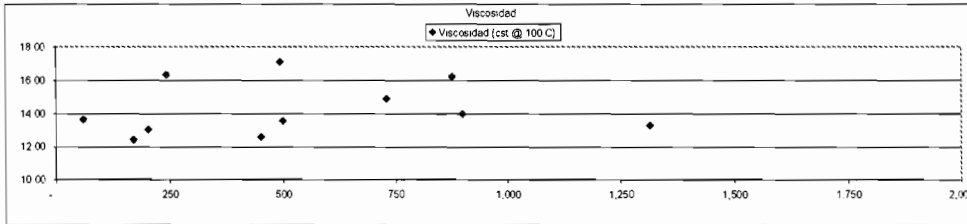
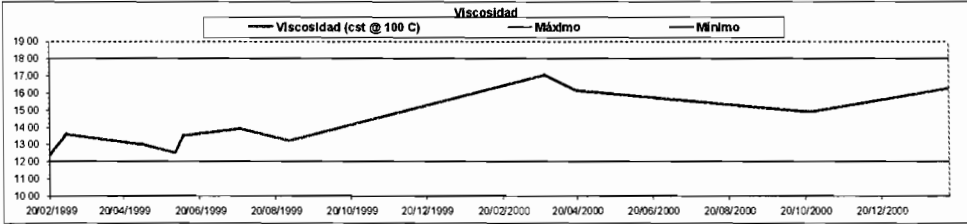


## **APÉNDICE D**

### **GRÁFICOS MÁQUINA AUXILIAR DE ESTRIBOR**

**Viscosidad**

Fecha de muestreo	12/02/2001	24/10/2000	19/04/2000	25/03/2000	31/08/1999	20/07/1999	07/06/1999	01/06/1999	06/05/1999	05/03/1999	20/02/1999
Viscosidad (cst @ 100 C)	16.30	14.90	16.18	17.07	13.24	13.95	13.53	12.55	13.01	13.60	12.39
Máximo	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Mínimo	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
Horas	243	730	877	495	1,315	900	500	452	204	60	170
Viscosidad (cst @ 100 C)	16.30	14.90	16.18	17.07	13.24	13.95	13.53	12.55	13.01	13.60	12.39



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$E_y = ax + b$   
 $\sum a_i x_i = a \sum x_i + b \sum 1$

Tabla	243	730	877	495	1,315	900	500	452	204	60	170
Horas	243	730	877	495	1,315	900	500	452	204	60	170
Viscosidad (cst @ 100 C)	16.30	14.90	16.18	17.07	13.24	13.95	13.53	12.55	13.01	13.60	12.39

$\sum x_i$ (Horas)	5,946.00				
$\sum y_i$ (Visc)	156.72				
$\sum x_i^2$ (Horas) <sup>2</sup>	4,673,748.00				
$\sum x_i y_i$	3,961				
Muestras	85,459.95				
Muestras	11				
$E_y = ax + b$	Ecuación 1	156.72 =	11 a	+	5,946 b
$\sum a_i x_i = a \sum x_i + b \sum 1$	Ecuación 2	85,457 =	5,946 a	+	4,673,748 b

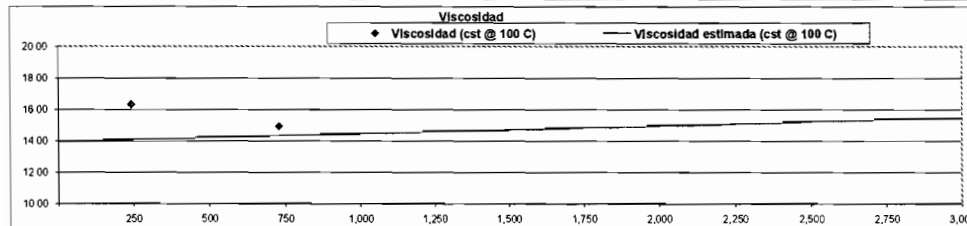
De la ecuación 1 despejamos la variable a  
 $a = \frac{14.24727273}{540.55} b$   
 Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b  
 $85,457 = \frac{5,946}{743} \left( \frac{14.24727}{540.5455} b \right) + 4,673,748 b$   
 $b = 0.000508792$   
 El valor de a con el valor despejado de b es  
 $a = 13.97$

Ecuación de la viscosidad  $Viscosidad = 13.97 + 0.000509 \text{ Horas de trabajo}$

Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al periodo de cambio que se desee determinar

Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Viscosidad estimada (cst @ 100 C)	14.23	14.35	14.48	14.61	14.74	14.86	14.99	15.12	15.24	15.37	15.50

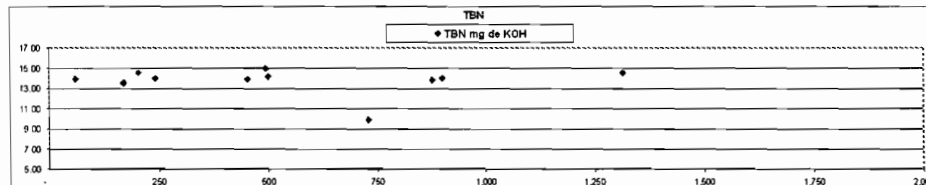
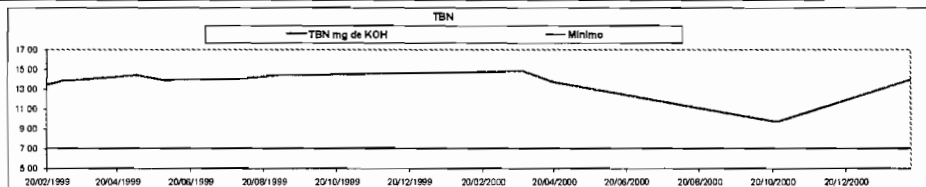
Horas	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	243	730
Viscosidad (cst @ 100 C)													16.30	14.90
Viscosidad estimada (cst @ 100 C)	13.97	14.10	14.23	14.35	14.48	14.61	14.74	14.86	14.99	15.12	15.24	15.37	15.50	





**TBN**

Fecha de muestreo	12/02/2000	24/02/2000	19/04/2000	25/03/2000	31/03/1999	22/01/1999	07/06/1999	01/06/1999	09/05/1999	05/03/1999	20/02/1999
TBN mg de KOH	14.00	9.80	13.82	14.82	14.90	14.00	14.10	13.80	14.80	13.80	13.50
Muestras	243	730	877	495	1,315	900	520	453	204	80	170
TBN mg de KOH	14.00	9.80	13.82	14.82	14.50	14.00	14.10	13.80	14.80	13.80	13.50



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$Zy = an + b Zn$   
 $Zxy = a Zn + b Zn^2$

Muestras	243	730	877	495	1,315	900	520	453	204	80	170
TBN mg de KOH	14.00	9.80	13.82	14.82	14.50	14.00	14.10	13.80	14.80	13.80	13.50

$\sum n$  (frec) 5,946.00  
 $\sum n(TBN)$  150.95  
 $\sum n^2$  (frec)<sup>2</sup> 4,673,748.00  
 $\sum nxy$  3,402  
 $\sum nxy$  81,153.79

Muestras 11  
 $Zy = an + b Zn$  Ecuación 1  
 $Zxy = a Zn + b Zn^2$  Ecuación 2

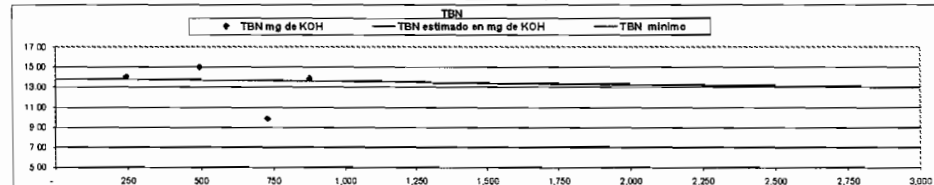
De la ecuación 1 despejamos la variable a  
 $a = 13.03 - 0.0021b$   
 Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b  
 $81,153.79 = 5,846 (13.03 - 0.0021b) + 4,673,748 b$   
 $1,459,664.73 = 76,000.00 - 12,000.00b + 4,673,748 b$   
 $b = 0.0003025$   
 El valor de a con el valor despejado de b es  
 $a = 13.08$

Ecuación del TBN  $TBN = 13.08 + 0.0003025 \text{ Horas de trabajo}$

Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al periodo de cambio que se desea determinar

Muestras	0	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000
TBN estimado en mg de KOH	13.08	13.81	13.72	13.66	13.50	13.51	13.43	13.36	13.28	13.21	13.13	13.05	12.98

Muestras	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	243	730	877	495	
TBN mg de KOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.00	9.80	13.82	14.82	
TBN estimada en mg de KOH	-	13.80	13.81	13.72	13.66	13.56	13.51	13.43	13.36	13.28	13.21	13.13	13.05	12.98	-	-	-	-
TBN mínima	-	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00



Ajuste de la curva a partir de una Regresión Curvilínea

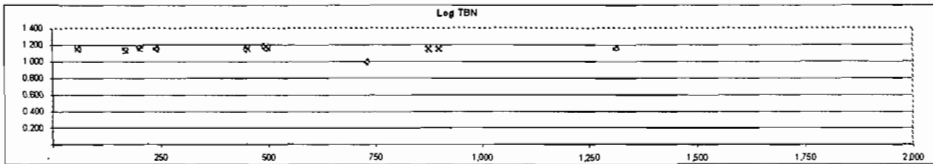
$y = a \cdot \beta^x$   
 $\log y = \log a + x \log \beta$   
 $\sum \log y = n \log a + \sum x \log \beta$   
 $\sum x \log y = \sum x \log a + \sum x^2 \log \beta$

Entonces se pueden generar pares de valores (x, log y)

Horas	243	735	877	495	1.315	800	500	452	204	86	170
TBN mg de KOH	14.00	9.85	13.92	14.93	14.50	14.00	14.10	13.80	14.40	13.90	13.90
Log TBN	1.146	0.991	1.141	1.174	1.161	1.146	1.148	1.143	1.161	1.143	1.139

$\sum x$  (nuevo) 5,916.00  
 $\sum \log y$  (TBN) 12.49  
 $\sum x^2$  (nuevo) 4,673,748.00  
 $\sum x \log y$  279  
 $\sum x \log a$  6,731.11  
Muestras 11  
Ecuación 1  $\log a + x \log \beta$  Ecuación 2  $\log a + x \log \beta$   
 $\sum \log y = n \log a + \sum x \log \beta$  Ecuación 1  $12.49 = 11 \log a + 5,916 \log \beta$   
 $\sum x \log y = \sum x \log a + \sum x^2 \log \beta$  Ecuación 2  $279 = 6,731.11 \log a + 4,673,748 \log \beta$

De la ecuación 1 despejamos la variable a  
 $\log a = 1.13512$   $540.56 \log \beta$   
 Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor log b  
 $6,731.11 = 5,946 (1.13512) + 4,673,748 \log \beta$   
 $1,458,864.73 = 4,673,748 \log \beta$   
 $\log \beta = 0.000125693$   
 El valor de a con el valor de despejado de b es  $a = 0.999971073$   
 $\log a = 1.141915114$   $a = 13.86484804$   
 $\log y = \log a + x \log \beta$   
 $\log y = 1.141915114 + 0.000125627 \cdot x$   
 $y = a \cdot \beta^x$   $y = 13.86484804 (0.999971073)^x$



Con la ecuación se puede estimar el comportamiento de la viscosidad en condiciones normales al periodo de cambio que se desea determinar

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
log TBN estimado en mg de KOH	1.14	1.14	1.14	1.13	1.13	1.13	1.12	1.12	1.12	1.11	1.11	1.11	1.10
TBN estimado formula	13.88	13.78	13.97	13.57	13.47	13.37	13.28	13.18	13.08	12.98	12.90	12.80	12.71

Horas	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	249	736	877	495
log TBN estimado en mg de KOH	1.14	1.14	1.14	1.13	1.13	1.13	1.12	1.12	1.12	1.11	1.11	1.11	1.10	1.15	0.96	1.14	1.17
log TBN7	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451	0.8451				

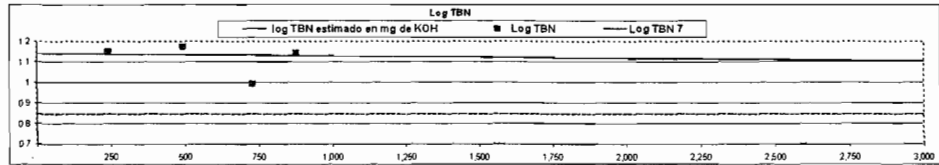
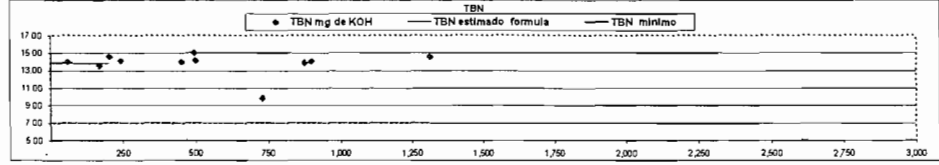


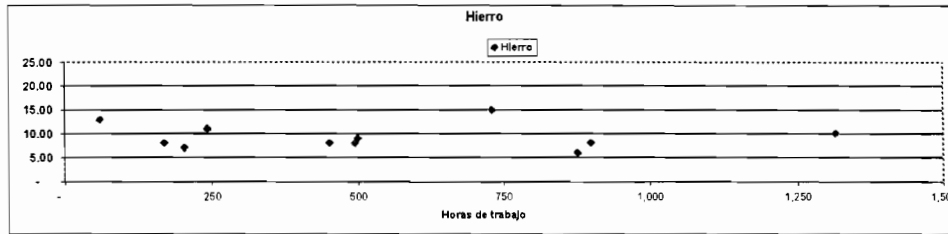
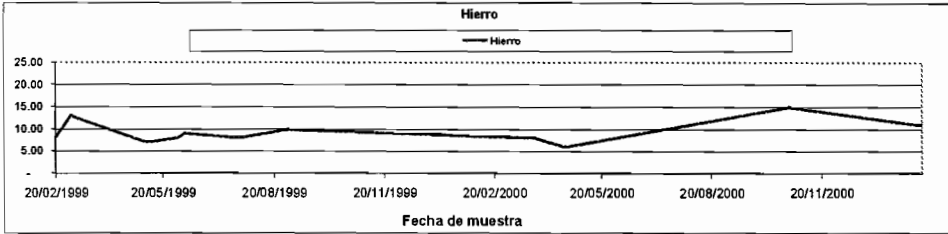
Gráfico resultante de curva aproximada con puntos analizados

Horas	243	735	877	495	1.315	800	500	452	204	86	170
TBN mg de KOH	14.00	9.85	13.92	14.93	14.50	14.00	14.10	13.80	14.50	13.90	13.90
TBN estimado formula											
TBN mínimo	7.00	7.03	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Diferencia en la baja de TBN es											



**Hierro**

Fecha de muestreo	12/02/2001	24/10/2000	19/04/2000	25/03/2000	31/08/1999	22/07/1999	07/06/1999	01/09/1999	08/05/1999	05/03/1999	20/02/1999
Horas	243	730	877	495	1.315	900	500	452	204	80	170
Hierro	11.00	15.00	6.00	8.00	10.00	8.00	8.00	8.00	7.00	13.00	8.00
Máximo	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$Zy = ax + b \sum Xi$   
 $\sum Xiy = a \sum Xi + b \sum Xi^2$

**Tabla**

Horas	243	730	877	495	1.315	900	500	452	204	80	170
Hierro	11.00	15.00	6.00	8.00	10.00	8.00	9.00	8.00	7.00	13.00	8.00

$\sum Xi$ (Horas)	5,946.00										
$\sum Yi$ (Visto)	103.00										
$\sum Xi^2$ (Horas) <sup>2</sup>	4,673,748.00										
$\sum Xiy$	2,673	10,950	5,262	3,960	13,150	7,200	4,500	3,616	1,428	780	1,360
$\sum Xiy^2$	54,879.00										
Muestras	11										
$Zy = ax + b \sum Xi$	Ecuación 1		103 =	11 a +	5,946 b						
$\sum Xiy = a \sum Xi + b \sum Xi^2$	Ecuación 2		54,879 =	5,046 a +	4,673,748 b						

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$$a = \frac{9.36 - 540.55 b}{1.459,664.73}$$

$$b = \frac{5.946 \{ 9.36 - 540.55 b \} + 4,673,748 b}{-797.1818}$$

$$b = -0.00054614$$

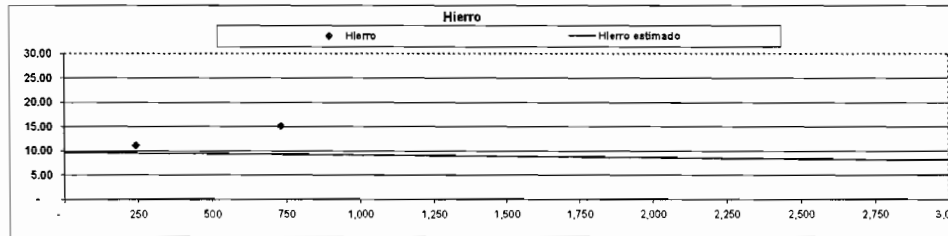
El valor de a con el valor despejado de b es

$$a = 9.66$$

Ecuación del Hierro:  $Hierro = 9.66 + -0.0005461 \text{ Horas de trabajo}$

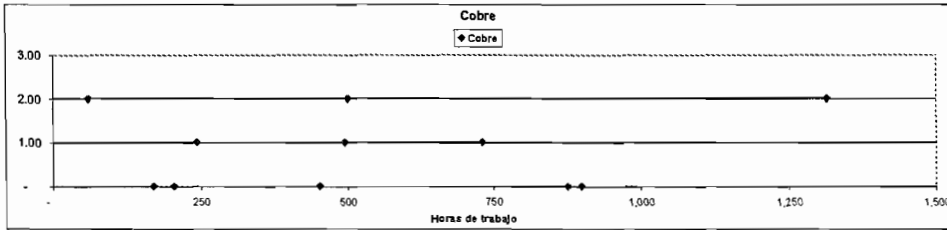
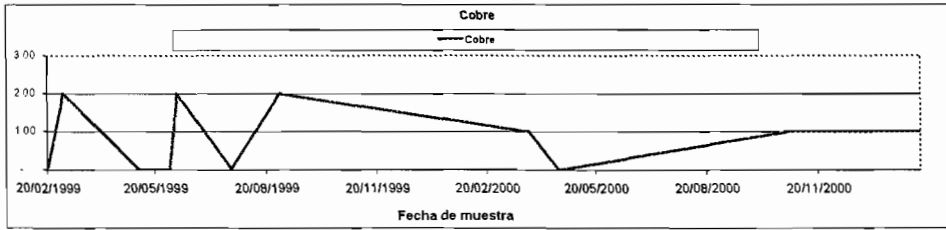
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Hierro estimado	9.39	9.25	9.11	8.98	8.84	8.70	8.57	8.43	8.29	8.16	8.02

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	243	730	
Hierro														11.00	15.00	
Hierro estimado		9.66	9.52	9.39	9.25	9.11	8.98	8.84	8.70	8.57	8.43	8.29	8.16	8.02		



**Cobre**

Fecha de muestreo	12/02/2001	24/10/2003	18/04/2000	25/03/2003	31/08/1999	22/07/1999	07/06/1999	01/06/1999	05/05/1999	05/03/1999	20/02/1999
Horas	243	730	877	495	1,315	900	500	452	204	60	170
Cobre	1.00	1.00	-	1.00	2.00	-	2.00	-	-	2.00	-
Máximo	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$Dy = a + b \cdot \Sigma x$   
 $\Sigma axy = a \cdot \Sigma x + b \cdot \Sigma x^2$

**Tabla**

	243	730	877	495	1,315	900	500	452	204	60	170
Horas	243	730	877	495	1,315	900	500	452	204	60	170
Cobre	1.00	1.00	-	1.00	2.00	-	2.00	-	-	2.00	-

$\Sigma x$ (Horas)	5,946.00
$\Sigma y$ (Vaso)	9.00
$\Sigma x^2$ (Horas) <sup>2</sup>	4,573,748.00
$\Sigma axy$	243
$\Sigma axy$	5,218.00
Muestras	11
$Dy = a + b \cdot \Sigma x$ Ecuación 1	$9 = 11a + 5,946b$
$\Sigma axy = a \cdot \Sigma x + b \cdot \Sigma x^2$ Ecuación 2	$5,218 = 5,946a + 4,573,748b$

De la ecuación 1 despejamos la variable a

$$a = 0.82 - 540.55 b$$

Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b

$$5,218 = 5,946 (0.82 - 540.55 b) + 4,573,748 b$$

$$b = 0.00024190$$

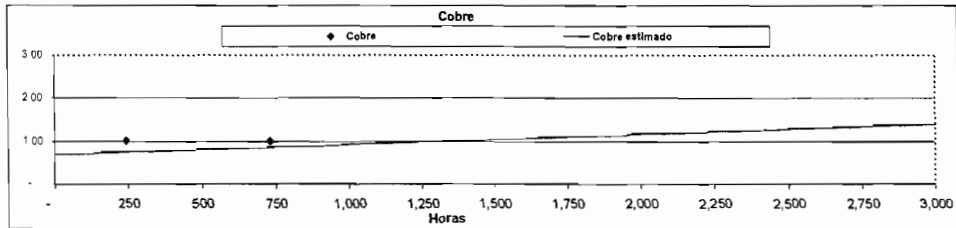
El valor de a con el valor despejado de b es

$$a = 0.69$$

Ecuación del Cobre:  $Cobre = 0.69 + 0.0002419 \text{ Horas de trabajo}$

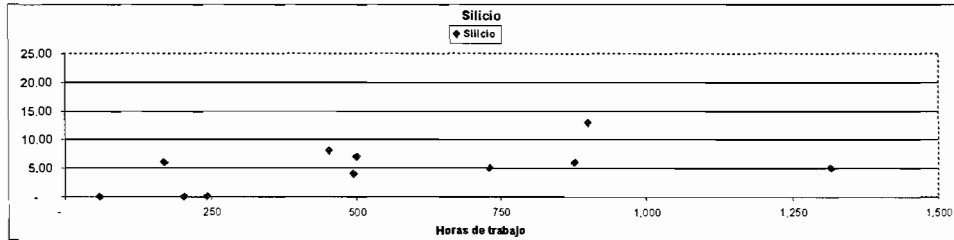
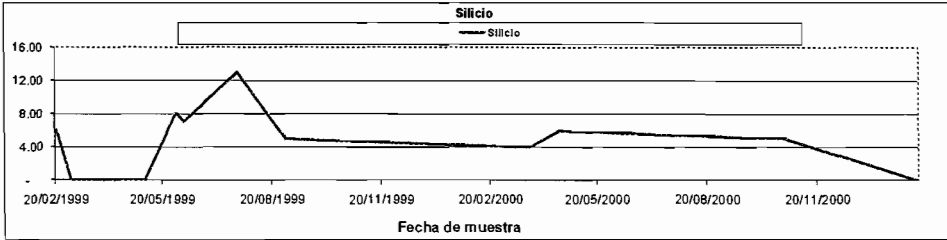
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Cobre estimado	0.81	0.87	0.93	0.99	1.05	1.11	1.17	1.23	1.29	1.35	1.41

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	243	730
Cobre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Cobre estimado	0.69	0.75	0.81	0.87	0.93	0.99	1.05	1.11	1.17	1.23	1.29	1.35	1.41	-	-



**Silicio**

Fecha de muestreo	12/02/2001	24/10/2000	19/04/2000	25/03/2000	31/08/1999	22/07/1999	07/06/1999	01/06/1999	08/05/1999	05/03/1999	20/02/1999
Horas	243	730	877	485	1.315	900	500	452	204	60	170
Silicio	-	5.00	6.00	4.00	5.00	13.00	7.00	8.00	-	-	6.00
Máximo	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$\Sigma y_i = a n + b \Sigma x_i$   
 $\Sigma x_i y_i = a \Sigma x_i + b \Sigma x_i^2$

**Tabla**

Horas	243	730	877	485	1.315	900	500	452	204	60	170
Silicio	-	5.00	6.00	4.00	5.00	13.00	7.00	8.00	-	-	6.00

$\Sigma x_i$ (Horas)	5,946.00
$\Sigma y_i$ (Vase)	54.00
$\Sigma x_i^2$ (Horas) <sup>2</sup>	4,673,748.00
$\Sigma x_i y_i$	3,650
$\Sigma x_i y_i$	5,262
$\Sigma x_i y_i$	1,960
$\Sigma x_i y_i$	6,575
$\Sigma x_i y_i$	11,700
$\Sigma x_i y_i$	3,500
$\Sigma x_i y_i$	3,616
$\Sigma x_i y_i$	-
$\Sigma x_i y_i$	-
$\Sigma x_i y_i$	1,020
Muestras	11
$\Sigma y_i = a n + b \Sigma x_i$	Ecuación 1
$\Sigma x_i y_i = a \Sigma x_i + b \Sigma x_i^2$	Ecuación 2

De la ecuación 1 despejamos la variable a  
 $a = \frac{54.00 - 0.0055585 \cdot 5,946.00}{11} = 4.91$

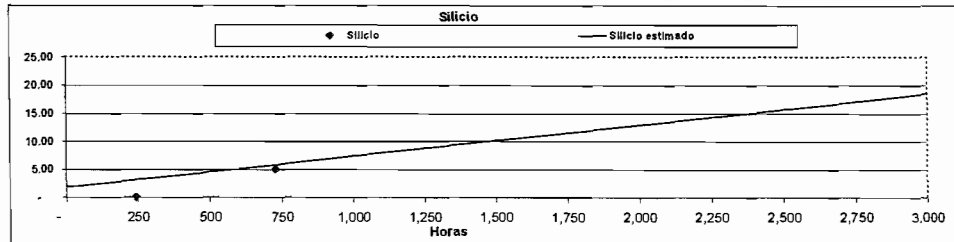
Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b  
 $37.303 = 5.946 \cdot 4.91 + b \cdot 4,673.748$   
 $b = \frac{37.303 - 29.204}{4,673.748} = 0.0055585$

El valor de a con el valor despejado de b es  
 $a = 4.91$

Ecuación del Silicio:  $Silicio = 4.91 + 0.0055585 \cdot \text{Horas de trabajo}$

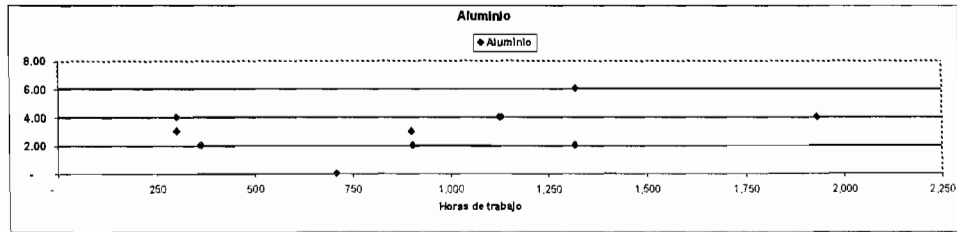
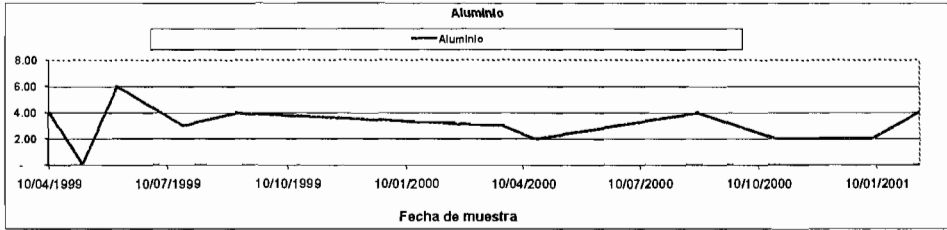
Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Silicio estimado	4.68	6.07	7.46	8.85	10.24	11.63	13.02	14.41	15.80	17.19	18.58

Horas	-	250	500	750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000	243	730
Silicio	-	-	-	5.00	6.00	4.00	5.00	13.00	7.00	8.00	-	-	6.00	-	-
Silicio estimado	1.90	3.28	4.68	6.07	7.46	8.85	10.24	11.63	13.02	14.41	15.80	17.19	18.58	-	5



**Aluminio**

Fecha de muestreo	12/02/2001	06/01/2001	24/10/2000	24/08/2000	19/06/2000	25/02/2000	31/09/1999	22/07/1999	01/06/1999	06/05/1999	10/04/1999
Horas	1.130	362	1.318	1.830	903	300	1.125	900	1.317	707	300
Aluminio	4.00	2.00	2.00	4.00	2.00	3.00	4.00	3.00	6.00	-	4.00
Máximo	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00



**Ajuste de la curva a partir del Método de los Mínimos Cuadrados**

$\sum y_i = an + b \sum x_i$   
 $\sum xy_i = a \sum x_i + b \sum x_i^2$

Tabla

Horas	1.130	362	1.318	1.830	903	300	1.125	900	1.317	707	300
Aluminio	4.00	2.00	2.00	4.00	2.00	3.00	4.00	3.00	6.00	-	4.00

$\sum x_i$ (Horas)	10.282.00										
$\sum y_i$ (Alu)	34.00										
$\sum x_i^2$ (Horas <sup>2</sup> )	12.175.340.00										
$\sum xy_i$	4.520	724	2.635	7.720	1.806	900	4.500	2.700	7.902	-	1.200
$\sum x_i y_i$	34.608.00										
Muestras	11										
$\sum y_i = an + b \sum x_i$ Ecuación 1	34 =	11 a +	10.282 b								
$\sum xy_i = a \sum x_i + b \sum x_i^2$ Ecuación 2	34.608 =	10.282 a +	12.175.340 b								

De la ecuación 1 despejamos la variable a  
 $a = \frac{3.09}{955.64} b$

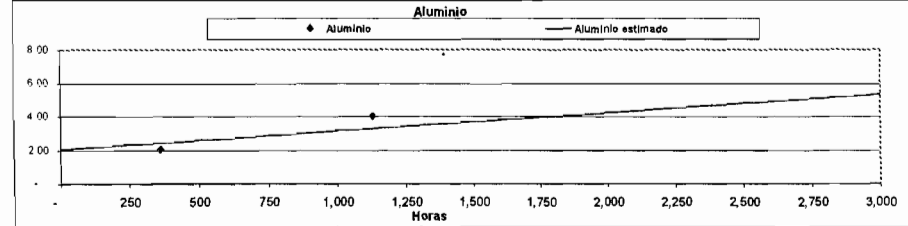
Al introducir la variable a en la ecuación 2, se despeja el valor b  
 $34.608 = \frac{10.282}{955.64} b + 12.175.340 b$   
 $2.545.770.55 b = 2796.3636$   
 $b = 0.00109844$

El valor de a con el valor despejado de b es  
 $a = 2.06$

Ecuación del Silico:  $Aluminio = 2.06 + 0.0010984 \text{ Horas de trabajo}$

Horas	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Aluminio estimado	2.61	2.89	3.16	3.44	3.71	3.99	4.26	4.53	4.81	5.08	5.35

Horas	-	250	500	750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	2.750	3.000	1.130	362
Aluminio					2.89	3.16	3.44	3.71	3.99	4.26	4.53	4.81	5.08	4	2
Aluminio estimado	2.06	2.34	2.61	2.89	3.16	3.44	3.71	3.99	4.26	4.53	4.81	5.08	5.35		



## **BIBLIOGRAFÍA**

1. SHELL AUSTRALIA, Shell Care Operator's Guide, 2004
2. FITCH JAMES C., Guía de Procedencia de Elementos para Aceite Usado, Noria Latin America, Traducción Trujillo C. Gerardo, 2002
3. SHELL UK., General Guidelines for the Assessment of Oil Analyses, Shell Services
4. MOBIL, Condition Monitoring for Marine Equipment, Mobil International Aviation and Marine Seals Inc., 1995
5. BENLLOCH JOSÉ MARÍA, Los Lubricantes Características, Propiedades y Aplicaciones, Ediciones CEAC, Abril 1990
6. ING. VARGAS ZUÑIGA ANGEL, Curso de Motores Diesel Marinos, Publicación realizada en la Imprenta de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1977

7. SHELL ESPAÑA S.A., Curso Lubricantes Motor, Servicio de Asistencia de Lubricantes, Octubre 1991
8. ING. VARGAS ZÚÑIGA ANGEL, Organización del Mantenimiento Industrial, Editorial VZ, 1985
9. ECHEVARRIA, Libro motor tipo 16V23L, 1980
10. MOBIL, Lubes ELTP Introduction to lubes Marketing, Latin America Training Center, 1997
11. MOBIL, Lubes ELTP Industrial Course, Latin America Training Center, 1997
12. MILLER IRWIN R. / FREUND JOHN E. / JOHNSON RICHARD, Probabilidad y Estadística para Ingenieros, Printice – Hill Hispanoamericana S.A., 1992, Traducción Ing. González Pozo Virgilio