

**Tesis Doctoral.**

**CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO Y MEJORA  
DE TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN Y  
ANÁLISIS DE PARTÍCULAS METÁLICAS Y  
CONTAMINANTES EN ACEITES  
LUBRICANTES USADOS.**

*Presentada por:*

LINO MONTORO MORENO

*en el*

DEPARTAMENTO DE  
MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

*de la*

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

*Para la obtención del grado de*

DOCTOR INGENIERO QUÍMICO.

*Valencia, Febrero de 2005.*

## Índice de la tesis:

<b>1. Introducción.</b>	<b>1.</b>
1.1. Antecedentes Históricos.	3.
1.2. Objeto y Alcance de la Tesis.	5.
1.3. Metodología Seguida en la Tesis.	5.
1.4. Estructura de la Tesis Doctoral.	8.
1.5. Referencias Bibliográficas.	9.
<b>2. Diagnóstico de Equipos a Partir del Análisis del Aceite.</b>	<b>10.</b>
<b>2.1. Introducción.</b>	<b>12.</b>
<b>2.2. Mantenimiento de Equipos Lubricados.</b>	<b>12.</b>
2.2.1. Mantenimiento Correctivo.	12.
2.2.2. Mantenimiento Preventivo o Sistemático.	13.
2.2.3. Mantenimiento Predictivo.	13.
2.2.4. Mantenimiento Modificativo.	13.
2.2.5. Mantenimiento Productivo Total (TPM).	14.
2.2.6. Mantenimiento Proactivo.	14.
2.2.7. Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM).	14.
2.2.8. Mantenimiento Asistido por Ordenador (MAO).	15.
<b>2.3. Los Aceites Lubricantes.</b>	<b>16.</b>
2.3.1. Definición.	16.
2.3.2. Aceites Base.	16.
2.3.3. Aditivos.	18.
<b>2.4. Determinación de la Degradación del Lubricante.</b>	<b>20.</b>
2.4.1. Viscosidad.	20.
2.4.2. Densidad.	23.
2.4.3. Punto de Inflamación.	24.
2.4.4. Detergencia.	26.
2.4.5. Color.	26.
2.4.6. Espumación.	27.
2.4.7. Demulsibilidad.	27.
2.4.8. Oxidación del Aceite, RBOT y TAN.	28.

2.4.9.	Reserva Alcalina, TBN.	28.
2.4.10.	Espectrometría Infrarroja.	30.
<b>2.5.</b>	<b>Determinación de la Contaminación del Lubricante.</b>	<b>30.</b>
2.5.1.	Presencia de Agua.	30.
2.5.2.	Dilución por Combustible.	31.
2.5.3.	Contenido de Insolubles y Materia Carbonosa.	32.
2.5.4.	Niveles de Nitración y Oxidación.	33.
2.5.5.	Presencia de Glicoles.	33.
2.5.6.	Mezcla de Lubricantes.	34.
<b>2.6.</b>	<b>Estudio del Proceso de Toma de Muestras.</b>	<b>34.</b>
2.6.1.	Condiciones de Muestreo.	35.
2.6.2.	Volumen de Muestra.	37.
2.6.3.	Características de los Recipientes.	38.
2.6.4.	Dispositivos de Toma de Muestras.	38.
<b>2.7.</b>	<b>Referencias Bibliográficas.</b>	<b>40.</b>
<b>3.</b>	<b>Técnicas de Análisis de Metales en Aceites Lubricantes</b>	<b>41.</b>
<b>3.1.</b>	<b>Introducción.</b>	<b>43.</b>
<b>3.2.</b>	<b>El Desgaste Mecánico.</b>	<b>43.</b>
3.2.1.	Desgaste por Abrasión.	44.
3.2.2.	Desgaste por Adhesión.	46.
3.2.3.	Desgaste por Corrosión.	48.
3.2.4.	Desgaste por Erosión.	49.
3.2.5.	Desgaste por Fatiga.	50.
3.2.6.	Desgaste por Cavitación.	51.
3.2.7.	Desgaste por Vibración.	52.
3.2.8.	Desgaste de Origen Eléctrico.	53.
<b>3.3.</b>	<b>Tipos de Partículas de Desgaste.</b>	<b>54.</b>
3.3.1.	Partículas de Desgaste Normal.	54.
3.3.2.	Partículas de Deslizamiento.	54.
3.3.3.	Partículas de Corte.	55.
3.3.4.	Partículas de Fatiga.	56.
3.3.5.	Óxidos Ferrosos.	57.

3.3.6.	Polvo Ambiental.	59.
3.3.7.	Fibras.	60.
3.3.8.	Polímeros de Fricción.	61.
3.3.9.	Otros Contaminantes.	61.
<b>3.4.</b>	<b>Técnicas de Evaluación Cualitativa de Metales.</b>	<b>62.</b>
3.4.1.	Ferrografía de Lectura Directa.	63.
3.4.2.	Ferrografía Analítica.	64.
3.4.3.	Contadores de Partículas.	67.
3.4.4.	Detectores de Partículas.	68.
<b>3.5.</b>	<b>Técnicas de Medida Cuantitativa de Metales.</b>	<b>69.</b>
3.5.1.	Espectrometría de Absorción de Masas.	69.
3.5.2.	Espectrometría de Emisión.	70.
3.5.3.	Fluorescencia de Rayos X.	71.
<b>3.6.</b>	<b>Referencias Bibliográficas.</b>	<b>72.</b>
<b>4.</b>	<b>Revisión de la Ferrografía Analítica.</b>	<b>73.</b>
4.1.	Introducción.	75.
4.2.	Método combinado de Separación de Partículas.	75.
4.2.1.	Objetivo.	75.
4.2.2.	Descripción del Montaje.	76.
4.2.3.	Proceso Operativo.	76.
4.2.4.	Ventajas del Método Propuesto.	79.
4.3.	Observación mediante Microscopía Óptica.	79.
4.3.1.	Tratamiento Térmico.	79.
4.3.2.	Transparentado de la Membrana.	82.
4.3.3.	Fijado de las Muestras.	82.
4.3.4.	Técnicas de Observación.	83.
4.3.5.	Metodología General de Análisis.	86.
4.4.	Observación Mediante Microscopía Electrónica.	86.
4.4.1.	Preparación Previa de las Muestras.	87.
4.4.2.	Metodología del análisis.	87.
4.5.	Valoración de las Muestras.	87.
4.5.1.	Análisis Sistemático.	87.

4.5.2.	Criterios de Valoración.	88.
4.5.3.	Realización del Informe de Evaluación.	92.
<b>4.6.</b>	<b>Análisis Informático de Imágenes.</b>	<b>96.</b>
4.6.1.	Adquisición	96.
4.6.2.	Tratamiento.	96.
4.6.3.	Evaluación.	98.
4.6.4.	Limitaciones de la Técnica.	100.
<b>4.7.</b>	<b>Referencias Bibliográficas.</b>	<b>102.</b>
<b>5.</b>	<b>Revisión de la Espectrometría de Emisión de Plasma.</b>	<b>103</b>
<b>5.1.</b>	<b>Introducción</b>	<b>105</b>
<b>5.2.</b>	<b>Descripción del Espectrómetro.</b>	<b>105</b>
5.2.1.	Sistema de Alimentación de Gas.	106
5.2.2.	Generador de Radiofrecuencias.	106
5.2.3.	El Plasma.	107
5.2.4.	Sistema de Introducción de Muestras.	108
5.2.5.	Sistema Óptico.	109
5.2.6.	Sistema de Detección y Tratamiento de la Señal.	109
5.2.7.	Modo de Trabajo del Espectrómetro.	110
<b>5.3.</b>	<b>Métodos de Preparación Previa de las Muestras.</b>	<b>111.</b>
5.3.1.	Mezcla con Disolventes Orgánicos.	111.
5.3.2.	Mineralización.	111.
5.3.3.	Ataque Ácido.	111.
5.3.4.	Empleo de Emulsiones.	112.
<b>5.4.</b>	<b>Descripción de los Ensayos Realizados.</b>	<b>112.</b>
5.4.1.	Selección del Proceso.	112.
5.4.2.	Validación. Ataque Directo del Metal.	114.
5.4.3.	Validación. Ataque del Metal en Aceite Nuevo.	116.
5.4.4.	Validación. Ataque del Metal en Aceite Usado.	117.
5.4.5.	Conclusiones.	120.
<b>5.5.</b>	<b>Referencias Bibliográficas.</b>	<b>122.</b>
<b>6.</b>	<b>Validación Experimental.</b>	<b>123</b>

6.1. Introducción.	125
6.2. Resultados para Aceites Hidráulicos.	126
6.3. Resultados para Aceites de Transmisiones.	130
6.4. Resultados para Aceites de Cáster.	135
<b>7. Conclusiones.</b>	<b>149.</b>
7.1. Introducción.	151.
7.2. Proceso de Muestreo.	151.
7.3. Análisis Espectrométrico de Metales.	151.
7.4. Ferrografía Combinada.	152.
7.5. Método de Medida de Metales Propuesto.	153.
<b>8. Trabajos Futuros.</b>	<b>154.</b>
<b>Anexos.</b>	<b>156.</b>
A. Tablas de datos.	156.
B. Ensayos. Análisis de Imágenes.	163.
C. Hojas de Resultados de los Análisis de Aceite.	174.
D. Análisis de Partículas en Gasóleo.	211.