

**ENGINE PREDICTIVE MAINTENANCE THRU OIL ANALISYS****MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE MOTORES MEDIANTE ANALISIS DE  
ACEITE**

**PhD. Simón J. Fygueroa Salgado, MSc. Juan C. Serrano Rico  
MSc. Gonzalo G. Moreno Contreras**

**Universidad de Pamplona**, Facultad de Ingenierías y Arquitectura  
Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.  
Tel.: 57-7-5685303 Ext. 164  
E-mail: {sjfigueroa, jcserrano}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** One of the most important tools to predict diesel engine failures in predictive maintenance is oil analysis because it provides a wealth of information used to diagnose symptoms such as internal engine wear and oil state. In present article we will describe some of the oil analysis methods and techniques actually most commonly used. There will be a special mention to rapid and inexpensive ones such as oil blot, dielectric constant, oil crepitation, and so on. Methods that from a practical and economical viewpoint must be used by workshop heads and maintenance staff. It will also refer to the engine symptoms that can be detected with different analysis and lay down guidelines for evaluation.

**Resumen:** En el mantenimiento predictivo de motores Diesel, una de las herramientas más importantes para predecir fallas la constituye el análisis del aceite, que suministra numerosa información que se puede utilizar como sintomatología para diagnosticar el desgaste interno del motor y el estado de su lubricante. En el presente trabajo se expondrán algunos de los diferentes métodos y técnicas de análisis del aceite que más se utilizan en la actualidad. Se hará especial mención de los métodos rápidos y de bajo costo tales como la mancha, la medición de la constante dieléctrica, la crepitación del aceite, etc. que desde el punto de vista práctico y económico es conveniente que sean utilizados por Jefes de Taller y personal de mantenimiento. Se hará además referencia a los síntomas del motor que se pueden detectar con los diferentes análisis y se fijarán pautas para su evaluación.

**Keywords:** Predictive maintenance, fault diagnosis, oil analysis, internal combustion engines.

**1. INTRODUCCION**

Las principales técnicas modernas de mantenimiento predictivo actualmente empleadas son:

- Monitorizado del comportamiento.
- Análisis de vibraciones.
- Análisis del aceite.

Por ser el motor de combustión interna alternativo una máquina compleja, no es posible el seguimiento de su estado con el monitorizado de uno o pocos síntomas como sucede con otras máquinas y puesto que el análisis de vibraciones solo es adecuado para el diagnóstico de maquinaria rotativa; el análisis del aceite representa la técnica

que brinda más posibilidades como herramienta potente para el mantenimiento predictivo de motores, ya que permite conocer no solo su propio estado sino además, el funcionamiento de los diferentes sistemas e incluso el desgaste progresivo del motor (Macián et al., 2000).

## 2. EL ANALISIS DEL ACEITE

El aceite se puede utilizar con fines de diagnóstico ya que en cumplimiento de una de sus funciones, es el medio de evacuación de todas las impurezas que recoge o se forman en él. El análisis del aceite usado consiste en tomar muestras cada cierto periodo de tiempo de funcionamiento del motor, generalmente coincidiendo con el cambio de aceite, y posteriormente evaluarlas para determinar tanto el estado del motor como el de su lubricante (Martínez, 2002).

El estado del motor se detecta principalmente estableciendo el grado de contaminación del aceite debido a la presencia de partículas de desgaste o sustancias ajenas a este. El estado del aceite se detecta determinando la degradación que ha sufrido, es decir, la pérdida de capacidad de lubricar causada por una variación de sus propiedades físicas y químicas y de las de sus aditivos (Schilling, 1965).

La contaminación del aceite se puede determinar cuantificando en una muestra del lubricante, el contenido de:

- Partículas metálicas de desgaste
- Combustible
- Agua
- Materias carbonosas
- Insolubles

La degradación se puede evaluar midiendo las siguientes propiedades del aceite:

- Viscosidad
- Detergencia
- Basicidad
- Constante dieléctrica

Es conveniente hacer notar que la contaminación y la degradación no son fenómenos independientes, ya que la contaminación es causante de degradación y esta última puede propiciar un aumento de la contaminación.

## 3. TECNICAS DE ANALISIS DEL ACEITE

Se han desarrollado diversos métodos y técnicas de análisis del aceite que se pueden emplear para fines de diagnóstico y predicción de averías en motores; a continuación se hará referencia a las más utilizadas.

### 3.1. Para identificar y cuantificar el contenido de partículas de desgaste

Existe una amplia gama de procedimientos empleados con esta finalidad, de los cuales se considerarán solo los siguientes:

- Espectrometría
- Ferrografía
- Técnicas complementarias

#### 3.1.1. Espectrometría

La espectrometría suministra un análisis cuantitativo elemental de las partículas de desgaste presentes en el lubricante; para esta finalidad se utilizan dos tipos de espectrómetros:

- Espectrómetros de emisión
- Espectrómetros de absorción

Los **espectrómetros de emisión** utilizan la propiedad de los átomos que al ser excitados emiten una radiación que es función de su configuración electrónica y que está compuesta por longitudes de onda características; razón por la cual, elementos diferentes emiten radiaciones diferentes. Con esta técnica se analizan las muestras tal como se reciben por lo que se utiliza en laboratorios con grandes volúmenes de trabajo, proporcionando resultados simultáneamente de muchos elementos en menos de un minuto.

Los **espectrómetros de absorción atómica** aprovechan la propiedad que la cantidad de luz monocromática absorbida por los átomos de un elemento excitado es proporcional a su concentración. Esta técnica relativamente simple y de bajo costo solo se usa con pequeños volúmenes de trabajo debido a su capacidad de análisis mono elemental y a que se debe diluir la muestra.

En análisis de aceites usados, actualmente se utiliza cada vez con más frecuencia el **espectrómetro de emisión con fuente de plasma acoplada por inducción** que emplea la técnica más moderna de excitación de la muestra de aceite, consistente en que Argón que fluye por un tubo de cuarzo al ser sometido a un campo eléctrico de alta frecuencia

que genera un campo magnético oscilante, forma un plasma que se halla a una temperatura del orden de 10000 K que disocia, atomiza y excita la muestra que se inyecta en el centro del tubo de cuarzo. Este método de ensayo polielemental que posee una excelente repetitividad, precisión y límites de detección presenta la desventaja de no detectar partículas de tamaño superior a 5  $\mu\text{m}$  (Montoro, 2004). Los resultados que se obtienen de los análisis espectrométricos son las concentraciones en ppm (partes por millón o mg/l) de los diferentes metales presentes en una muestra de aceite usado.

### 3.1.2. Ferrografía

La ferrografía es una técnica de análisis en la cual se pasa una muestra diluida sobre una placa de cristal inclinada, especialmente preparada y sometida a un elevado campo magnético que retiene las partículas que permanecerán adheridas a la placa una vez que se evapore el disolvente.

Las fuerzas que actúan sobre las partículas magnéticas hacen que estas se alineen en tiras en las que las partículas grandes se depositan donde la muestra toca por primera vez la placa y las pequeñas a una distancia inversamente proporcional a su tamaño (González, 2008), esta distribución se conoce como ferrograma. Las partículas poco magnéticas no se alinean en tiras, sino que se depositan al azar a lo largo del ferrograma permitiendo una rápida distinción entre partículas férricas y no férricas. Calentando el ferrograma se puede distinguir entre fundición de hierro, acero de alta y baja aleación, diferentes metales no ferrosos y materiales orgánicos e inorgánicos.

El tipo de desgaste se deduce de la forma, tamaño y características superficiales de las partículas, por lo que se necesita experiencia y entrenamiento para analizar efectivamente un ferrograma. En investigaciones especiales, el ferrograma se puede examinar con un microscopio electrónico pudiéndose realizar hasta un análisis elemental de partículas individuales con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X.

La ferrografía proporciona muy buenos datos cualitativos sobre la morfología de las partículas, es excelente para detectar un amplio espectro de tamaños de desgaste (entre 2 y 20  $\mu\text{m}$ ) pero es muy lenta, sólo se puede usar con partículas magnéticas o paramagnéticas, tiene poca sensibilidad de detección de partículas pequeñas y su repetitividad es escasa.

### 3.1.3. Técnicas complementarias

Estas técnicas se usan para detectar partículas de desgaste grandes que normalmente se encuentran en filtros y depósitos de lubricante y que por su tamaño tienden a asentarse y no aparecen en la muestra.

El **conteo de partículas** suministra la distribución del tamaño de las partículas en categorías de tamaños especificados; el número de categorías y su amplitud dependen del equipo empleado y de su calibración. Los contadores emplean la dispersión o el bloqueo de un haz de láser para efectuar las mediciones; las partículas pasan lentamente por un volumen sensor donde son iluminadas por un rayo láser que produce en un fotodiodo un pico de corriente de altura proporcional al tamaño de la partícula; un sistema electrónico separa las señales en categorías. Los contadores de partículas no se usan para medir partículas de desgaste porque no distinguen sus diferentes tipos y son muy sensibles al manejo y preparación de la muestra.

Los **colectores magnéticos** seleccionan por atracción las partículas magnéticas por encima de un tamaño determinado, pero no las clasifican posteriormente. Esta técnica no es útil para determinar un desgaste anormal incipiente.

La **microscopía** es la inspección con un microscopio de las partículas recogidas en colectores magnéticos, depósitos de aceite o filtros; es una técnica lenta pero relativamente económica.

## 3.2. Para cuantificar otros contaminantes

### 3.2.1. Dilución con combustible

La presencia de combustible en el aceite disminuye la temperatura de inflamación del segundo, por lo que su medición se usa para detectar la dilución.

En la evaluación del punto de inflamación de aceites usados se suele utilizar el método del matraz abierto Cleveland, según la norma ASTM D92. El método de medición consiste en llenar el matraz de prueba con la muestra, calentar a una tasa constante y pasar durante un segundo a intervalos especificados de temperatura una pequeña llama de prueba sobre la superficie de la muestra; la mínima temperatura a la cual sus vapores se inflaman, constituye la temperatura de inflamación.

### 3.2.2. Dilución con agua

La presencia de agua en el aceite se puede determinar por varios métodos; el más sencillo para cantidades superiores a 0.05% es el de la crepitación, que consiste en dejar caer una gota sobre una plancha metálica a 200 °C y escuchar si se produce crepitación, la intensidad del ruido producido es indicativa de la cantidad de agua contaminante. Hay otros métodos rápidos de detección como el polvo Hidrokit y el papel Watesmo, utilizados por los minilaboratorios contenidos en maletas portátiles (Tormos, 2005). En grandes laboratorios se utiliza el método del reactivo Karl Fischer que permite detectar concentraciones entre 0.005% y 0.1%.

### 3.2.3 Contenido de materias carbonosas

Las materias carbonosas del aceite se evalúan cualitativamente con el ensayo denominado de la mancha de aceite que fue desarrollado por el Instituto Francés del Petróleo y consiste en depositar una gota de aceite usado sobre un papel de filtro especial (o de alta porosidad) y observarlo al cabo de varias horas. Es indudablemente el método más recomendable para el seguimiento de aceites usados, ya que su bajo costo y la información que ofrece lo hacen irremplazable.

La mancha que se forma presenta tres zonas concéntricas:

- La parte central, cuya opacidad caracteriza el contenido de carbón está rodeada de una aureola donde se depositan las partículas más pesadas.
- La zona intermedia o de difusión, más o menos oscura, que caracteriza con su extensión el poder dispersante que posee el aceite.
- La zona exterior o translúcida, que no tiene materias carbonosas y es donde llegan las fracciones más volátiles del aceite. Una extensión exagerada puede deberse a la presencia de combustible.

Para cada aceite se recomienda hacer dos manchas, una a 20 °C y otra a 200 °C, comprobando el estado del aceite (dispersividad y detergencia) en ambas condiciones.

### 3.2.4. Contenido de insolubles

Los insolubles se miden con métodos de laboratorio basados en la sucesiva insolubilidad en disolventes como el heptano, el pentano y el

tolueno, de los productos de degradación del aceite (lacas, barnices y lodos). La parte insoluble se separa por filtrado o centrifugado (ASTM D893), el peso del precipitado representa los insolubles en el correspondiente disolvente.

### 3.3. Viscosidad

La determinación de la viscosidad se puede hacer con los siguientes métodos:

- Midiendo el tiempo de escurrimiento del aceite a través de un capilar (viscosímetro Ostwald) o a través de un pequeño tubo u orificio (viscosímetros Saybolt, Redwood y Engler)
- Midiendo el efecto de cizallamiento producido en el aceite contenido entre dos superficies en movimiento relativo (viscosímetro de Mac Michel)
- Midiendo el tiempo de desplazamiento de un sólido a través del aceite (viscosímetro de bolas)

Los dos primeros métodos son muy lentos y se usan en laboratorio, el último es el más adecuado para ensayos de campo por su facilidad de construcción, transporte y manejo ya que solo se debe medir el tiempo que tarda una bola en caer de un extremo a otro de un tubo lleno de aceite y convertirlo a unidades de viscosidad auxiliándose de un gráfico.

### 3.4. Detergencia

El método más utilizado para la evaluación de la detergencia por su rapidez y sencillez es el de la mancha de aceite; cuando un lubricante posee una buena detergencia la zona de difusión de la mancha es bastante extensa, y va disminuyendo a medida que pierde su poder detergente, desapareciendo cuando la detergencia está por agotarse.

### 3.5. Basicidad

Se evalúa con el número de basicidad total (TBN) que solamente se puede determinar en laboratorio como se describe en las normas ASTM D664 y D2896; la primera usa el método de titulación potenciométrica con ácido clorhídrico y la segunda el de titulación potenciométrica con ácido perclórico.

### 3.6. Constante dieléctrica

Existen en el comercio equipos portátiles destinados al uso en taller que utilizan la medición, con sensores capacitivos, de la variación de la

constante dieléctrica del aceite usado con respecto al aceite nuevo para detectar la magnitud de su degradación.

#### 4. EVALUACIÓN DE SÍNTOMAS

A continuación se expondrá como se pueden evaluar los distintos síntomas obtenidos con los análisis del aceite para diagnosticar las posibles fallas del motor.

##### 4.1. Contaminantes metálicos

Las concentraciones metálicas del aceite son sintomáticas del desgaste del motor; en la Tabla 1 se presenta el posible origen de las diferentes partículas del aceite.

##### 4.2. Dilución con combustible

La presencia de combustible en el aceite puede deberse a inyectores defectuosos, fugas en uniones, bomba de inyección fuera de punto o conducción inadecuada. Una dilución del 5% de ACPM o del 3% de gasolina o una reducción de 30 °C en la temperatura de inflamación pueden considerarse alarmantes desde este punto de vista.

*Tabla 1. Origen de las partículas metálicas*

Elemento	Origen
Hierro	Camisas de cilindros, anillos, muñones de biela y bancada, guías y asientos de válvulas, árbol de levas, mecanismo de accionamiento de válvulas
Níquel	Mecanismo de accionamiento de válvulas, camisas de cilindros
Cromo	Camisas cromadas, anillos
Aluminio	Pistón, cojinetes de biela y bancada
Cobre	Cojinetes de biela y bancada, cojinetes del bulón o pie de biela, cojinetes del árbol de levas, cojinetes de accesorios, tubos de enfriadores de aceite, radiadores
Plomo	Cojinetes de biela y bancada, cojinetes del bulón o pie de biela, cojinetes del árbol de levas
Estaño	Cojinetes de biela y bancada, cojinetes del árbol de levas
Silicio	Algunas camisas de fundición

##### 4.3. Dilución con agua

El agua en el aceite puede provenir del sistema de refrigeración, de condensación de los gases de escape o ingresar al efectuar añadidos de aceite. Cuando su origen es el sistema de refrigeración, puede deberse a grietas en la culata, junta de culata defectuosa o desperfecto del enfriador de aceite. Como regla general puede decirse que el contenido de humedad del aceite no debe superar un 0.5%.

##### 4.4. Contenido de materias carbonosas

Las materias carbonosas detectadas en el aceite son síntoma de mala combustión debida a riqueza inadecuada de la mezcla, funcionamiento continuado del motor frío, barrido defectuoso o pérdida de compresión. El contenido de sustancias carbonosas no debe sobrepasar el 2%.

##### 4.5. Contenido de insolubles

La presencia de insolubles en el aceite es principalmente, síntoma de degradación por oxidación que a su vez puede deberse a causas como recalentamiento, soplado excesivo, etc. Como norma general, puede establecerse que no deben sobrepasar el 3%.

##### 4.6. Viscosidad

La viscosidad de un aceite usado puede aumentar debido a su degradación (insolubles, agua, oxidación) o puede disminuir por la dilución con combustible. Los valores límites de variación de la viscosidad a 100 °C pueden establecerse en 30% o en un grado SAE.

##### 4.7. Basicidad

La basicidad del aceite permite neutralizar los productos ácidos de la combustión que pueden atacar las piezas lubricadas; por esta razón, la pérdida de reserva alcalina es uno de los síntomas más utilizados para determinar la degradación del aceite y el período de cambio óptimo; en ningún caso el TBN de un aceite usado puede ser menor del 50% del correspondiente al aceite nuevo.

##### 4.8. Constante dieléctrica

La constante dieléctrica es indicadora de la contaminación del lubricante; la contaminación normal por oxidación, materia carbonosa, etc. produce un aumento moderado de ésta; mientras que la contaminación con agua y partículas metálicas la aumentan excesivamente y la presencia de combustible la disminuye.

Los valores críticos dependen del instrumento utilizado; en flotas de vehículos (Fygueroa, 1995) con el más conocido de ellos, 4 corresponde al nivel de alerta y 6 al de alarma.

### 5. CONCLUSIONES

De la serie de técnicas de análisis presentadas, debido a los importantes síntomas que miden, a su facilidad de aplicación, versatilidad y economía, se recomiendan:

- El método de crepitación para detectar la dilución con agua
- El método de la mancha de aceite para evaluar el contenido de materias carbonosas y la detergencia
- Los instrumentos que miden la constante dieléctrica para detectar la contaminación del lubricante y determinar el momento de cambio del aceite.
- Se han presentado una serie de síntomas que permiten el control exhaustivo del motor y se han dado sus valores críticos.

### REFERENCIAS

- Fygueroa, S. (1995). *Diagnóstico del desgaste y el estado de motores de encendido por compresión*. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. España.
- González F. (2008). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Fundación Confemetal. España
- Macián, V; Tormos, B y Lerma M. (2000). Evaluation of metallic elements into oil for an engines fault diagnosis system. XII International Tribology Colloquium 2000. Stuttgart/Ostfildern, Germany.
- Martínez, F. (2002). *La tribología: Ciencia y técnica para el mantenimiento*. Editorial Limusa. México.
- Montoro, L. (2004). *Contribución al desarrollo y mejora de técnicas para la detección y análisis de partículas metálicas y contaminantes en aceites lubricantes usados*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Pocock, G y Courtney, S. (1981). Some quantitative aspects of ferrography. *Wear*, 67.USA.
- Schilling, A. (1965). *Los aceites para motores y la lubricación de los motores*. Interciencia. Madrid. España.
- Tormos, B. (2005). *Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado*. Temas avanzados en motores de combustión interna.: Editorial Reverté. Barcelona. España.