

# Análisis Programado de Desgaste

Joaquín Boilet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gildemeister S.A.C., Santiago, Chile

## 1. Introducción

¿Cómo lograr reducir los altos costos de las reparaciones? ¿Cómo aumentar la disponibilidad de los equipos? ¿Cómo obtener costos de operaciones más bajos?

La mejor respuesta a estas interesantes preguntas es: “Las reparaciones Programadas”. Para llegar a planificar las reparaciones se deben efectuar acciones y controles básicos, tales como:

- ❖ Mantenimiento preventivo.
- ❖ Análisis continuos del estado de los equipos.
- ❖ Mantener registro histórico de reparaciones realizadas en los equipos.

Para cuantificar la importancia de las reparaciones programadas podemos comparar los costos de las reparaciones antes y después que ha sucedido una falla.

Nuestra Empresa de acuerdo a su experiencia, ha determinado que el costo de una reparación de motor efectuada antes de acaecida una falla es del orden de un 5 a un 25% del costo de un motor nuevo.

Las reparaciones del motor realizadas después de ocurrida una falla puede alcanzar un costo superior a un 65% del valor de un motor nuevo.

Al efectuarse una reparación antes de que suceda la falla y si las condiciones generales del equipo son buenas, el costo de esta intervención será muy bajo al igual que el tiempo de reparación. Pero para lograr esto, el problema debe ser detectado a tiempo mediante un adecuado mantenimiento preventivo; con el fin de evitar el cambio del componente (motor, transmisión, etc.) producto del grave daño causado por una falla no detectada a tiempo.

Debido a todo esto, es que la detección de fallas antes de que sucedan, es fundamental en la reducción de costos de reparaciones y en el aumento de la disponibilidad de los equipos, lo cual redunda en la reducción de los costos de operación.

En la actualidad existen muchos programas que tienen como objetivo ayudar a la detección de fallas con antelación a que ocurran y nuestra empresa está utilizando el Análisis Programado de Desgaste (APD) que cuenta con el respaldo y experiencia Caterpillar Américas Co.

Nuestro sistema está basado en los principios y técnicas de la Espectrofotometría por Absorción Atómica.

## **2. Análisis Programado de Desgaste**

### **2.1. Objetivo**

El Análisis Programado de Desgaste, A.P.D., es un programa que mediante el análisis periódico de aceite detecta tendencias de desgaste de los elementos lubricados en baños de aceite, permitiéndoles a los usuarios la detección de fallas antes de que ocurran, lo cual les otorga los siguientes beneficios:

- ❖ Reducir los costos de operación.
- ❖ Evitar que se produzcan fallas graves.
- ❖ Reducir los tiempos de detección por fallas.
- ❖ Disminuir los costos de operación.
- ❖ Aumentar la disponibilidad del equipo.
- ❖ Programar las reparaciones.
- ❖ Ayudar al personal de mantención del cliente.

Nuestro programa APD está dirigido a los usuarios de equipos Caterpillar, como un programa de apoyo al producto y que mantiene al día las informaciones referentes a patrones de desgaste y guías de interpretación por parte de la fábrica Caterpillar.

### **2.2. Descripción**

El análisis para los lubricantes para fines de mantenimiento de maquinaria pesada se ha venido efectuando desde hace varias décadas por las compañías petroleras para proteger sus productos y por laboratorios privados a fin de dar servicio a usuarios particulares de maquinaria pesada.

Se ha enfatizado mucho que con estos análisis se ha logrado un aumento en los períodos de los cambios de lubricantes y una mejor protección de las maquinarias por medio de lubricantes de mejor calidad.

Sin embargo nada o muy poco se ha averiguado sobre la condición de las maquinarias al analizar los lubricantes.

Con el análisis espectrofotométrico de los lubricantes por el contrario al análisis tradicional, se determina en primera instancia la condición del componente lubricado, basándose en el contenido de partículas de desgaste y partículas provenientes de contaminadores externos contenidos en el lubricante.

Para encontrar y cuantificar estas partículas depositadas en el lubricante es que se utiliza la espectrofotometría de absorción atómica. Los resultados que se obtienen de esta

forma son muy exactos y permiten establecer patrones de desgaste de los cuales se comparan las muestras obtenidas desde máquinas y equipos en operación y se evalúa el grado de desgaste de los componentes.

Estos análisis efectuados periódicamente en forma paralela a los cambios de aceite o en períodos correspondientes a concentraciones consideradas límites, permiten verificar la condición de desgaste de una máquina y lo que es más importante diagnosticar la tendencia de los desgastes permitiendo planificar las futuras acciones de mantenimiento o reparaciones antes que se transformen en grandes problemas.

### **3. Teoría Básica de la Espectrofotometría de Absorción Atómica**

La Teoría Básica de la Espectrofotometría de Absorción Atómica se puede estudiar mejor, desarrollando los siguientes puntos:

#### **3.1. Transición Del Estado de los Átomos**

Básicamente un átomo está compuesto de un núcleo en el cual se encuentran las cargas positivas denominadas protones y por cargas negativas denominadas electrones que se encuentran girando en órbita alrededor del núcleo. Los electrones distanciados entre sí, forman diferentes capas o niveles de energía, teniendo cada capa un determinado número de electrones.

Cada elemento tiene un número específico de electrones, los cuales se asocian con el núcleo atómico en una estructura, que es única para cada elemento.

Los electrones ocupan posiciones orbitales en forma predecibles y ordenada. La configuración más estable y de más bajo contenido energético, es conocida como "Estado Fundamental" y es la configuración normal para el átomo.

Si a un átomo se aplica energía de una magnitud apropiada, esta será absorbida por él e inducirá que el electrón exterior sea promovido a un orbital menos estable o "Estado Excitado". Como este estado es inestable, el átomo inmediatamente y espontáneamente retorna a su configuración fundamental. El electrón por lo tanto retornará a su órbita inicial estable y emitirá energía radiante equivalente a la cantidad de energía inicialmente absorbida en el procesos de excitación. Ver figura 1.

La longitud de onda de la energía luminosa emitida está directamente relacionada a la transición electrónica que se ha producido, puesto que un elemento dado tiene una estructura electrónica única que lo caracteriza; la longitud de onda de la luz emitida es una propiedad específica y característica de cada elemento.

El proceso de excitación y retorno al estado fundamental es común en los tres campos de la espectroscopía atómica. Por esta razón, ya sea la energía adsorbida en el proceso de excitación o la emitida en el proceso de retorno, puede ser medida y usada para propósitos analíticos.

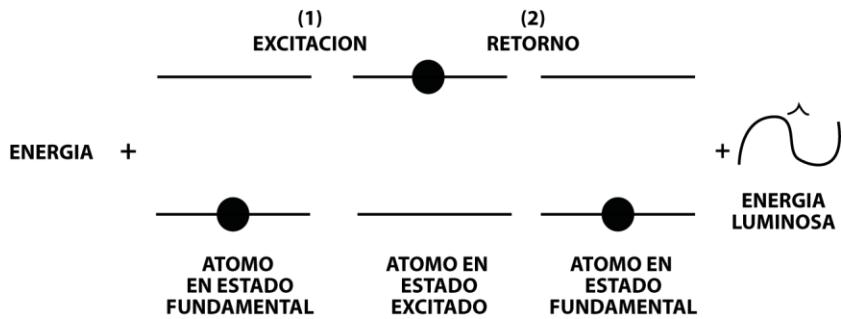


Fig.1. Proceso de excitación y retorno de Átomos.

En la emisión atómica, la muestra sometida de una alta energía y temperatura, con el objetivo de producir átomos al estado excitado, capaces de emitir luz. La fuente de energía puede ser un arco eléctrico o una llama.

El espectro de emisión de un elemento expuesto a una de estas fuentes de energía, consiste en una colección de bandas correspondientes a las longitudes de onda permitidas, comúnmente llamadas líneas de emisión, a causa de la naturaleza discreta de las longitudes de onda emitidas.

Este espectro de emisión puede usarse como una característica única para la identificación cuantitativa del elemento. La emisión atómica utilizando un arco eléctrico, ha sido ampliamente empleada en análisis cualitativos.

Las técnicas de emisión también pueden usarse para determinar “cuanto” de un elemento está presente en una muestra.

Para un análisis “cuantitativo” se mide la intensidad de la luz emitida a la longitud de onda del elemento por determinarse.

La intensidad de la emisión a esta longitud de onda será cada vez más alta conforme se incremente el número de átomos del análisis. La técnica de “fotometría de llama” es una aplicación de la emisión atómica en el análisis cuantitativo.

Si luz de una determinada longitud de onda incide sobre un átomo libre en estado fundamental, el átomo puede absorber energía y pasa al estado excitado, en un proceso conocido como absorción atómica.

Este proceso está ilustrado en la figura 2. La luz que es la fuente de la excitación del átomo es simplemente una forma específica de energía. La propiedad de un átomo de absorber luz de longitud de onda específica, es utilizada en la espectrofotometría de absorción atómica.

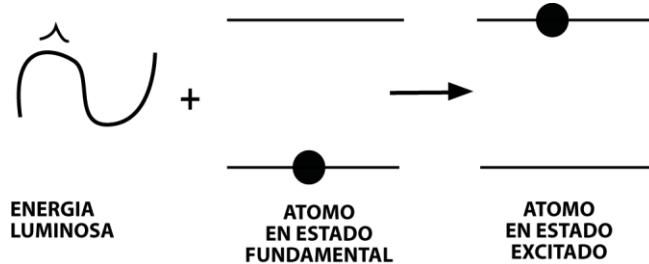


Fig. 2. Proceso de la absorción atómica.

El valor de interés en las medidas de absorción atómica es la cantidad de luz de longitud de onda en resonancia, la cual se absorbe al pasar esta a través de un grupo de átomos. Midiendo la cantidad de luz absorbida, se determina cuantitativamente la cantidad del elemento presente. El uso de fuentes especiales de luz y una selección cuidadosa de la longitud de onda permite una determinación cuantitativa específica de elementos individuales en presencia de otros.

El elemento que se va a muestrear, se disocia de sus enlaces químicos, colocándose en un estado no excitado y en su mínima energía. Para disociar se quema la muestra por analizar en la llama de un quemador.

Bajo condiciones apropiadas de llama, muchos de los átomos permanecerán en la forma de su estado fundamental y serán capaces de absorber luz de longitud de onda apropiada proveniente de una fuente de luz, que se logra con lámparas de cátodo hueco, el cual está revestido con el elemento que se va a analizar. Esta lámpara emite solo la radiación del elemento buscado. La facilidad y la velocidad a la cual se pueden hacer determinaciones exactas y precisas, ha hecho que la absorción atómica sea uno de los métodos más utilizados en la medición de metales en suspensión en otro medio.

### 3.2. Análisis Cuantitativo por Absorción Atómica

El proceso de absorción atómica se ilustra en la figura 3. Luz de longitud de onda en resonancia de una intensidad inicial ( $I_0$ ) se enfoca en la llama, la cual contiene átomos en estado fundamental. La intensidad inicial de la luz es disminuida en una cantidad determinada por la concentración de los átomos en la llama. La luz es entonces dirigida hacia el detector con una intensidad ya disminuida ( $I$ ), donde es medida. La cantidad de luz absorbida se determina comparando ( $I$ ) y ( $I_0$ ).

Distintos términos afines son empleados para definir la cantidad de luz absorbida. La “transmitancia” es definida como la razón de la intensidad final a la intensidad inicial:

$$T = I/I_0 \quad (1)$$

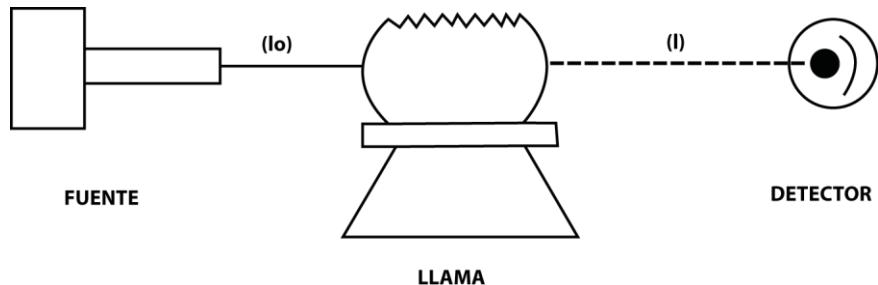


Fig. 3. Proceso de medición por comparación.

La transmitancia es una indicación de la fracción de luz inicial que pasa a través de la llama para incidir en el detector.

El "Porcentaje de transmisión" es simplemente la transmitancia expresada en términos de porcentaje.

$$\% T = 100 * I/I_0 \quad (2)$$

El "Porcentaje de absorción" es el complemento del porcentaje de transmisión y define el porcentaje de luz inicial que es absorbida en la llama.

$$\% A = 100 - \% T \quad (3)$$

El término "Absorbancia", es puramente la expresión matemática.

$$A = \log I/I_0 \quad (4)$$

Absorbancia es el término más conveniente para caracterizar la absorción de luz en la espectrofotometría de absorción, pues esta cantidad guarda una relación lineal con la concentración.

La ley de Beer define esta relación:

$$A = abc \quad (5)$$

En donde "A" es la Absorbancia; "a" es el coeficiente de absorción constante que es característica de las especies que absorben; "b" es la longitud del paso de luz ocupado por la celda de absorción; y "c" es la concentración de las especies absorbentes en la celda de absorción.

Esta conducta, de proporcionalidad directa entre Absorbancia y concentración, es observada en absorción atómica. Cuando la Absorbancia de soluciones patrón conteniendo concentraciones conocidas del analito se miden y se grafican los resultados

de Absorbancia versus concentración, se establece una relación de calibración similar a la figura 4.

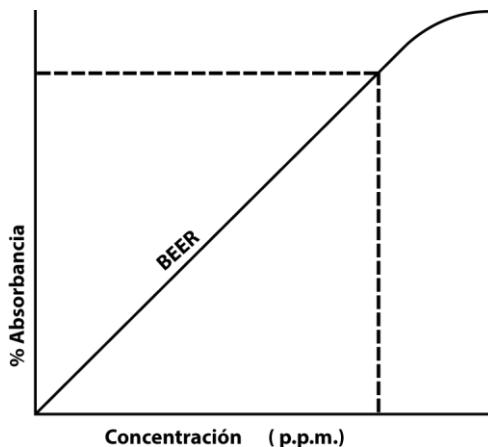


Fig. 4 Ley de Beer.

En la región en la cual se observa la relación de la ley de Beer, la calibración produce una línea recta. Conforme se incrementa la concentración y la absorbancia, comportamientos no-ideales de los procesos de absorción producen una desviación en el desarrollo de la línea recta, como se muestra.

Después que se ha establecido tal curva de calibración, se puede medir la absorbancia en forma porcentual, de soluciones de concentración desconocidas, directamente de la curva de calibración. En la instrumentación moderna, la calibración se puede hacer en el instrumento para proveer una lectura directa en partes por millón (P.P.M.) de la concentración en análisis.

#### 4. Instrumentación para la Absorción Atómica

##### 4.1. Componentes Básicos

El espectrofotómetro opera basándose en el principio de que cada átomo absorbe solo la luz de su longitud de onda.

Para comprender como trabaja un espectrofotómetro de absorción atómica, construyamos uno, pieza por pieza. Cualquier espectrofotómetro de absorción debe tener componentes que cumplan los tres requerimientos básicos. Ellos son: Fuente de luz-celda de muestreo – un medio de medir luz específica.

En absorción atómica, estas aéreas funcionales se implementan con los componentes ilustrados en la figura 5.

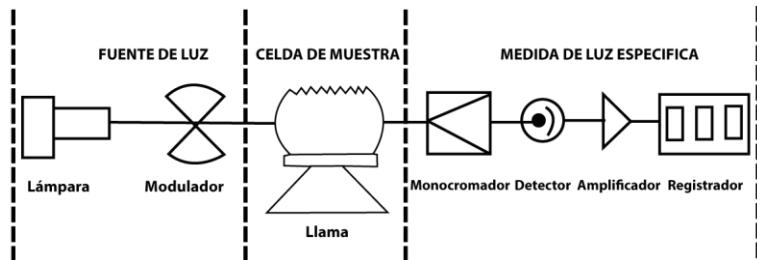


Fig. 5. Áreas funcionales y componentes del espectrofotómetro.

De acuerdo a lo expuesto en la figura anterior, vemos cual es la función que cumple cada uno de los elementos componentes de un espectrofotómetro.

❖ **Lámpara de cátodo hueco.**

Este cado es de un material igual al del elemento que se muestrea, por lo cual el espectro de un rayo de luz entra en resonancia con los átomos del elemento de la muestra.

❖ **Modulador.**

Este elemento rotatorio del equipo interrumpe el rayo de luz de la lámpara, convirtiendo la señal emitida en corriente alterna para que la capte el detector.

❖ **Quemador.**

Este elemento está localizando entre la lámpara del cátodo hueco y el monocromador de modo que la llama se coloca en el rayo de luz; un capilar aspira la muestra introduciéndola a una cámara que la calienta y la nebuliza. Un drenaje expulsa los residuos que no se queman y por la abertura principal del quemador salen las partículas que se queman, disociando los átomos.

La cantidad de luz absorbida por estos átomos libres se miden en el detector electrónico.

❖ **Detector electrónico.**

Se compone de una célula foto-eléctrica que transforma la energía luminosa en eléctrica.

❖ **Detector amplificador de la señal.**

Amplifica y procesa la corriente eléctrica por instrumentos electrónicos, los cuales producen una señal, que es una medida de la atenuación de luz ocurrida en la celda de muestreo. Esta señal es procesada para producir una lectura en la pantalla digital.

❖ **Pantalla Digital.**

Es el lugar donde se lee directamente en unidades de concentración (partes por millón) del elemento buscado.

La cantidad de luz absorbida en la llama es proporcional a la cantidad del elemento presente en la muestra. El espectrofotómetro se calibra para medir el elemento buscado y da lecturas directas en P.P.M. (partes por millón).

**4.2. El Espectrofotómetro de absorción atómica de doble haz**

Básicamente el funcionamiento de un espectrofotómetro de haz sencillo es bueno, sin embargo para que la lámpara catódica emita la señal constante es necesario que esta se caliente y estabilice. El tiempo necesario es de media hora.

En el sistema de doble haz, el rayo procedente de la lámpara catódica se divide en 2 haces, uno pasa directamente al monocromador y el otro haz pasa a través de la llama; esto ocurre desde el momento que comienza a funcionar la lámpara y aunque la señal emitida no sea constante, como los dos haces varían siempre en la misma proporción, la señal resultante (la diferencia entre ambos) en el medidor será constante.

Con este sistema no es necesario esperar más de 3 minutos para que la lámpara se caliente.

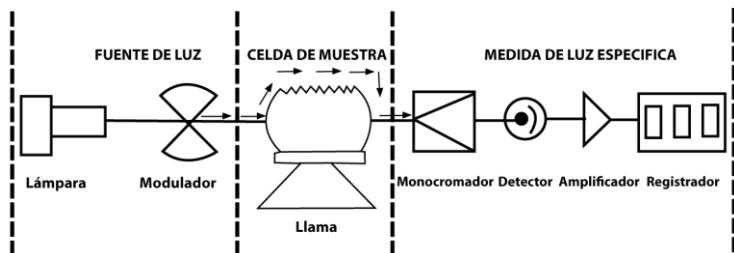


Fig. 6. Espectrofotómetro de Absorción Atómica de Doble Haz.

En los espectrofotómetros modernos se utiliza un modulador, que es un espejo recortado que hace pasar alternativamente el haz a través de la llama y fuera de ella, ver Fig. 6. Al llegar al monocromador el haz de “muestra” y de “referencia” se unen y se toma la relación entre ambos.

#### 4.3. Diseños de la Instrumentación

La técnica de la espectrofotometría por absorción atómica se desarrolló en 1955 en Australia.

El diseño de los instrumentos necesarios y sus principios de funcionamiento se explica a continuación.

##### ❖ Lámparas de cátodo hueco

Actualmente todos los elementos con excepción de los alcalinos se determinan con lámparas de cátodo hueco.

Esquemáticamente la lámpara de cátodo hueco para un solo elemento, consta de un componente activo que es el cátodo revestido fabricado con el elemento que se va a muestrear.

El cátodo de la lámpara es un cilindro hueco, cuyo espectro debe producirse. El ánodo y el cátodo se encuentran en un cilindro de vidrio o cuarzo sellado y lleno, ya sea de neón o argón. Al extremo del cilindro se ha fundido una ventana transparente a la radiación emitida. (Ver figura 7).

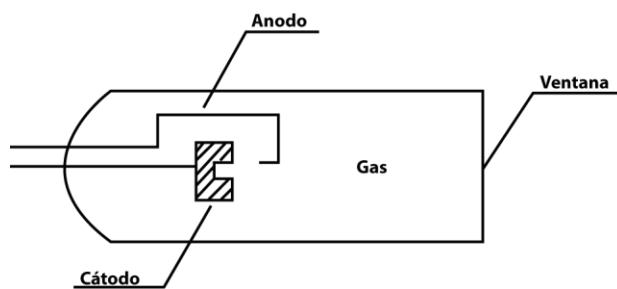


Fig.7. Lámpara de cátodo hueco.

Cuando se aplica un potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo, los átomos metálicos del cilindro (cátodo) son despedidos hacia el espacio frontal interno de la lámpara y los átomos del gas de relleno se ionizan. Los choques con los iones de neón o

argón producen una excitación en parte de los átomos metálicos y por lo tanto la emisión de su onda característica.

La selección del gas de relleno depende del elemento metálico así el plomo, el hierro y el níquel dan mejores resultados con neón que con argón.

Sin embargo el neón puede utilizarse con elementos como el litio y el arsénico, debido a que la onda de omisión del neón está muy cerca a la mejor línea de resonancia de dichos elementos.

#### ❖ **Modulador**

La luz proveniente de lámpara de cátodo hueco pasaba a través de la llama, después de la cual la longitud de onda de resonancia se aislabía mediante un monocromador o filtro y luego incidía sobre el detector y amplificador. Los primeros instrumentos de absorción atómica estaban construidos de acuerdo a este sistema y funcionaban lo suficientemente bien, como el sistema de haz continuos, pero se observaron ciertos problemas con el sistema debido a la emisión de la llama. En absorción atómica se considera que la llama idealmente es, una cámara de muestra calentada que no debería emitir radiación, sin embargo, no es así en la práctica, ya que la llama tiene emisión. Esta radiación confunde al detector, dado que no puede distinguir entre un fotón que proviene de la lámpara y otro proveniente de la llama. Por esta razón se desarrolló el uso del modulador.

Con el uso del modulador rotatorio de luz de la lámpara catódica se interrumpe, mientras que la luz de la llama queda inalterada.

La luz interrumpida por el modulador giratorio produce una corriente alterna en el detector. El círculo electrónico diseñado para amplificar tan solo corriente alterna ignora la señal proveniente de la llama.

El modulador puede ser óptico, lográndose el mismo efecto que si opera la lámpara de corriente pulsante.

Los espectrofotómetros modernos utilizan un modular que es un espejo recortado, que hace pasar alternativamente el haz a través de la llama y fuera de ella.

#### ❖ **Quemadores**

Son los elementos más importantes de la instrumentación para absorción atómica. Los principales criterios de diseño son:

Estabilidad: La absorción para una concentración dada en P.P.M. debe permanecer constante en todo momento.

Sensibilidad : Debe tener una alta absorción para una concentración determinada.

Sonido : El quemador debe ser silencioso y no debe producir fluctuaciones

en la llama.

- |   |   |   |
|---|---|---|
| Habilidad para Quemar soluciones Concentradas | : | En muestras reales, el límite de detección generalmente se fija con base a la concentración máxima tolerable.   |
| Libertad de Memoria                           | : | El contenido de una muestra no debe afectar el resultado de la muestra siguiente.   |
| Libertad de señal de fondo                    | : | Debe tener muy poca o ninguna absorción de parte de la llama y del líquido blanco (xileno) que se usa generalmente para programar el equipo.  |
| Linearidad                                    | : | Las curvas de trabajo de concentración versus absorbancia deben ser rectas en el mayor rango posible.   |
| Versatilidad                                  | : | Deben poder responder a un gran número de elementos y tipos de muestra con el mismo quemador.   |
| Velocidad de Respuesta                        | : | En casos en que se disponga de muy poca cantidad de muestra se debe lograr el valor de la absorción al poco tiempo de quemar la muestra.  |
| Mínimo de emisión                             | : | La llama no debe producir un error fotométrico, ya que una emisión muy elevada de parte de la llama producirá fluctuaciones en la respuesta. Una llama muy brillante produce fluctuaciones. |

El quemador utilizado en la actualidad, es el llamado de pre-mezcla, en el cual la muestra de lubricante disuelto, el combustible (acetileno) y el oxidante (aire u óxido nitroso) se mezclan en la cámara antes de entrar en la llama. Ver figura 8.

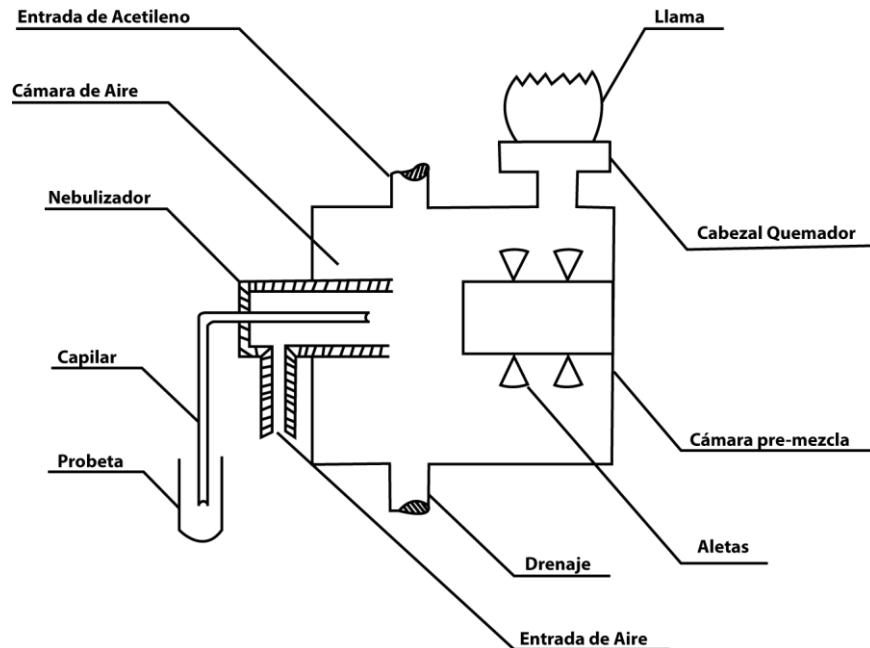


Fig. 8. Quemador.

El espectrofotómetro Perkin Elmer 2380 que nosotros utilizamos usa este tipo de quemador y sirve para usar aire con acetileno u óxido nítrico – acetileno, esta última mezcla es la adecuada para disociar átomos de elementos que necesitan altas temperaturas (aluminio, silicio, etc.).

Por la característica de su diseño, la longitud del capilar de succión no es un elemento crítico, por lo cual no hay relación entre la velocidad de aspiración (3 ml/minuto) de la muestra y de la absorción.

La cámara de mezcla está fabricada de penton, un plástico extraordinariamente inerte, que no contamina la muestra.

#### ❖ Monocromador

Los monocromadores dejan pasar solo la línea de resonancia y bloquea las no resonantes para lograr una curva lineal. El sistema de lectura, debe cumplir con la ley de Beer “la concentración es proporcional al logaritmo negativo de la absorción en un rango amplio de concentraciones”.

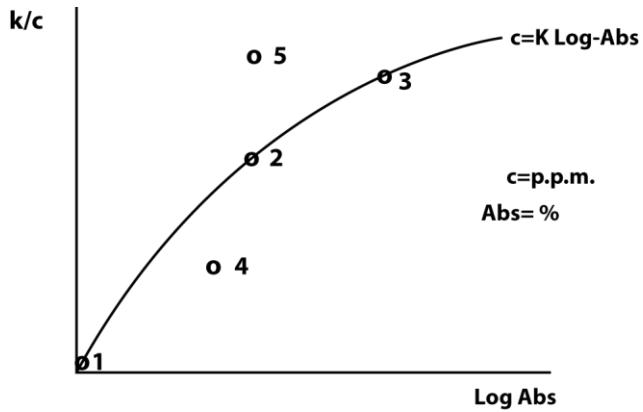


Fig. 9. Curva de lectura.

Graficando la ley de Beer se introducen 3 puntos en el lector digital del espectrofotómetro.

Punto N° 1: Líquido que no tiene concentración (xileno)  
 Puntos N° 2 y 3: Con concentración patrón.

Luego se prepara la muestra real del aceite de la máquina, en la misma proporción de dilución con Xileno para que los valores de absorbancia queden dentro de la curva, según el grado de contaminación, pudiendo obtener puntos como:

Punto N° 4: Baja concentración.  
 Punto N° 5: Alta concentración.

Sin embargo estos puntos no indican lo que está ocurriendo a la máquina, indica solo las concentraciones en P.P.M. de las partículas de desgaste.

## 5. Requisitos y Funcionamiento del Laboratorio

### 5.1. Diseño del Laboratorio

Para poder aplicar la espectrofotometría de Absorción Atómica en el desarrollo de un servicio que permita dar mantenimiento preventivo a las máquinas de los usuarios es necesario cumplir con los siguientes requisitos:

- ❖ Selección del equipo del laboratorio.
- ❖ Normar los procedimientos del laboratorio.

- ❖ Establecer patrones de desgaste.
- ❖ Normar la interpretación de los resultados.

## 5.2. Selección del equipo de laboratorio

El equipo necesario es el siguiente:

- ❖ Un espectrofotómetro.
- ❖ Un probador de contaminación de petróleo.
- ❖ Un detector de agua.
- ❖ Un vibrador para batir muestras.
- ❖ Material diverso (jeringas – probetas – frascos – mangueras).

## 5.3. Preparación de las muestras

Las muestras se registran y codifican en botellas plásticas. Luego se colocan en el vibrador. A continuación se usan las jeringas calibradas para sacar cantidades exactas de la muestra y se introduce en probetas donde se diluyen con xileno.

## 5.4. Prueba de contaminación de combustible

De acuerdo de la temperatura en que se produce el encendido de unas gotas de la muestra disuelta se comprueba el porcentaje de combustible en el aceite del motor.

## 5.5. Prueba de contaminación de agua

Se usa un detector que está controlado a una temperatura específica y calibrado con muestras patrón con contaminación de 0,1% de agua. La muestra real se compara con el patrón.

## 5.6. Prueba en el espectrofotómetro

En el espectrofotómetro se busca la concentración de partículas de contaminación en P.P.M. (partes por millón) en el lubricante. Los elementos buscados son:

Hierro (Fe) / Cobre (Cu) / Cromo (Cr) / Aluminio (Al) / Silicio (Si) / Plomo (Pb) /  
Magnesio (Mg) / Molibdeno (Mo) / Sodio (Na)

Las muestras son diluidas en xileno, al igual que las muestras patrón. El espectrofotómetro, se calibra para leer concentraciones de todos los elementos de 0 a 400 PPM, introduciendo al lector digital una curva de Concentración/Absorbancia usando el Xileno para encontrar el punto cero y dos estándares Caterpillar. La muestra real debe

caer en la curva. Aquellas muestras que se salen del rango por mucha concentración se diluyen en mayor proporción para alcanzar la curva. La llama de aire – acetileno se usa para disociar cobre, hierro, cromo, plomo, magnesio y sodio. La llama de óxido nitroso – acetileno se usa para el silicio, aluminio y molibdeno.

### 5.7. Resumen del Procedimiento de pruebas.

- ❖ Se coloca la lámpara con un cátodo igual al elemento a muestrear. Se ajusta la corriente.
- ❖ Se ajusta la frecuencia.
- ❖ Se gradúa el quemador para que la llama INTERFIERA con el haz de la lámpara.
- ❖ Se ajusta la llama, que marque cero con xileno.
- ❖ Se aspiran los estándares del elemento, y se comprueba en el lector. Las P.P.M., programando la curva absorbancia/concentración.
- ❖ Se aspira la muestra sacada de la máquina y luego se lee la absorbancia en el indicador en PPM.

Tabla1. Tabla de corrientes por elemento

Elemento	Corriente mínima de operación
Cobre (Cu)	15 miliampères
Hierro (Fe)	30 miliampères
Cromo (Cr)	25 miliampères
Aluminio (Al)	25 miliampères
Silicio (Si)	40 miliampères
Molibdeno (Mo)	30 miliampères
Plomo (Pb)	10 miliampères
Sodio (Na)	8 miliampères
Magnesio (Mg)	6 miliampères

Los resultados de los análisis deben ser comparados con valores estándares obtenidos de máquinas similares en condiciones similares de operación. Para ello es necesario:

- ❖ Establecer tablas de la composición metálica de los compartimientos donde se toman las muestras.
- ❖ Establecer tablas con los patrones o estándares, de máquinas en condiciones normales y en valores límites de desgaste.
- ❖ Establecer patrones de interpretación de los resultados cruzando información a fin de obtener la recomendación más certera.

### 5.8. Estableciendo Patrones de Comparación

Conociendo la composición metálica de los compartimientos se pueden establecer patrones para condiciones normales de operación, manteniendo las concentraciones de partículas de desgaste casi constantes mientras no ocurren fallas por fatiga o se inicia desgaste progresivo.

Conforme se inicia el envejecimiento de la máquina, se irán encontrando concentraciones progresivamente más altas por el desgaste.

Estas concentraciones se elevan hasta alcanzar valores límites en que es necesario desarmar y cambiar los componentes críticos próximos a fallar.

Luego de las reparaciones los valores de desgaste también son elevados, igual a los de una máquina nueva por aproximadamente 250 horas, hasta que asientan las piezas en contactos o desaparecer la contaminación por la manipulación de los mecánicos.

### **5.9. Interpretación de Resultados**

Para interpretar los resultados se debe tomar en cuenta, lo siguiente:

- ❖ Los materiales del componente muestreado.
- ❖ La capacidad del lubricante, cuanto mayor es la capacidad la concentración será más baja.
- ❖ La carga de trabajo – con nuevas cargas habrá menos desgaste.
- ❖ Los períodos de cambio – si se prolongan los cambios aumentan las concentraciones.

## **6. Procedimiento del Análisis Programado de Desgaste**

### **6.1. Toma de Muestras**

Esta fase del programa queda en manos del cliente, por lo cual al entregar el equipo necesario para muestrear, que consiste en: Bomba manual de vacío, tubos de polietileno, botellas plásticas, envases de cartón, etiquetas autoadhesivas y cajas metálicas, siempre se entregarán instrucciones haciendo hincapié en los siguientes puntos:

- ❖ Operar la máquina hasta que llegue a su temperatura de operación.
- ❖ Prepare las botellas, mangueras y etiquetas con los datos de la máquina.
- ❖ Arme la bomba de succión y tome la muestra por el tubo de la varilla de nivel de aceite.
- ❖ Llene la botella hasta  $\frac{3}{4}$  parte de su volumen para no contaminar la bomba.
- ❖ Deseche la manguera o tubo plástico y envíe la botella al laboratorio.

## **6.2. Muestras Iniciales**

Una vez inscrita una maquina en el A.P.D. se deberá tomar muestras de los compartimientos. Estas muestras serán realizadas por personal de Gildemeister S.A.C. a modo de instrucción al personal del cliente sin cargo alguno para el usuario.

El análisis inmediato de las muestras iniciales, establecerá las condiciones de desgaste de cada compartimiento y servirá para identificar posibles problemas existentes a la fecha de inscripción. Además se deberá tomar muestras de aceites “nuevos” usados por el cliente, para establecer el nivel de elementos metálicos usados en los aditivos.

## **6.3. Muestras Normales.**

Después de las muestras iniciales, se comienzan a tomar muestras con cada cambio de aceite.

Los periodos de las muestras normales son:

- ❖ Motor: En cada cambio o cada 125 hrs.
- ❖ Otros compartimientos: Cada 500 horas.

## **6.4. Muestras Especiales**

En algunos casos el laboratorio puede pedir la repetición de una muestra, para comprobar una lectura anormal.

Cada vez que un nuevo lubricante es seleccionado, muestras de este deben enviarse al laboratorio. El registro del aceite nuevo será actualizado y usado como suplemento en los futuros análisis.

En el caso de la maquinaria nueva o reparada, se deberá sacar muestras cada 50 horas durante el primer cambio de aceite del motor y cada 250 horas en los demás compartimientos, para comprobar que todas las piezas se están asentados correctamente.

## **6.5. Período de Garantía**

Durante los primeros 6 meses o 1000 horas del periodo de garantía de los equipos Caterpillar, los análisis se realizarán sin cargos para el cliente. En este período se podrán realizar hasta nueve análisis en el caso de los motores y hasta 21 análisis de compartimientos en una máquina, pero mediante la firma de un contrato por prestación de este servicio.

## **6.6. Componentes de Máquinas que se Analizan**

Este servicio está dirigido específicamente a determinar niveles de desgaste, mediante el análisis de aceite, de los siguientes componentes:

- ❖ Motor
- ❖ Transmisiones
- ❖ Sistemas hidráulicos
- ❖ Mandos finales
- ❖ Diferenciales

## **6.7. Análisis en el Laboratorio**

Al recibir el laboratorio las muestras enviadas estas son sometidas al siguiente procedimiento:

- ❖ Recepcionando las muestras el laboratorista califica para su procesamiento.
- ❖ Pondrá las muestras en el vibrador para uniformar el contenido.
- ❖ Luego preparará las soluciones con Xileno en las proporciones requeridas colocándolas en probetas.
- ❖ Luego efectuará las pruebas de contaminación de agua.
- ❖ Si es lubricante de motor efectuará la prueba de contaminación por petróleo (dilución).

Procederá a analizar en el espectro fotómetro en el siguiente orden:

- ❖ Por cobre con aire/acetileno
- ❖ Por hierro con aire/acetileno
- ❖ Por cromo con aire/acetileno
- ❖ Por plomo con aire/acetileno
- ❖ Por magnesio con aire/acetileno
- ❖ Por sodio con aire/acetileno
- ❖ Por aluminio con óxido nitroso/acetileno
- ❖ Por silicio con óxido nitroso/acetileno
- ❖ Por aluminio con óxido nitroso/acetileno
- ❖ Por molibdeno con óxido nitroso/acetileno

Luego de efectuado los análisis procederá a entregar los resultados al analista marcado los resultados anormales.

## **6.8. Interpretación de los Análisis.**

El Analista al recibir los reportes del laboratorista procederá a:

- ❖ Darle interpretación utilizando los patrones de desgaste.
- ❖ Comparará los resultados del análisis con los resultados anteriores.
- ❖ Llamará por teléfono a Télex al usuario si los resultados requieren acción inmediata.
- ❖ Enviará por carta el informe al usuario y ordenará el archivo de las copias.

#### 6.9. Información a Clientes

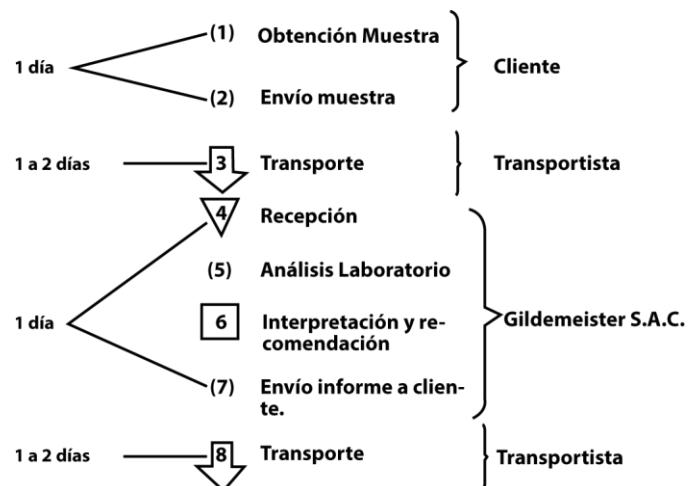
Copia de todos los informes son archivados en el laboratorio, una por cada compartimiento de cada una de las máquinas inscritas en el programa. La copia que se envía el cliente llevará la historia de los análisis de aceite, contaminación, taza de consumo de aceites, registro de los cambios de aceites y el consumo de combustibles.

En condiciones normales las muestras serán procesadas dentro de las 24 horas después de recibidas.

Si el análisis indicara problemas críticos, el laboratorio se comunicará con el cliente por la vía más rápida posible.

Para los análisis de muestras normales del cliente de sucursales o agencias, la información de será enviada al Representante de Ventas de Repuestos y Servicios en el correo diario.

El ciclo de esta muestra está estimado entre 4 y 6 días hábiles, según el lugar donde esté ubicado el cliente. Para efecto de este cálculo se considerarán 4 etapas de las cuales una es responsabilidad del cliente, dos son del sistema de transporte y una de Gildemeister.



## 7. Conclusiones

Caterpillar fue el primer fabricante de equipos de movimiento de tierra y motores en presentar el análisis de aceite, y desde que ofreció el Análisis Programado de Desgaste (A.P.D.) en 1970, el programa ha demostrado efectividad, beneficiando a nuestros clientes en cosas, tales como:

- ❖ APD reduce los costos de repuestos y mano de obra. El costo de reacondicionamiento de un motor o una transmisión, cuando el APD indica que se está desarrollando un problema, puede ser la mitad o la cuarta parte del costo de reacondicionamiento del componente, si se permite que la falla progrese.
- ❖ APD ayuda a mejorar la productividad. Los clientes pueden mantener sus máquinas en óptimas condiciones de operación y aumentar su vida útil.
- ❖ APD ayuda a mejorar los Programas de Mantención Preventiva de nuestros clientes, al tener que llevar registros, de cada máquina inscrita sobre:
  - Fecha de cambio de aceite.
  - Horas trabajadas de la máquina.
  - Horas del último cambio de aceite.
  - Cantidad de aceite agregado entre cambios.
  - Cantidad de combustible consumido.
- ❖ APD le permite a nuestros clientes optimizar la información en los archivos de hoja de vida de cada equipo, al obtener periódicamente el resultado de un análisis científico de la condición de desgaste en que se encuentran los elementos que componen cada uno de ellos.
- ❖ APD en combinación con nuestro Servicio de Mantención Preventiva (SMP) es la mejor arma con que un usuario cuenta, para mantener sus equipos en óptimas condiciones de operación; ya que SMP es un Análisis Técnico del estado operacional y de rendimiento de una maquina o motor, en base a una inspección instrumental de Diagnóstico Mecánico.

Nuestros clientes confían en el A.P.D. para ayudarle a dirigir un programa efectivo de mantención y reducir las paralizaciones no programadas. Al saber que un componente está empezando a fallar, se puede planificar cuando detener la máquina, para las reparaciones necesarias.

A modo de ejemplo, hemos seleccionado 2 casos en que nuestros clientes se vieron favorecidos por nuestro programa A.P.D.

- ❖ Caso N° 1

Cliente: Sociedad Minera Pudahuel  
Lugar de trabajo: Mina Lo Aguirre  
Equipo: Cargador 988B, serie 50W 1167  
Compartimiento: Transmisión  
Tipo de trabajo: Carguío de camiones  
Problema: Aumento de partículas de aluminio en el aceite de una transmisión.

A las 7.995 horas se detectó una leve alza en el contenido de aluminio en el aceite, por lo cual se recomendó tomar una nueva muestra de aceite a las 150 horas.

La nueva muestra tomada a las 8148 horas, 153 horas después y las lecturas de aluminio indicaban un fuerte aumento.

Se recomendó la revisión de los filtros por la probable presencia de partículas mayores, observar la temperatura del convertidor y el envió inmediato de otras muestras. A las 8187 horas se tomó la nueva muestra encontrándose que el aluminio nuevamente había subido. Se recomendó la observación del equipo y su detención para repararlo.

La causa del alto contenido de aluminio era el desgaste que se había iniciado en el convertidor.

La detección a tiempo del equipo evitó la destrucción del convertidor permitiéndose una reparación de costo menor. De no haber detenido a tiempo el equipo se habría tenido que reemplazar el convertidor por uno nuevo.

#### ❖ Caso N°2

Cliente: Codelco Chile – División El Teniente  
Lugar de trabajo: La Yesca  
Equipo: Cargador 910, serie 80U 5779  
Compartimiento: Motor  
Tipo de trabajo: Movimiento de tierra

#### ❖ Problema N°1: Aumento de cromo en el aceite

A las 3450 horas se detectó un leve aumento de cromo en el aceite. Se recomendó no operar a plena carga la maquina sin antes haber alcanzado la temperatura normal de operación y no operar por tiempos prolongados la maquina en vacío o bajas revoluciones. La causa del problema era la operación incorrecta del equipo y con solo adoptar las recomendaciones dadas por el problema se evitó el desgaste de anillo y vástagos de válvulas, lo cual habría llevado en un plazo corto a fallas de alto costo y a una paralización prolongada.

#### ❖ Problema N°2: Aumento de FE, CR, AL, SI y CU en el aceite.

A las 3.978 horas se detectó el inicio de desgaste de camisa, el anillo y pistones. Se recomendó la revisión de filtros de aceite para detectar partículas mayores, efectuar un chequeo del motor con instrumental (SMP) Y una revisión del sistema de admisión de aire. Se pidió el envío de una nueva muestra a las 50 horas. En esta nueva muestra habían disminuido los niveles de elementos de desgaste, gracias a la corrección de problemas en el sistema de admisión de aire.

A las 4443 horas y a las 4928 horas se volvió a detectar niveles altos de Fe, Cr, Al, Si y Cu, producto de paso de polvo al sistema de admisión de aire.

A todos los casos la recomendación oportuna de revisar el sistema de admisión de aire, evitó el desgaste prematuro de camisas, pistones, anillos y otras piezas produciéndole al cliente un ahorro significativo en repuestos, obra de mano y paralización del equipo. Gracias al APD el equipo se mantuvo funcionando sin problemas.

A estos clientes y muchos otros el APD, les ha demostrado su efectividad y que realmente es un medio para disminuir costos.