



••• **Seguimiento de la Formación de Partículas Insolubles en Aceites de Turbina de Gas** [Pág. 01]

••• **Conocer el Mecanismo de Formación de Barnices como parte de Técnicas Analíticas para Programas de Monitoreo de Aceite de Turbina de Gas** [Pág. 07]

# Seguimiento de la Formación de Partículas Insolubles en Aceites de Turbina de Gas

❖ Adolfo Málaga ::TEKNIKER, Eibar, Spain :: amalaga@tekniker.es  
 ❖ José Ignacio Ciria ::TEKNIKER, Eibar, Spain :: jciria@tekniker.es

Las turbinas de gas trabajan bajo unas condiciones muy severas. Así mismo, el lubricante está sometido a unas condiciones de trabajo más exigentes: mayores temperaturas y presiones, alternancia entre ciclos de trabajo/parada e intervalos de cambios de aceite mayores. Esto ha generado, o agudizado, una serie de problemas, que en el pasado, o no se presentaban o no eran tan severos.

Uno de los problemas más importantes generados como consecuencia de lo anterior es la formación de barnices insolubles en el sistema ocasionados por la degradación del lubricante y/o consumo de aditivos antioxidantes. Debido en parte a esto se ha visto la necesidad de trabajar en el desarrollo de nuevos métodos analíticos, con el fin de poder realizar el seguimiento de los aceites de turbina de gas frente a la formación de productos insolubles.

ASTM y varios laboratorios de diferentes países, entre los cuales se encuentra la Fundación Tekniker, están trabajando para desarrollar un método normalizado para poder evaluar dicha problemática. Se espera que se edite una norma para la determinación de los productos de degradación a mediados de 2009, con el título "Standard Test for the Measurement of Lubricant Generated Insoluble Color Bodies in Turbine Oils using Membrane Patch Colorimetry". Este método está basado en la determinación del color de los insolubles generados en un lubricante de turbina utilizando una membrana de filtración y un posterior análisis de dicho filtro aplicando el modelo CIElab.

## Producto Insolubles de Degradación. ¿Qué son?.

Los productos insolubles de degradación son compuestos poliméricos precursores de la formación de los barnices. La formación de estos compuestos son consecuencia de la generación de productos de degradación del aceite base y del consumo de aditivos, los cuales precipitan en el seno del aceite base.

El tamaño de estos polímeros es normalmente inferior a una micra, por lo que es muy difícil poder analizarlos mediante técnicas analíticas tradicionales.

La presencia de estos productos insolubles en el seno de la máquina puede conllevar a una serie de problemas en la misma entre las que se encuentran:

- ❖ Obstrucción de partes móviles de la turbina de gas,
- ❖ Aumento del desgaste,
- ❖ Disminución en la capacidad refrigerantes, etc.

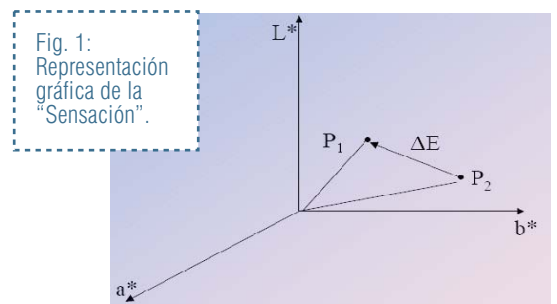
## Medida del Color

Se ha observado que mediante la medida del color que dejan los residuos insolubles del aceite sobre una membrana, se puede medir la tendencia a la formación de productos de degradación en aceites de turbina.

Existen diferentes modelos para determinar el color. Entre los más utilizados se encuentran el Modelo RGB y el CIElab. Para la aplicación que nos concierne vamos a aplicar el segundo.

El modelo CIElab está basado en la comparación de varios parámetros, como son la Luminancia ( $L^*$ ) y la Cromaticidad ( $a^*$  y  $b^*$ ), de una muestra respecto a un patrón. Las variaciones de estos parámetros entre dos muestras dan como resultado un valor de  $\Delta E$ , denominando Diferencia de Color o Sensación (Figura 1). En el caso de lubricantes se compara un aceite usado frente a uno nuevo. El valor de Sensación resultante es indicativo de la tendencia a formar barnices de un aceite.

La escala de valores de  $\Delta E$  se encuentran entre 0 y 100. Cuanto mayor sea dicho número mayor será la diferencia de color entre la muestra de aceite usado y la del nuevo, por lo que mayor será la tendencia del aceite a formar barnices.



Las coordenadas del espacio CIElab son  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$ . En dicho espacio (Figura 2) se puede observar lo siguiente:

- ❖ Cuanto más positivo sea el valor de  $L^*$  la muestra es más clara.
- ❖ Cuanto más negativo sea el valor de  $L^*$  la muestra es más oscura.
- ❖ Cuanto más positivo sea el valor de  $a^*$  su color tenderá más al color rojo.
- ❖ Cuanto más negativo sea el valor de  $a^*$  su color tenderá más al color verde.
- ❖ Cuanto más positivo sea el valor de  $b^*$  su color tenderá más al color amarillo.
- ❖ Cuanto más negativo sea el valor de  $b^*$  su color tenderá más al color azul.

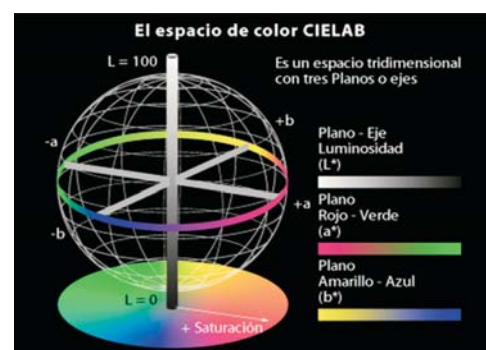


Fig. 2: Espacio de color CIElab

## Análisis Espectrofotométrico

Con ayuda de un Espectrofotómetro de Visible se pueden determinar las coordenadas del espacio CIElab. Comparando el valor de las coordenadas del aceite usado con respecto a las del nuevo se va a obtener como resultado un valor de la Sensación, que en esta aplicación va a estar relacionada con la Tendencia a la Formación de Barnices de un Aceite de Turbina.

$$\Delta E = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$$

A modo de ejemplo se muestran los valores de Sensación de varios filtros de muestras reales (Figura 3).

Aceite Nuevo  
Aceite Usado\_2:  $\Delta E^*$ : 50.5

Aceite Usado\_1:  $\Delta E^*$ : 70.5



Fig. 3: Ejemplo de tres muestras reales

Analizando los resultados del ejemplo se puede indicar que en el caso de la muestra de "Aceite Usado 1" el valor de la Sensación es un 40% superior al de la muestra de "Aceite Usado 2". Esto significa que la primera muestra tiene una tendencia a formar barnices y lodos un 40% superior a la segunda. Los aceites con una tendencia a formar barnices baja deberían de tener un valor inferior a 20. Es muy útil determinar la Tendencia a Formar Barnices que posee un aceite evaluando el valor de la Sensación de varias muestras de lubricante utilizado en una turbina de gas a intervalos de tiempo conocidos. En la Figura 4 se muestra la tendencia de un aceite de turbina de gas en el tiempo, una vez que se han consumido los antioxidantes.

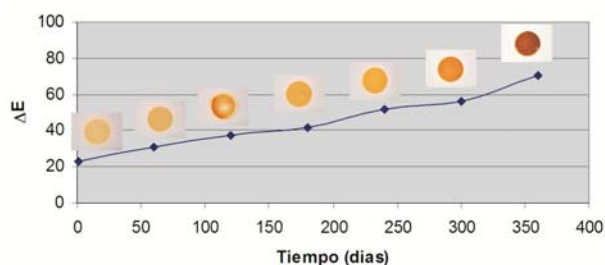


Fig. 4: Ejemplo de la tendencia a formar barnices de un aceite de turbina de gas una vez que los antioxidantes se han consumido.

Finalmente, indicar que es muy recomendable evaluar la tendencia a formar barnices de un aceite junto con otras técnicas analíticas como, por ejemplo:

- Determinación de la concentración de Antioxidantes individuales (RULER).
- Polución gravimétrica a diferente micraje de filtro.
- FITR.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASTM X XXXX-XX "Standard Test Method for the Measurement of Lubricant Generated Insoluble Color Bodies in Turbine Oils using Membrane Patch Colorimetry".
- ASTM E 308-06 "Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System".
- ASTM D 2244-07 "Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates".
- ASTM D 2276-00 "Standard Test Method for Particulate Contaminant in Aviation Fuel by Line Sampling".
- "Using Quantitative Spectrophotometric Analysis as a Predictive Tool to Measure Varnish Potential", Greg Livingstone, Clarus Technologies and Brian Thompson, Analysts, Inc.
- "Óptica Fisiológica", J. M. Arrigas et al., McGraw-Hill, 1995.
- "Investigation of Oil Contamination by Colorimetric Analysis", Sasaki, Akira, et al. STLE Presentation 2001.
- "Solving Varnish Problems at Power Generation Facilities", Greg J. Livingstone, Clarus Technologies, Practicing Oil Analysis Magazine, January 2003
- "New Varnish Test Improves Predictive Maintenance Program", Greg Livingstone, Clarus Technologies and Brian Thompson, Analysts, Inc, Practicing Oil Analysis Magazine, July 2005
- "Sludge and Varnish in Turbine Systems", Jim C. Fitch and Sabrina Gebarin, Noria Corporation, Practicing Oil Analysis Magazine, May 2006
- "Varnish Potential Analysis", Michael Barrett, Insight Services, Practicing Oil Analysis Magazine, May 2007
- "Understanding Varnish build-up mechanisms as part of Analytical Techniques for Gas Turbine Oil Monitoring Programs", Jesús Terradillos -Tekniker, Jo Ameye - Fluitec International, Greg Livingstone - EPT Inc, USA., TAE-Esslingen, 2008.



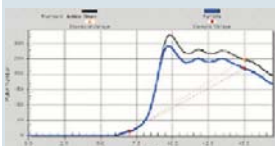
## DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL REMANENTE DE UN LUBRICANTE



# RULER

El RULER es un equipo portátil, tanto de campo como para laboratorio, que por su fácil manejo y versatilidad puede determinar de una manera rápida y precisa el estado de un lubricante con respecto a su estado de oxidación.

Esta técnica es una herramienta proactiva, ya que indica el estado del lubricante antes de que se produzcan cambios apreciables en el lubricante.



Por medio de la voltamperometría lineal de barrido se pretende determinar la concentración de antioxidantes (AO) en el seno de un lubricante en uso.

Se representa el voltaje vs. Corriente, obteniéndose como resultado una intensidad a un potencial dado. A ese valor de intensidad se le da el nombre de Rul Number (RN) adimensional y arbitrario. EL tiempo de barrido del voltaje se da en segundos. La intensidad de corriente es directamente proporcional a la concentración de los antioxidantes presentes en el medio.

Una vez conocida dicha concentración se podrá obtener el porcentaje de vida útil remanente que la queda al aceite (% RUL).

Para la determinación de los antioxidantes en un lubricante se utiliza una disolución polar para extraer los compuestos polares (antioxidantes) mientras que los compuestos apolares (aceite base, tanto minerales como sintéticas, y aditivos no polares) se quedan retenidos en el fondo atrapados en la arena. Además, posee un electrolito el cual es el encargado de transportar la carga electrónica en el seno del disolvente.

Los antioxidantes disueltos en un lubricante aparecerán en el voltamperograma en función del disolvente utilizado (polaridad, concentración del electrolito,...).

Cada una de estas disoluciones viene etiquetada con un color, el cual es indicativo de la aplicación para la cual es recomendada.



### a) Disolución Azul.

Se utiliza para la determinación de antioxidantes en Aceites de motor, ya sean minerales o sintéticos.

### b) Disolución Verde.

Se utiliza para la determinación de antioxidantes en Aceites Hidráulicos, Biodregrables, Circulación, Compresores, Engranajes, Ésteres fosfato, Grasas y Mezclas Agua-Poliglicol, ya sean minerales o sintéticos.

### c) Disolución Amarilla.

Se utiliza para la determinación de antioxidantes en Aceites de Turbina e Hidráulicos con paquete de aditivos (R&O), ya sean minerales o sintéticos.

### d) Disolución Roja.

Se utiliza para la determinación de antioxidantes en Aceites de Aviación.

## Índice PQ



El PQ es un equipo automático para determinar cuantitativamente partículas ferromagnéticas en muestras de aceites usados.

Puede utilizarse tanto conectados a un PC como solo, midiendo en lotes o muestras individuales.

El display del equipo muestra tanto el estatus como los valores de PQ. Los datos son guardados en una memoria interna para una posterior transferencia a una base de datos. El equipo se calibra automáticamente entre muestras. Se pueden cargar hasta 144 muestras para un funcionamiento en modo automático. Después de la medida, la muestra es llevada a una zona de desechos y el equipo queda listo para la siguiente media.

### Ventajas del equipo:

- ➔ Medidas automáticas.
- ➔ Los resultados de las muestras son guardados en una memoria interna, con opción a transferirlos a un PC.
- ➔ Es exacto y rápido de medida - 5 muestras por minuto.
- ➔ Puede medir hasta 144 muestras por lote.
- ➔ Calibración automática entre medidas.

### Por qué usar la tecnología PQ®?

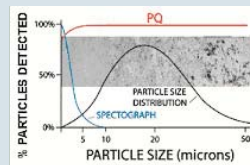
Una medida del PQ es una herramienta esencial en los programas de análisis de aceite usado ya que puede identificar partículas grandes no detectadas por otras técnicas analíticas, sin necesidad de preparación de la muestra. Una medida del Índice PQ puede llevar unos 5 segundos.

El PQ funciona mediante la medida de la distorsión del flujo del campo magnético cuando una partícula ferromagnética es colocada en su campo.

El resultado es mostrado como un "Índice PQ". Este índice es una medida adimensional que puede relacionarse con los valores ferrográficos DL y DS o con las ppm del análisis espectroscópico.

### Limitaciones de otras Técnicas.

La espectroscopia de absorción y emisión no pueden ser utilizadas para análisis de partículas mayores de 5 micras. Tradicionalmente se han utilizado la digestión ácida y el rotrodo, pero ambos métodos necesitan preparación de la muestra.



*Gráfico de porcentaje de partículas detectadas vs. Tamaño de las mismas*

## Ferrografía rotatoria RPD



La ferrografía rotatoria (RPD) ofrece un método rápido y simple de separar las partículas de desgaste.

Se añade un volumen de muestra a un sustrato de vidrio localizado sobre un material magnético. Las partículas de desgaste se depositan radialmente en tres anillos concéntricos mediante la combinación de fuerzas rotacionales, magnéticas y gravitacionales.

El lubricante se elimina mediante la adición de un disolvente de lavado y su posterior secado, proporcionando un sustrato con partículas bien separadas que pueden ser observadas mediante el microscopio óptico o electrónico. El equipo viene con una guía "Guide to Wear Particle

Recognition", la cual ayuda al usuario a identificar los tipos de partículas existentes mediante la observación de las diferentes formas, tamaños y disposiciones. Las partículas de desgaste también pueden ser medidas de una manera cuantitativa mediante la deposición del sustrato sobre el Analex PQ Ferrous Debris Monitor.

La ferrografía es una técnica utilizada por las compañías de lubricantes, transportes, fuerzas armadas, industria de la construcción, minería, etc. Las aplicaciones típicas son en aceites de sistemas de transmisión, mandos finales, engranajes, motores diesel y sistemas hidráulicos.

- ➔ Separa y examina las partículas de desgaste.- fácil identificación del tipo de desgaste.
- ➔ Los resultados pueden ser analizados visualmente con ayuda de la guía o cuantificados con ayuda del PQ.

# circoil

## LA CIENCIA DE LA CROMATOGRAFÍA EN CAPA FINA RADIAL

La cromatografía es una técnica de separación, donde una muestra es separa en sus diferentes componentes y seguidamente se pueden medir o identificar de diversas maneras. Los componentes que van a ser separados son distribuidos en dos fases inmiscibles.

La base de cualquier cromatografía es la fase estacionaria, la cual es normalmente un sólido en la cromatografía en capa fina. La fase estacionaria está enlazada a un soporte sólido construido con un material inerte. La muestra se va moviendo a lo largo o a través de la fase estacionaria. Las diferencias entre las propiedades físicas y químicas de los diferentes componentes de la muestra son usadas para provocar la separación y la velocidad de movimiento (llamada migración) de los componentes individuales.

Cuando un componente de la muestra ha emergido del cromatograma se dice que ha sido eluido. En el caso ideal, los componentes van emergiendo del sistema en función de la interacción que tengan con la fase estacionaria. Se consigue una buena resolución cuando los componentes se separan lo suficiente como para evitar el solapamiento de un pico con el del vecino.

El término radial se refiere a la formación del círculo por parte de los constituyentes de la muestra después de que la muestra ha sido eluida en el sustrato cromatográfico, cuando lo hace en un frente horizontal. Por eso se la llama cromatografía en capa fina radial.

En la cromatografía en capa fina, la fase estacionaria se coloca sobre una base de plástico, vidrio o metal inertes. Entonces se pone una gota de muestra sobre la placa y se produce el desarrollo del cromatograma cuando la fase móvil junto con los componentes de la muestra se evolucionan hacia la fase estacionaria. La muestra viaja a través de la placa en la fase móvil ayudada por la capilaridad. La separación de los componentes se produce por medio de la adsorción, partición, exclusión, o procesos de intercambio iónico, o una combinación de alguno de estos.

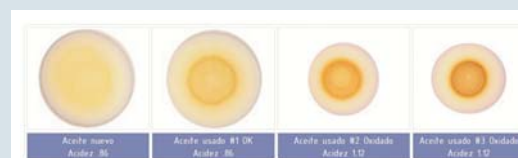
En la cromatografía en capa, la posición de las bandas o zonas resultantes, tras su desarrollo, se detecta u observa por los medios apropiados.

La cromatografía en capa encuentra muchas aplicaciones debido a que es un método muy simple, con alta sensibilidad, velocidad de separación, y si se desea la recuperación de los componentes es sencilla.

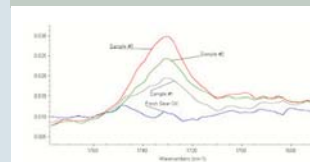
Cuando se utiliza como una herramienta para el análisis de aceites usados se pueden observar

tendencias a lo largo de la vida de la máquina y aceite. Estas características aparecen como bandas o zonas de diferentes colores, densidades e incluso metales de desgaste no deseados. Lo primero que se debe hacer es analizar el aceite nuevo para obtener una línea base. Lo siguiente que se debe realizar es analizar las muestras con diferentes horas de trabajo y estados de degradación. Unos cambios en las apariencias de las bandas/zonas son indicativos que algún cambio se ha producido en el lubricante. Como la gran mayoría de los métodos analíticos, este método no predice el futuro funcionamiento de la máquina, sino que indica es estado en el momento del muestreo. Un análisis más detallado de las zonas podrá indicar si existe una alta cantidad de metales de desgaste, agua de contaminación, etc.

A continuación se muestra un ejemplo de un aceite de engranajes:



*Como se puede observar en la figura el aceite #1 tiene el mismo AN que el nuevo pero se observan productos de oxidación, confirmado mediante FTIR.*



El FTIR muestra la presencia de productos de oxidación en los aceites usados. La confirmación se realiza por la medida de la banda de carbonilos en la región de  $\sim 1740 \text{ cm}^{-1}$ .

La presencia de compuestos de oxidación se manifiesta por la coloración de la zona centro de la mancha y por la densidad de la zona exterior de la misma. Muchos de los problemas encontrados en las maquinas están relacionados con el lubricante utilizado o por la contaminación existente en su seno. El sumatorio de estos dos problemas está en torno al 60-65% de los casos. Por eso, el método que se ha descrito antes ayuda al mantenimiento, cambios de aceite, y en general una disminución en el coste las todas las operaciones.

La secuencia que se debe realizar es la siguiente:

- ➔ Establecer la línea base para el aceite nuevo para cada máquina.
- ➔ Analizar manchas regularmente para observar si se observan cambios en los resultados.
- ➔ Si se observan cambios significativos se debe enviar una muestra al laboratorio para un análisis más detallado.

# bombas

Suministramos bombas de fluido, estas bombas de vacío son pequeñas y de fácil manejo. Creadas originalmente para el muestreo del aceite, las bombas han demostrado ser útiles en gran variedad de situaciones.

Las compañías implicadas en medioambiente, química, lubricantes, agua y en el muestreo de material peligroso, encuentran en las bombas una herramienta inestimable.

Las bombas logran un vacío de 27 pulgadas de Hg (mercurio). El tubo de muestreo se inserta a través del dispositivo acoplador hasta que el extremo inferior del tubo alcanza la parte superior del recipiente. Cuando el acoplador se gira para apretar el sello, el vacío arrastra el líquido directamente dentro de la botella sin entrar en contacto con la bomba. Esta característica patentada permite tomar múltiples muestras sin tener que llevar a cabo la limpieza de la bomba entre tomas.

## Bomba Ideutveckling X-38



[www.oilsampling.com](http://www.oilsampling.com)

## Bomba Ideutveckling X-38



### ☞ MANTENIMIENTO PROACTIVO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE ACEITE. NIVEL BÁSICO.

BARCELONA, 15-16 ABRIL 2008  
BILBAO, 20-21 OCTUBRE 2008

### ☞ MANTENIMIENTO PROACTIVO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE ACEITE. NIVEL AVANZADO.

BARCELONA, 13-14 MAYO 2008  
BILBAO, 22-23 OCTUBRE 2008

### ☞ MEJORES PRÁCTICAS DE LUBRICACIÓN DE MAQUINARIAS. NIVEL BÁSICO

MADRID, 19-20 FEBRERO 2008

### ☞ MEJORES PRÁCTICAS DE LUBRICACIÓN DE MAQUINARIAS. NIVEL AVANZADO

MADRID, 4-5 MARZO 2008

### ☞ SEMINARIO DE OBRA PÚBLICA

MADRID, 18-19 NOVIEMBRE 2008



CURSOS DESARROLLADOS Y ACTUALIZADOS POR JAMES C. FITCH E IMPARTIDOS BAJO LICENCIA DE NORIA CORPORATION



# Conocer el Mecanismo de Formación de Barnices como parte de Técnicas Analíticas para Programas de Monitoreo de Aceite de Turbina de Gas

❖ Jesús Terradillos ::TEKNIKER, Eibar, Spain :: [jterradillos@tekniker.es](mailto:jterradillos@tekniker.es)  
❖ Jo Ameye :: Fluitec International, Brussels, Belgium :: [j.ameye@fluitec.com](mailto:j.ameye@fluitec.com)  
❖ Greg Livingstone :: EPT Inc, USA :: [glivingstone@cleanoil.com](mailto:glivingstone@cleanoil.com)

## Introducción

Como consecuencia de los grandes cambios realizados en las últimas décadas en el diseño y condiciones de trabajo (picos vs. ciclos) de las turbinas de gas, así como los cambios en las formulaciones del aceite, se ha generado un fenómeno relacionado con el aceite denominado Barniz o Laca. La formación de barnices es considerado por muchos como el principal parámetro a controlar en los nuevos lubricantes de turbinas de gas.

Como reto está el ser capaces de determinar el tiempo onset de formación de barnices, ya que hoy en día no se pueden determinar los compuestos precursores de la degradación del lubricante mediante las técnicas de análisis clásicas. Se ha observado un cambio en los aceites base para lubricantes de turbina utilizados en todo el mundo, de los API Grupo I a los Grupos II y III. Ello ha conllevado a nuevos modos de fallo que no pueden ser detectados fácilmente con técnicas tradicionales como AN, RPVOT y viscosidad. De esta manera se ha creado la necesidad de desarrollar nuevos métodos para realizar el seguimiento de este tipo de fluidos.

En artículos de investigación anteriores se ha documentado el papel e importancia que los antioxidantes (fenoles y/o aminas) pueden proporcionar a la protección del aceite, como parte de los requerimientos del mantenimiento del fluido, frente a la formación de barnices. Cuando el porcentaje de aditivos antioxidantes remanentes (Vida Útil Remanente o RUL%) disminuye, el proceso de formación de barnices se acelera.

Es un reto para la industria evitar dicha formación de barnices, por lo que es muy importante tener un buen programa de monitoreo y programa de control de aceites de turbina. En este estudio de investigación se han muestreado diferentes aceites de turbina de gas a ciertos intervalos de tiempo para evaluar el consumo de antioxidantes frente a otras técnicas analíticas: RULER, QSA™, FTIR, viscosidad, RPVOT y control de la contaminación. Además de la cantidad de información que este grupo de técnicas analíticas seleccionado pueda proporcionar con respecto a la predicción de la formación de barnices, también se va investigar los pasos que se deben tomar para minimizar dicha formación de barnices, así como las posibles soluciones para la formación de barnices en aceites de turbina de gas.

## Cambios en los aceites de turbina y condiciones de trabajo.

La primera cuestión en tratar debería ser por qué la formación de depósitos y barnices se ha convertido de repente en una cuestión tan relevante para la mayoría de los usuarios de turbinas de gas. La respuesta a esta pregunta puede encontrarse parcialmente en los

grandes cambios y evoluciones que se han producido en los últimos 10 años a dos niveles:

- > Aceite de turbina y tecnología de los aditivos
- > Condiciones de trabajo de las turbinas

Los aceites de los Grupos API II y III se han desarrollado para proporcionar, entre otras, una mejor estabilidad frente a la oxidación y sustituir a los aceites Grupo I. Los aceites Grupo I son fluidos que tienen mejores características de solvencia, debido a su mayor contenido en compuestos aromáticos. Otra ventaja de las formulaciones de aceites de turbina de gas Grupo II/III es que el aceite base está más positivamente influenciado por cierto tipo de compuestos antioxidantes. Los aceites de turbina pueden alcanzar valores de estabilidad a la oxidación mucho mayores (ASTM D2272, D973) comparados con los del Grupo I. Esto ha tenido un impacto en la química de la formulación.

Los aceites de turbina consisten en aproximadamente 99% de aceite base y 1% de aditivos. El componente más importante del sistema de aditivos es el sistema antioxidante, aunque un aceite de turbina también puede incluir inhibidores de la herrumbre y corrosión, antiespumantes, desemulsionantes y en algunos casos aditivos EP.

Los dos tipos de antioxidantes más comúnmente utilizados para aceites de turbina de nueva generación son dos antioxidantes primarios: aminas aromáticas y fenoles. Los antioxidantes primarios actúan recogiendo los radicales con el fin de neutralizar la formación de productos de degradación dañinos. El contenido en antioxidantes primarios es fundamental para minimizar la acumulación de productos de oxidación, los cuales son los responsables del comienzo de las reacciones de formación de los barnices. Las aminas tienen un comportamiento superior a altas temperaturas de trabajo, mientras que los fenoles lo hacen a temperaturas menores. Los fenoles poseen una función adicional, la de "rejuvenecer" las aminas consumidas y, de esta manera, aumentar la vida de las aminas en el sistema. La combinación de antioxidantes amínicos/fenólicos actúan como una mezcla sinérgica [1]. Ambos son importantes para proteger al aceite frente a la auto-oxidación. El consumo de los antioxidantes está estrechamente relacionado con la vida y funcionamiento del fluido. Por ello, es vital realizar un seguimiento de sus concentraciones individuales [1,3].

En segundo lugar, el parque de turbinas se ha dirigido hacia temperaturas de trabajo del fluido mayores, así como un incremento en la velocidad del flujo en las modernas turbinas de aviación, lo cual tiende a formar mayor cantidad de compuestos de oxidación y un mayor consumo de los antioxidantes. Además, en la industria de generación de energía se ha cambiado la forma de trabajar. Además, la industria de generación de energía ha pasado de trabajar en continuo a trabajar en condiciones de picos y ciclos. Esto ha provocado que se genere mayor estrés térmico para el lubricante y se pueda acelerar la formación de depósitos y barnices.

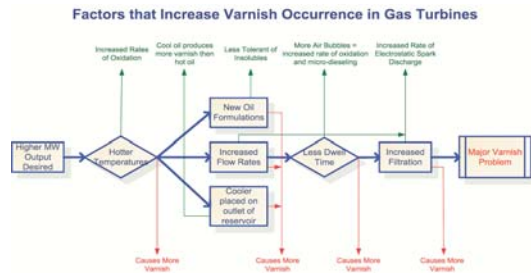


Fig1: Algunas de las causas clave de la formación de depósitos de barnices en turbina de gas. Fuente: EPT Inc.

La conjunción de estos dos factores: cambios en la formulación del aceite base, junto con los cambios de diseño y régimen de trabajo, han acelerado la formación de barnices. En el siguiente apartado se describirá el mecanismo de formación de barnices.

## Mecanismo de reacción de oxidación, las causas y consecuencias.

Cuando el paquete de antioxidantes de los lubricantes de turbina en servicio se consume, los fluidos corren el riesgo de formación de barnices. En el diseño de turbinas de gas actuales se genera un proceso denominado auto-degradación [1, 2], el cual puede ser definido como una generación automática de contaminantes blandos en el cuerpo de un aceite frío y estático. Las zonas de bajo flujo y frías del sistema hidráulico de una turbina puede desarrollar depósitos, incluso aunque el depósito tenga poca tendencia a formar barnices y este libre de insolubles. En el circuito hidráulico, el aceite está saturado de contaminantes solubles los cuales precipitan para formar precipitados insolubles, los cuales pueden separarse del aceite para formar barnices. El fenómeno de la auto-degradación impide que la limpieza del aceite sea satisfactoria con tecnologías de eliminación de barnices de filtro riñón, tales como filtros de aceite electrostáticos, ya que la mayoría de los contaminantes son solubles. Las turbinas de gas más susceptibles a la auto-degradación y de generar barnices son aquellas que comparten el tanque hidráulicos y de lubricación y operan en condiciones de picos/ciclos. El impacto de la auto-degradación en una turbina de gas puede verse en la Fig. 2. A pesar de que esta turbina tiene instalado un filtro riñón, el sistema es todavía vulnerable al atascamiento de la válvula.

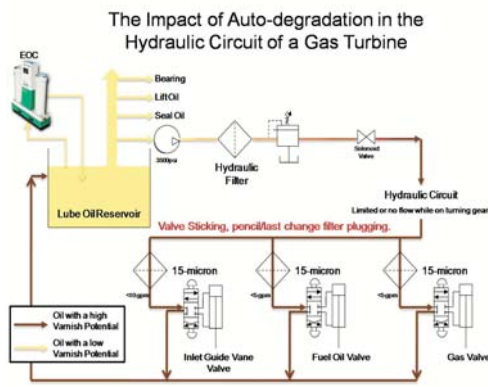


Fig. 2: Diagrama simplificado del circuito de aceite hidráulico de una turbina de gas.

Los contaminantes blandos insolubles son de naturaleza polar, por lo que no se encuentran "a gusto" en un seno apolar, como es el aceite de turbina. Las superficies metálicas son dipolares, por lo tanto estos contaminantes formarán superficies empapadas de aceite, normalmente

en zonas de temperaturas frías y flujos bajos. Una excepción de esto es si existe un punto caliente en el sistema, ya que puede formar depósitos carbonosos instantáneos en dicho punto.

Otra de las causas de la degradación del fluido en una turbina de gas son las descargas eléctricas desde los filtros. Aceite altamente refinados, con baja humedad y bajos niveles de aditivos, los cuales fluyen a través de áreas muy estrechas tienen potencial de crear electricidad estática [9]. Esta energía potencial se eliminan en forma de descarga eléctrica, la cual puede ser de varias centenares de grados. El cambio de la industria de generación eléctrica a filtros sintéticos de vidrio con relaciones beta y micraje más ajustados ha creado este efecto colateral imprevisto. Como resultado de estas descargas se rompen moléculas que, a su vez consumen los antioxidantes, lo que conlleva a la formación de depósitos.

La oxidación es el proceso inicial de la formación de barnices. En este punto, los productos de oxidación solubles se condensan y polimerizan formando oligómeros mediante reacciones tipo Condensación Aldólica. Después de algún tiempo, estos oligómeros llegan al punto de saturación del fluido, el cual depende tanto de la temperatura de trabajo como de las condiciones de flujo. Una vez que se ha alcanzado el punto de solubilidad, los contaminantes precipitan formando partículas insolubles. Este tipo de partículas también se denomina Contaminantes Blandos, los cuales poseen un tamaño medio de aproximadamente 0.08 micras. Los contaminantes blandos son de naturaleza polar y se atraen entre ellos. Dependiendo de las condiciones de flujo del sistema se formarán en el seno del mismo aglomerados de contaminantes blandos, los cuales se irán depositando en diferentes partes de la máquina generando los depósitos de barnices. Este proceso se ilustra en la Figura 3.

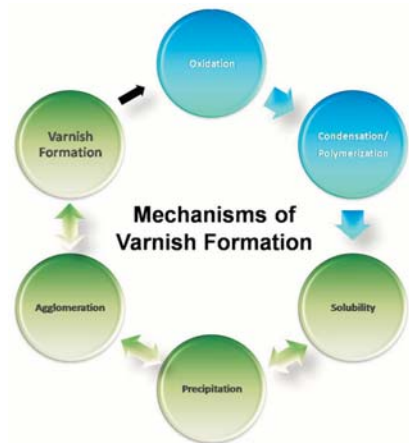


Fig. 3: Mecanismo de formación de barnices de un aceite de turbina de gas.

Un apunte interesantes sobre este diagrama es que existe una doble flecha entre los estadios de solubilidad – precipitación – aglomeración – formación de barnices. Esto indica que esta reacciones son reversibles. En otras palabras, es posible que las partículas de barniz depositadas en el sistema puedan volver a disolverse en el aceite. La flecha negra indica que el barniz puede ser un catalizador de la formación de más productos de oxidación.

El impacto de los barnices en una turbina de gas puede ser diverso. Lógicamente afecta al sistema de lubricación mediante la formación de barnices (Fig. 4) a partir de productos de oxidación de aceite polimerizado, los cuales contribuyen a los siguientes problemas mecánicos:

- ❖ Restricción o agarrotamiento de las partes mecánicas en movimiento
- ❖ Agarrotamiento de la válvula IGV – causando un funcionamiento defectuoso de la unidad o fallo en el arranque.
- ❖ Aumento del desgaste del componente debido a que los barnices atrapan suciedad y partículas sólidas.
- ❖ Pérdida de la transferencia de calor en el intercambiador de calor
- ❖ Degradación autocatalítica del lubricante
- ❖ Colmatación de componentes con bajo flujo de aceite.

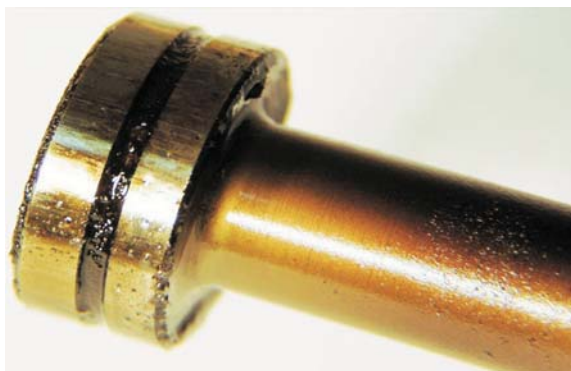


Fig. 4: Depósitos de barnices en una válvula hidráulica

## Técnicas analíticas para el seguimiento de la tendencia a formación de barnices de aceites de turbina.

El hecho de que la mayoría de los contaminantes insolubles tengan un tamaño inferior a 1 micra, hace que la detección mediante las técnicas analíticas tradicionales sea virtualmente imposible. El hecho de que se hayan desarrollado aceites de turbina de nueva generación y la necesidad de medir los precursores de los barnices hace que se tenga que pensar en nuevas estrategias de condition monitoring para dichos lubricantes.

Como parte experimental de este artículo se han utilizado las siguientes técnicas analíticas para estudiar la formación de barnices en un rango amplio de aceites de turbina de gas [11, 12].

Se seleccionaron como principales parámetros para predecir los problemas de barnices la medida del consumo de aditivos antioxidantes utilizando la voltamperometría, el QSA™ y el conteo de partículas. Además, se incluyeron los ensayos de FTIR (para ver los productos de oxidación), gravimetría y espumas. A continuación se describen las diferentes técnicas analíticas utilizadas en este estudio.

**Voltamperometría** – se utilizó un equipo comercial, RULER, y se aplicó la norma ASTM D-6971. Se utilizaron disoluciones electrolíticas neutras para realizar el seguimiento de los antioxidantes amínicos aromáticos y fenólicos, junto con el software de adquisición de datos FLUITEC R-DMS. De esta manera se pudo calcular de manera automática el RUL% por aditivo. Se puede realizar un seguimiento del consumo, tanto de los antioxidantes aminas aromáticas (aparecen entre 8-11 segundos) como fenoles (aparecen a 13-16 segundos) (Fig. 5). El ensayo se puede realizar tanto en laboratorio como en planta.

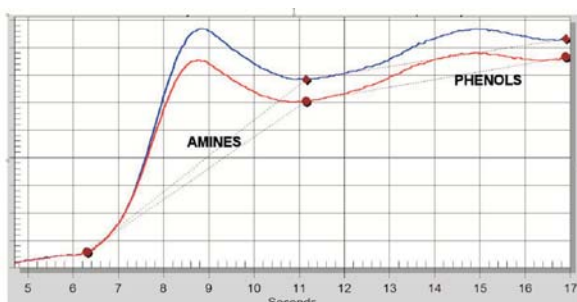


Fig. 5: RULER (voltamperograma) para aceites de turbina de gas modernos (Grupo III) detectando antioxidantes de aminas aromáticas y fenólicos.

**QSA™** – Ensayo desarrollado por Analysts Inc [5] para determinar la tendencia a formación de barnices. La muestra de aceite se mezcla con un disolvente para acelerar la precipitación de los componentes del barniz, y se filtran con ayuda de una membrana. Entonces se analiza el color del filtro: cuanto más oscuro sea su color más severa es la tendencia a formación de barnices. La escala se encuentra entre 1 y 100, siendo 1 el valor de un aceite nuevo y 100 el punto crítico de la formación de barnices. ASTM está desarrollando un ensayo similar referenciado como Membrane Patch Colorimetry (MPC).

Para medir la autodegradación, se realiza el ensayo MPC on-site a intervalos específicos para permitir que la muestra envejezca. Se toma una muestra del tanque al inicio y se ensaya tras 30 minutos de la toma. Entonces se hace lo mismo a una muestra envejecida tras 72 horas de trabajo de la turbina (Fig. 6). Si los filtros de la muestra oscurece demasiado tras la toma de 72 horas, se evidencia un proceso de auto-degradación. Existe un punto en la auto-degradación en la cual el filtro no se oscurece más, lo cual normalmente ocurre entre las 72 y 96 horas. El proceso es reversible recalentando el aceite, ya que los compuestos de degradación insolubles vuelve a ponerse en disolución.

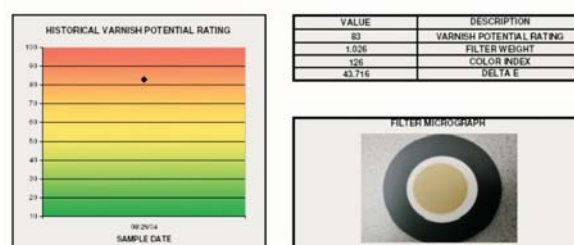


Fig. 6: Ejemplo de un análisis QSA de una membrana de un aceite de turbina.

**FTIR** – El FTIR puede detectar productos de degradación del lubricante, así como algunos aditivos. Los espectros fueron tomados con un FTIR y una celda de flujo de 0.1 mm de espesor. La zona de oxidación se mide en la región de 1800-1670  $\text{cm}^{-1}$  con dos puntos de corrección de línea base; izda. de 2200 to 1800  $\text{cm}^{-1}$  y dcha. 650-550  $\text{cm}^{-1}$  (Fig. 7).

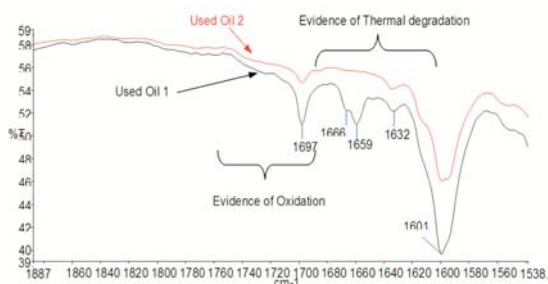


Fig. 7: Espectro de dos aceites de turbina usados mostrando diferentes mecanismos de degradación.

**Test de la Membrana** – En el ensayo de la membrana se hace pasar una cantidad de muestra de aceite (~ 5 g) a través de membranas de diferente micraje (5.0  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$ , 0.8  $\mu\text{m}$  y 0.22  $\mu\text{m}$ ) para determinar el peso de los diferentes tamaños de contaminantes (Fig. 8). Inicialmente, el aceite se mezcla con un disolvente no-polar (por ejemplo, 100 ml de heptano). A continuación, se aplica vacío al sistema para hacer que se filtre la mezcla aceite/disolvente.

Una vez que todo el aceite ha sido filtrado, se añade una cantidad extra de disolvente (25 ml) para limpiar todas las paredes del dispositivo.

A continuación los filtros se secan en una estufa y se introducen en un desecador. Tras ello, se pesan y se calculan las cantidades y porcentajes de cada uno en peso de residuo.

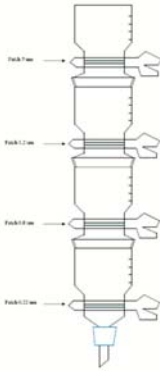


Fig. 8: Equipo de filtración

**Contaje de Partículas** – El contaje de partículas consiste en medir la contaminación de un lubricante por medio del contaje del número de partículas y clasificación del nivel de contaminación basado en el tamaño/concentración de esas partículas. Se suele utilizar el informe de la escala ISO 4406 para medir los contaminantes duros presentes en el sistema de tamaño 4 micras y superiores. Conocer el grado de limpieza de un fluido es esencial para realizar un buen control de la contaminación del sistema. Este ensayo sólo está recomendado para “Sistemas hidráulicos u otro tipo de sistemas limpios como Turbina”, en los cuales los niveles de contaminación son bajos. Hoy en días, la medida del contaje de partículas se ha extendido a cualquier sistema lubricado, ya que existe una gran correlación entre la contaminación de partículas y el fallo del sistema. Existen diferentes tipos de estándares internacionales (ISO, NAS,...) utilizados para clasificar el fluido basado en la cantidad de contaminantes presentes en suspensión. La mayoría de ellos clasifican el grado de limpieza del fluido de acuerdo con la cantidad de contaminantes para cada rango de tamaños. Un código ISO de limpieza típico para aceites de turbina de gas es 17/15/12.

El código ISO está formado por tres números R1/R2/R3. El primer número indica el número total de partículas por mililitro con un tamaño superior a 4 micras, el segundo indica el número total de partículas por mililitro con un tamaño superior a 6 micras mientras que el tercero indica el número total de partículas por mililitro con un tamaño superior a 14 micras. Los dos primeros dígitos indican la tendencia del aceite de formar depósitos de partículas, mientras que el tercero indica la cantidad de partículas grandes presentes, las cuales pueden contribuir a un fallo catastrófico del sistema.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### Caso 1

En esta primera parte del estudio se realizó un seguimiento a en torno 50 muestras de aceite en los laboratorios de servicios de la Fundación Tekniker. El objetivo de los autores ha sido establecer de manera más profunda las reacciones de formación de los barnices, mediante la utilización de técnicas como RULER (Antioxidantes), Test de la Membrana, Contaje de Partículas y FTIR (oxidación).

Se ha podido observar en la mayoría de las muestras analizadas una marcada relación entre el análisis de las partículas submicrónicas y el consumo de los antioxidantes (Fig. 9).

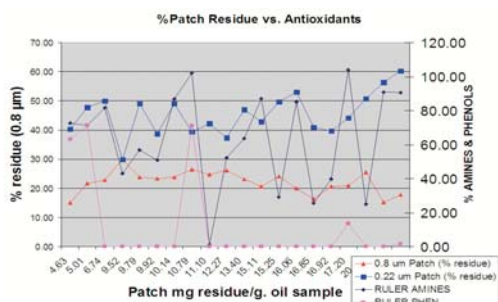
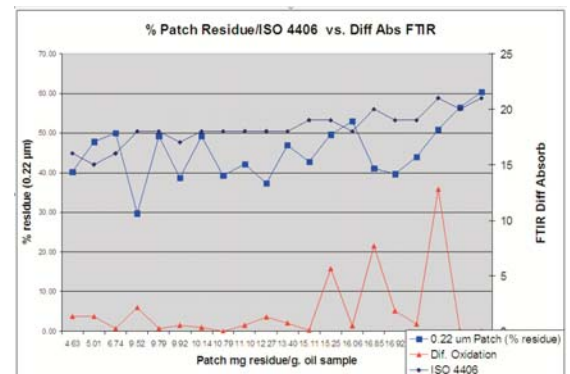


Fig. 9: Correlación entre el residuo gravimétrico (mg/g oil) y los antioxidantes (RULER)

La Figura 9 muestra los datos del residuo gravimétrico (eje X) vs. % residuo para la membrana de 0.8 y 0.22  $\mu\text{m}$ . Se puede observar un aumento desde los valores medio del 40-45%, hasta el 60% o superior para los que posee mayor cantidad de residuo. Además, se observa como el contenido en antioxidantes fenólicos es prácticamente cero, mientras que el valor medio de las aminas aromáticas se encuentra entre el 40-60% del RUL%.

Se puede concluir que bajas concentraciones de fenoles, y concentraciones de antioxidantes normales o altas pueden contribuir a la formación de una mayor cantidad de partículas insolubles finas. Se puede observar algo similar en los valores de FTIR (Dif. Oxidación = Oxidación Muestra - Muestra de Menor Oxidación) comparando entre el dato de 0.22  $\mu\text{m}$  y el contaje de partículas ISO 4406 (Fig. 10). Publicaciones recientes indican tendencias similares [13].

Fig.10 : Correlación entre % de depósitos submicrónicos (0.22  $\mu\text{m}$ ), contaje de partículas ISO 4406 y banda de oxidación por FTIR.

Para finalizar se realizaron fotografías de las diferentes membranas de las muestras para poder visualizar el color de los depósitos de aceite. Basado en los estudios del Dr. Sasaki [8], los aceites con alto contenido en productos de degradación poseen un color que se encuentra en el rango 300-500 nm del espectro electromagnético. En la siguiente figura se muestran unos filtros típicos.



Fig. 11.: Imágenes digitales de las membranas de tres muestras de aceite con alto contenido en depósitos.

### Caso 2

En la segunda parte de este estudio se seleccionaron en torno a 100 muestras de aceite de turbina, las cuales eran aceites usados de turbinas de gas de diferentes fuentes. Las muestras eran de varias unidades y con amplio rango de antigüedad. A dichas muestras se les ensayó con el QSA™, así como con el RPVOT, desmulsionabilidad, espuma, Contaje de Partículas y la concentración individual de los antioxidantes mediante el RULER.

Se puede extraer interesantes análisis de los resultados obtenidos.

Se ve claramente que el tipo de aplicación del aceite de turbina juega un papel muy importante en la tendencia a formar barnices, como se observa en la Figura 12.

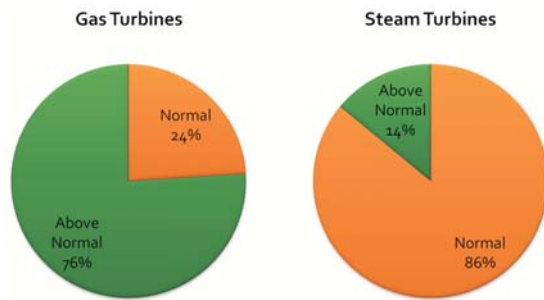


Fig. 12: Comparación del comportamiento frente a la formación de barnices de los aceites de turbina de gas vs. vapor.

Como se puede ver en la Figura 13, el modelo de la turbina de gas parece que juega un papel importante en la tendencia a la formación de barnices. Las unidades con la tecnología "F" parece que poseen unos potenciales a formar barnices superiores a otros tipos.

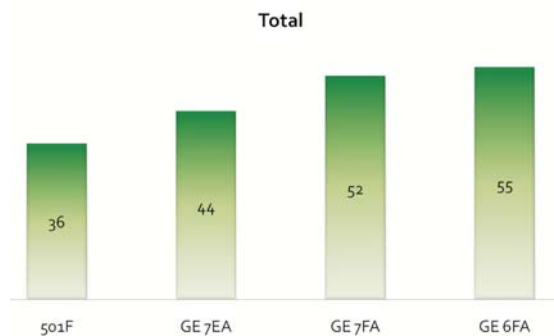


Fig. 13: Valor medio de la Tendencia a la formación de barnices en varios modelos de turbina de gas.

Es evidente que la formulación química del aceite influye de manera muy acusada en la tendencia a formación de depósitos de los fluidos en servicio (Fig. 14).

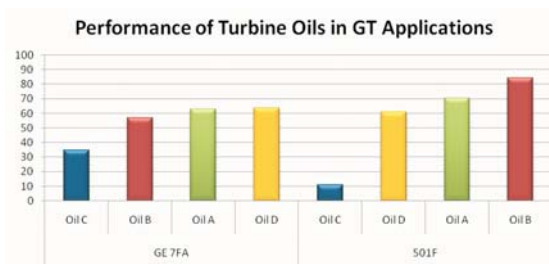


Fig. 14: Tendencia a la formación de depósitos (Eje Y) de cuatro aceites de turbina en servicio diferentes (Eje X).

Se seleccionaron cuatro tipos de aceites y dos modelos turbinas de gas. Todos los tipos de aceite tuvieron número de datos similares. El aceite "C" claramente muestra un valor de QSA™ considerablemente inferior en ambos tipos de turbina de gas. La experiencia de campo ha demostrado este aceites es el menos problemático de los aceites de turbina de gas analizados.

Cuando se observa la relación entre el RPVOT y la tendencia a la formación de barnices, lo primero que se observa es que los valores del RPVOT son una dispersión que van desde 100 a 4000 minutos, lo que puede indicar que el ensayo del RPVOT no sea el adecuado como único ensayo para evaluar la estabilidad a la oxidación de aceites de turbina de los tipo Grupo II/III.

La segunda observación que se puede extraer de los datos es que se manifiesta una clara correlación entre el valor del RPVOT de los aceites y su potencial para formar barnices (Fig. 15). Se observa que cuando mayor es el valor del RPVOT del aceite usado mayor es la tendencia a la formación de barnices. En principio se podría esperar que cuanto menor valor de RPVOT mayor sería la tendencia a formar barnices. Creemos que los datos reflejan un valor del RPVOT mayor en los aceites de turbina nuevos, para aquellos que tienen una mayor tendencia a la formación de barnices, de manera mas acusada que aquellos aceites nuevos con valores de RPVOT iniciales inferiores. La segunda conclusión es que el valor del RPVOT es un mal indicador del potencial para formar barnices, ya que el problema de formación de barnices puede ser severo incluso cuando el fluido posee un valor de estabilidad a la oxidación excelente.

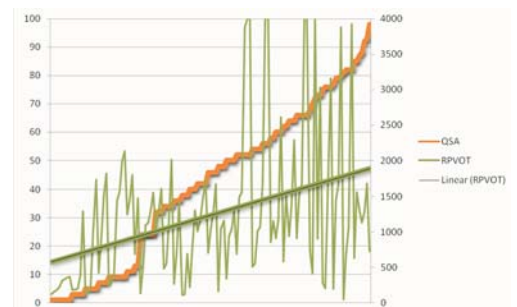


Fig. 15: Relación entre RPVOT y QSA™ para aceites de turbina en servicio.

La siguiente conclusión que se obtiene de los datos se hace evidente cuando se comparan los datos de QSA™ con los del RULER (Fig. 16). Las líneas de tendencia del gráfico muestran una marcada relación inversa entre el consumo de los antioxidantes fenólicos y el aumento del valor de QSA™.

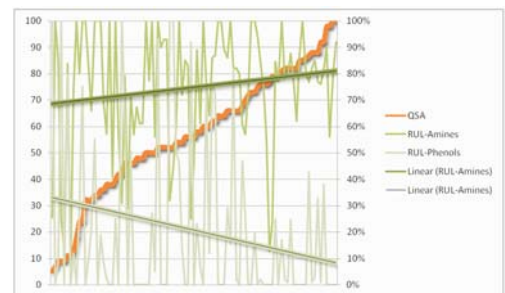


Fig.16: Relación entre el nivel de antioxidantes y valores del QSA™ para aceites de turbina en servicio.

La tendencia observada en la figura 16 relaciona el aumento en el valor del QSA™ con el consumo de los antioxidantes fenólicos. Estos resultados son corroborados por los obtenidos en Caso 1 descrito más arriba. Los fenoles detienen la propagación de los radicales libres, previniendo la formación de barnices como consecuencia de la acumulación de contaminantes solubles. Se puede concluir que cuando los fenoles están presentes en concentración muy baja no son capaces de regenerar los antioxidantes amínicos, por lo que se acelera el proceso de formación de depósitos/ barnices. Esto se puede explicar con el hecho de que los fenoles actúan previniendo la formación de contaminantes blandos, deteniendo el proceso de oxidación y aumentando la vida de las aminas [1].

## Tecnologías de Control de la Contaminación para Controlar los Barnices en Aceites de Turbina de Gas

Las tecnologías de filtración mecánicas no son capaces de eliminar los contaminantes insolubles que conducen a la formación de barnices debido a su tamaño extremadamente pequeño. Muchas plantas han encontrado que el uso de filtros de aceite electrostáticos son efectivos en la eliminación de este tipo de contaminantes. Los filtros electrostáticos provocan que las partículas insolubles se carguen, en función de su tamaño, y recogerlas en una zonas especiales del filtro. La tecnología tiene capacidad de eliminar contaminantes hasta 0.01 micras. En la Fig. 17 se puede observar uno de estos dispositivos.



Fig. 17: Unidad de Filtración Electroestática acoplada a una turbina de gas.

Los filtros electrostáticos se instalan en un filtro riñón colocado en el tanque principal de aceite. Una vez que se ha filtrado el aceite usado de turbina con el filtro electrostático, el fluido tiene la capacidad de separar del aceite el barniz que se había depositado dentro del sistema. En esencia, la tecnología no solo limpia el aceite, sino que también las partes internas del sistema.

Pero, ¿que pasa si el fluido sufre una auto-degradación y la mayor parte de los subproductos de degradación son solubles? La filtración electrostática solo actúa sobre los contaminantes insolubles, por lo que no es efectiva. En estos casos, es posible eliminar los contaminantes insolubles a través de un proceso patentado denominado Ion Charge Bonding. Esta tecnología utiliza una mezcla de resinas intercambiadoras de iones para eliminar cuidadosamente los contaminantes solubles sin eliminar otro tipo de compuestos solubles, por ejemplo aditivos antioxidantes. Este método se ha mostrado efectivo para frenar la auto-degradación.

## Estrategias de re-aditivación como parte de un Procedimiento de Mantenimiento del Fluido

En vista de los resultados obtenidos en este estudio se observa que los problemas comienzan una vez que el aditivo fenólico se ha consumido. Los investigadores están estudiando la viabilidad de adicionar aditivo fenólico a los aceites en uso de turbina de gas. Es interesante indicar que la adición de fenoles realmente aumenta la cantidad de aminas en el fluido, ya que regenera algunas de las especies degradadas (Fig. 18). Los resultados del FTIR y RULER son también muy consistentes.

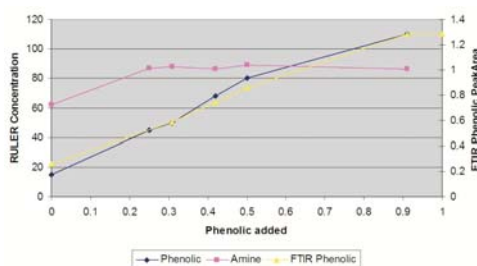


Fig. 18: Concentración individual de aditivos, RULER vs. área pico FTIR

La re-aditivación es técnicamente factible, y si se hace con cuidado, el riesgo es muy bajo. Esta práctica tiene la capacidad de incrementar la vida del aceite de turbina varios ordenes de magnitud.

## CONCLUSIONES

La química de los antioxidantes está jugando un papel importante en el funcionamiento en continuo y altas temperaturas de los lubricantes de turbina modernos. La evaluación cuidadosa del paquete de aditivos antioxidantes, en combinación con la tendencia a la formación de barnices, es un parámetro importante en los servicios de diagnóstico de los aceites de turbina actuales, donde métodos como el AN y RPVOT no son capaces de alertar a los usuarios de la turbina del tiempo onset de auto-degradación.

- Los métodos tradicionales de análisis son incapaces de determinar el potencial de formación de barnices de un lubricante.
- Los ensayos de condition monitoring importantes de aceites de turbina modernos incluyen RULER, FTIR y MPC (QSATM). Estos ensayos realizan un seguimiento del paquete de aditivos y formación de contaminantes blandos.
- La filtración electrostática es una tecnología importante a la hora de eliminar los compuestos de degradación insolubles precursores del barniz. Si se une la tecnología de Ion Charge Bonding, la cual elimina los compuestos de degradación solubles, se tendrá un correcto control de contaminación del sistema.
- Existe una clara correlación entre las partículas mayores de  $4 \mu\text{m}$  y el porcentaje de residuo encontrado en los filtros de menos de  $1 \mu\text{m}$  (0.8 y 0.22). En este mismo sentido se encuentra una clara relación entre el RULER, Filtración Gravimétrica y Contaje de Partículas. Sin embargo, se debería seguir estudiando este fenómeno en el futuro.
- Un buen programa de análisis de aceite de rutina debería incluir el RULER, FTIR y MPC, además de los tradicionales (AN, Viscosidad, Contaje de Partículas, etc.). El proceso de re-aditivación con antioxidantes ha sido comprobado técnicamente. Las operaciones futuras de mantenimiento de las turbinas de gas incorporarán esta re-aditivación del fluido para aumentar la vida y operación de sus fluidos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] – William Moehle, and Vincent Gatto, Albemarle Corp, Dave Wooton, Wooton Consulting and Greg Livingstone, EPT Inc. – "Practical Approaches to Controlling Sludge and Varnish in Turbine oils" – NORIA LE2007, Louisville, May 2007,
- [2] – Greg Livingstone and Jon Prescott, EPT Inc and Dave Wooton, Wooton Consulting – "Beyond Varnish – Gas Turbine Valve Sticking
- [3] – ASTM D-6971 – Standard Test Method for monitoring of Amine and Phenolic Antioxidants in non-zinc containing Turbine Oils by Linear Sweep Voltammetry
- [4] – A. Yano, S. Watanabe, Y. Miyazaki, MHI Ltd, Y. Yamamoto, Kyushu University – "Study on Sludge Formation during the Oxidation Process of Turbine oils" – Tribology Transactions, 47, 111-122, 2004, Presented at the STLE/ASME Tribology Conference, October 2003, Florida
- [5] – Brian Thompson, Analysts, Inc., Greg Livingstone, Clarus Technologies - "Using Quantitative Spectrophotometric Analysis as a Predictive Tool To Measure Varnish Potential", IMC 2004
- [6] – Sitton, A.; Focus Laboratories, Ameye J.,Kauffman R.E. – "Residue analysis on RPVOT test samples for single and multiple antioxidants chemistry for turbine lubricants" – ASTM JAI, December 2005, ASTM Turbine oil symposium, Norfolk VA, USA
- [7] – Gato, V.J.; Moehle, W.E.; Schneller, E.R.; Cobb, T.W., – "The Relationship Between Oxidation and Antioxidant Depletion in Turbine Oil Formulations with Group II, III and IV Base Stocks? J.Syn. Lubr., submitted
- [8] – Yamaguchi, T.; Kawaura, S.; Honda, T.; Uede, M.; Iwa, Y.; Fukui University and Sasaki, A., Kleentek Ind. Co. Ltd., – "Investigation of Oil Contamination by Colorimetric Analysis", STLE/ASME Tribology Conference presentation San Francisco, CA, October 2001,
- [9] Sasaki, A., Uchiyama, S. (April, 2000) "Production of Free Radicals and Oil Auto-Oxidation Due to Spark Discharges of Static Electricity" Proceedings for NFPA International Exposition for Power Transmission and Technical Conference
- [10] Sasaki, A, et al (2002). "Mechanism of Adsorption and Desorption of Oil Oxidation Products on and from Metal Surfaces". Kleentek Industrial, Tokyo.
- [11] Terradillos, J., "Turbine lubrication and its maintenance by means of oil analysis" Ingeniería y Gestión del Mantenimiento, pp. 59-67, Nov-Dic 2003. (Spanish).
- [12] <http://www.wearcheckiberica.es>
- [13] Burgmer, J, Bayer Technology Services, "Oxidationsverhalten von Turbinenölen – Sortenvergleich unter Praxisorientierten Versuchsbedingungen" Veröffentlichung im VGB-Arbeitskreis Gasturbinen 19.04.2007, St. Ingbert



2008

## LUBRICACIÓN Y MANTENIMIENTO



ik4 research alliance



TEKNIKER  
WEARCHECK IBÉRICA  
Avda. Otaola 20. Apdo.44  
20600 EIBAR  
Gipuzkoa

[www.tekniker.es](http://www.tekniker.es)  
[www.wearcheckiberica.es](http://www.wearcheckiberica.es)