

## DETERMINATION OF PROCESSES OF AGING IN SYNTHETIC OILS IN AVIATION

Leal De Rivas, Beatriz<sup>1</sup>; Vivanco Bono, José Luis<sup>2</sup>; Capuz-Rizo, Salvador F.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Metropolitana de Caracas, <sup>2</sup> Universitat Politècnica de València – CIBER de Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN) –Valencia, <sup>3</sup> Universitat Politècnica de València

The degradation of an oil can be caused by three main mechanisms, hydrolysis, oxidation and thermal decomposition. This paper has analyzed a synthetic oil with characteristics of Type II thermal and oxidation stability, load capacity and flow characteristics at low temperatures. The effect of opening the can for 6 months was analyzed and it was found that when removing the oil immediately absorbs humidity increasing acidity in a small amount. The effect of light was also analyzed and suffered but little change in the observation period, is to highlight the great blackout suffered by the samples exposed to light. The oils were subjected to controlled aging exposing them to conditions that could cause decomposition and consumption of its two main additives. Different mixtures of oil, water and catalysts in the presence of moisture and metal catalysts (iron and copper) were prepared. In the samples with metal catalysts was observed that the greater the presence of iron was increased degradation rate and lower in the presence of copper, the same effect observed in the presence of water.

**Keywords:** Oils analysis; Aviation; Aging

## DETERMINACIÓN DE LOS PROCESOS DE ENVEJECIMIENTO EN ACEITES SINTÉTICOS EN AVIACIÓN

La degradación de un aceite puede ser producto de tres mecanismos fundamentales, hidrólisis, oxidación y descomposición térmica. En este trabajo se ha analizado un aceite sintético de Tipo II con características de estabilidad térmica y oxidación, capacidad de carga y características de fluidez a bajas temperaturas. Se analizó el efecto de abrir la lata, durante 6 meses y se encontró que al extraer el aceite inmediatamente absorbe humedad del ambiente aumentando su acidez en una pequeña cantidad. También se analizó el efecto de la luz y aunque sufrieron pocos cambios en el periodo de observación, es de destacar el gran oscurecimiento sufrido por las muestras expuestas a la luz. Los aceites fueron sometidos a envejecimiento controlado exponiéndolos a las condiciones que podrían producir su descomposición así como el consumo de sus dos aditivos principales. Se prepararon distintas mezclas de aceite, agua y catalizadores en presencia de humedad y de catalizadores metálicos (Hierro y Cobre). En las muestras con catalizadores metálicos se observó que cuanto mayor era la presencia de hierro aumentaba la tasa de degradación y menor en presencia de Cobre, observándose el mismo efecto en presencia de agua.

**Palabras clave:** Análisis de aceites usados; Aviación; Envejecimiento

Correspondencia: [jvivanco@dpi.upv.es](mailto:jvivanco@dpi.upv.es)

## 1. Introducción

La lubricación es esencial para la correcta operación de todas las maquinarias pudiendo sufrir cambios en su formulación por degradación, para lo cual los lubricantes cuentan con paquetes de aditivos que protegen al equipo y a su aceite base, especialmente al ser sometido a condiciones de alta temperatura, humedad, y contaminantes.

En el ámbito de la aviación a turbina a gas el lubricante tiene como función primordial eliminar el calor y mantener las piezas móviles bajo un régimen de lubricación hidrodinámica en rodamientos, engranajes, torquímetros, entre otros, gracias a la acción de las bombas principales y recuperadoras. En estos sistemas, el lubricante no está en contacto con la cámara de combustión, denominada sección caliente, y las pocas posibles fugas de aceite solo son posibles a través de respiraderos, sellos de los ejes del compresor o de la turbina y de los sistemas de presurización, y poco por el escape (Cuesta, 1980).

El lubricante para esta aplicación es generalmente sintético con aditivos antiespumantes, demulsificantes y especialmente antioxidantes y antidesgaste en bajas proporciones en el rango del 1 al 3%.

La mayoría de los aceites utilizados en aviación cumplen con dos especificaciones americanas principales, MIL-PRF-7808 y MIL-PRF-23699. Los lubricantes que cumplen con la especificación MIL-PRF-23699D, O-156, se conocen como de 2° generación o tipo II STD y sus viscosidades están en el orden de los 5 cSt a 100°C. Hace varias décadas que se desarrolló una formulación mejorada, conocida como HTS o de III generación, con alta resistencia a la oxidación, y que ayuda a impedir la degradación/ oxidación del aceite básico en servicio. Sin embargo su uso se restringe para turbinas nuevas o sometidas a overhaul (reparación total) ya que puede eliminar depósitos presentes en los sistemas de lubricación que podrían obstruir las líneas, razón por la cual un alto % de las turbinas que operan en la aviación (civil y militar) a lo largo del mundo aun operan con el aceite de II generación STD.

El aceite base es un polioléster al que se le añaden aditivos antioxidantes de tipos fenólicos y amínicos como fenilaminas, como por ejemplo PAN (N-fenil-1-naftilamina, (C<sub>16</sub>H<sub>13</sub>N)). También se le añaden aditivos antidesgaste o de lubricidad/ desactivador metálico como pueden ser el trifenil fosfato (TPP) y fosfato tricálcico (TCP), ambos aditivos en concentraciones del orden del 1,5-2 % que tienen como función proteger al aceite de la descomposición térmica y oxidación, y a los componentes y sus piezas del desgaste, respectivamente (Adams, 2007; Whyman et al., 1987).

Cualquier lubricante en servicio o almacenado va a degradarse con el tiempo, lo cual supone cambios en su composición y por tanto en sus propiedades fisicoquímicas produciéndose productos precursores de depósitos de lodos y barniz adsorbidos sobre las superficies metálicas. Los procesos de degradación están asociados a la oxidación, hidrólisis y a degradación térmica, en presencia de oxígeno, humedad y altas temperaturas siendo los aceites sintéticos a base de polyol ester (POE) especialmente higroscópicos por tanto susceptibles a hidrolizarse llegando a producir compuestos ácidos altamente corrosivos reduciendo la vida útil del lubricante, y propiciando desgaste (Shubkin, 1999; Barnes, 2003; Hamada & Nishiura, 1996).

Desde el siglo pasado ha existido una gran preocupación en relación a los posibles procesos de degradación de estos lubricantes (Cottingham & Ravner, 1968), sus productos, e interacción con las aleaciones metálicas y el agua así como los efectos sobre los sistemas, y sobre la salud, por la descomposición de los aceites básicos y agotamiento de sus aditivos (Mangolini et al., 2001; Wyman et al., 1993).

Es importante destacar que en las turbinas, el lubricante tiene como función indudable el evitar el contacto metal-metal, lo cual ocurre principalmente en los momentos de arranque y parada así como a nivel de los dientes de los engranajes de las cajas y de las bombas, en

los cuales el aceite esta bajo condición limite, y con menor probabilidad en su operación normal dado que la mayoría de las piezas operan a régimen hidrodinámico dada las altas velocidades y bajas cargas de ejes/ rodamientos que componen el compresor y la turbina de potencia. Por tanto su función más importante es evacuar calor, especialmente en los componentes de la sección caliente, siendo de especial importancia determinar cambios en las propiedades del aceite como indicador de finalización de su vida útil.

La degradación de un aceite puede ser producto de tres mecanismos fundamentales, hidrólisis, oxidación y descomposición térmica, especialmente en presencia de catálisis metálica de las aleaciones de los componentes del sistema de lubricación, procesos que disminuyen su eficiencia (Mousavi, et al., 2005; Mousavi, et al., 2006; Siouris & Wilson, 2010; Wang & Wood, 2007).

La oxidación es la forma más común de degradación de un aceite en servicio, y ocurre cuando el oxígeno reacciona con el aceite básico, aire que entra al sistema de lubricación especialmente en la etapa de arranque/ puesta en marcha, y en algunos casos durante toda la operación, además el aire cargado de humedad favorece la hidrólisis en los lubricantes a base de esteres sintéticos así como la descomposición térmica, si bien puede ocurrir en ausencia de oxígeno, se asocia a la oxidación puede ocurrir cuando el aceite entra en contacto con superficies calientes o en contacto con burbujas de aire comprimido. En todo caso cada uno de estos procesos disminuye el uso de los aceites.

La gran mayoría de los fabricantes de las turbinas aeronáuticas y fabricantes de lubricantes incluyen en sus manuales, tiempos para cambios de aceite basados en el incremento de dos de sus propiedades, la viscosidad y la acidez del aceite que se determinan mediante metodologías ASTM, se caracterizan por ser lentas y laboriosas.

Muchos trabajos utilizan metodologías de degradación extremas (RPVOT, TOAST, DSC) (Zeman et al., 1984) que no simulan lo que realmente sucede en las películas de aceite en sistemas en funcionamiento y pocos han estudiado lo que realmente sucede entre la película de aceite y las superficies metálicas. Por otra parte, entre las técnicas de evaluación para medir los procesos de degradación de los aceites utilizan desde cromatografías, hasta el FTIR.

Cabe destacar que el Mantenimiento Basado en Condición en la aviación requiere de metodologías instrumentales rápidas y confiables, entre las cuales el FTIR ha demostrado ser una herramienta importante para estimar la evolución de la degradación a nivel molecular del aceite que ha sido estudiado y desarrollado por décadas especialmente en el ámbito de la evaluación de aceites de motores de combustión interna, y más recientemente en aceites sintéticos en operación utilizando técnicas quimiométricas que revelan diferencias sustanciales entre uno y otro producto desarrollado.

La presente investigación tiene como objetivos determinar si a temperatura ambiente (25°C) y a 95°C ocurren procesos de hidrólisis, de autodegradación del aceite básico (POE) y posibles efectos sobre las concentraciones de los aditivos y su acidez bajo condiciones de humedad, y diferentes superficies metálicas.

Este estudio pretende mejorar la comprensión de los procesos químicos subyacentes a los resultados de las pruebas realizadas, utilizando técnicas sencillas de análisis que permitan una visión más detallada de los cambios que se producen con las diversas condiciones de prueba.

## 2. Sección experimental

### 2.1. Materiales

Se utilizó el aceite BP Turbo Oil (BPTO) 2380, es un aceite sintético de 5 cSt de viscosidad a 100°C que está aprobado de acuerdo con la especificación Militar de los Estados Unidos MILPRF-23699F-STD, DEF STAN 91-101/2\* (DERD 2499), y cumple con la mayoría de los motores turbo y los accesorios relacionados. Es un aceite Tipo II con características de estabilidad térmica y oxidación, capacidad de carga y características de fluidez a bajas temperaturas. Este lubricantes se utilizo debido a su diferente comportamiento en condiciones de almacenamiento y en aeronaves con baja frecuencia de vuelo, condiciones en las cuales ciertos aditivos antioxidantes son muy efectivos como descomponedores de peróxidos pero con efectos de tinción y decoloración (Mousavi et al., 2006; Wootton, 2003). Por tanto los cambios de color son importantes y más aun podrían ser asociados a algún parámetro medible tal como acidez (AN), agotamiento del aditivo y estabilidad térmica.

Se emplearon alambres de cobre y de hierro como elementos metálicos catalíticos similares a aleaciones en los sistemas de lubricación de turbinas a gas aeronáuticas. Además se utilizó agua destilada conforme la especificación ASTM D 1193, Type II.

Se prepararon distintas mezclas de aceite, agua y catalizadores en las siguientes proporciones:

- Aceite: 30 ml
- Agua: 1% (volumen)
- Catalizadores: 3 g, en el caso de la presencia de los dos metales cobre y hierro se mantiene el peso constante con aportaciones proporcionales de cada uno.

Bajo estas condiciones experimentales se prepararon las muestras identificadas como BP1 a BP8, tal y como se especifica en la Tabla 1.

**Tabla 1. Muestras preparadas utilizando BP TURBO OIL 2380**

Número de muestra	Componente
BP1	Aceite
BP2	Aceite + agua
BP3	Aceite+Cu+Fe
BP4	Aceite+Fe
BP5	Aceite+Cu
BP6	Aceite + Cu + Fe+ Agua
BP7	Aceite+Fe+Agua
BP8	Aceite+Cu+Agua

### 2.2. Reactor

Para lograr la simulación en condiciones de película fluida en la cual el lubricante se encuentra en capas delgadas sobre superficies metálicas especialmente asociadas a rodamientos, ejes y engranajes; se diseño un sistema de ensayo en viales (probetas) de 50 mL (diámetro interno de 70 mm, altura 13 mm) de aproximadamente 40 cm<sup>2</sup> con cubierta de vidrio en el cual el lubricante estuviese en contacto con los metales que actúan como catalizadores, agua y a distintas temperaturas, de forma similar a lo que ocurre en la realidad en sistemas de lubricación con alto caudal.

## 2.3 Instrumental analítico

Las muestras de aceite frescas y almacenadas fueron analizadas por el método convencional ASTM D664 (ASTM, 2011), determinando su acidez por titulación del aceite con Hidróxido de potasio (KOH) y la viscosidad cinemática fue medida a 100°C, utilizando la norma ASTM D445-72 (ASTM, 2012).

Los espectros infrarrojos fueron obtenidos utilizando un espectrómetro marca Perkin Elmer modelo Spectrum 100 en un rango espectral de (4000- 500) cm<sup>-1</sup>, una resolución de 0,5 cm<sup>-1</sup> y 16 barridos por muestra. Se utilizaron celdas de transmisión de selenuro de Zinc (ZnS) de paso óptico igual a 0,1 mm.

La acidez, consumo de aditivos antioxidantes y antidesgaste, degradación del aceite básico (Break down), se obtuvieron utilizando un espectrómetro Infrarrojo, marca Spectro Inc, modelo FluidScan con una micro- celda de ZnS.

## 2.3 Procedimiento

Se simuló la película lubricante con la exposición de un cierto volumen de aceite que solo cubra una película metálica (catalizador) dentro de capsulas petri.

Se determinaron las condiciones óptimas para la degradación (el envejecimiento) de aceites para lo cual se tuvieron las siguientes variables para cada probeta:

- Volumen: 30 cc de cada aceite
- Temperatura: (95°, 120°, 150° y 220°) C
- Catalizadores metálicos: 3 g de Hierro, de cobre, de (Hierro + Cobre).
- Humedad: 1000 ppm
- Tiempo de exposición: Se estableció como límite de exposición la disminución del 50% de antioxidantes de las muestras sometidas a envejecimiento (% de vida remanente).

## 3 Resultados

### 3.1 Aceite virgen BP 2380.

Con la finalidad de estudiar el envejecimiento del aceite por el único hecho de abrir la lata, se analizaron latas de aceites recién abiertas (frescas) y un aceite que se había abierto 6 meses antes (guardado y sellado). Se encontró que al extraer el aceite inmediatamente absorbe humedad del ambiente presentando una Acidez aproximada de 0,1 (mg KOH/ g de aceite). Al agitar el mismo aceite (expuesto al ambiente) la humedad se incrementa así como la acidez. Esta muestra fue llevada a un deshumificador después de los procesos previos de análisis encontrando que efectivamente bajaba el contenido de agua, se mantenían el resto de los parámetros, pero se incrementaba ligeramente la acidez.

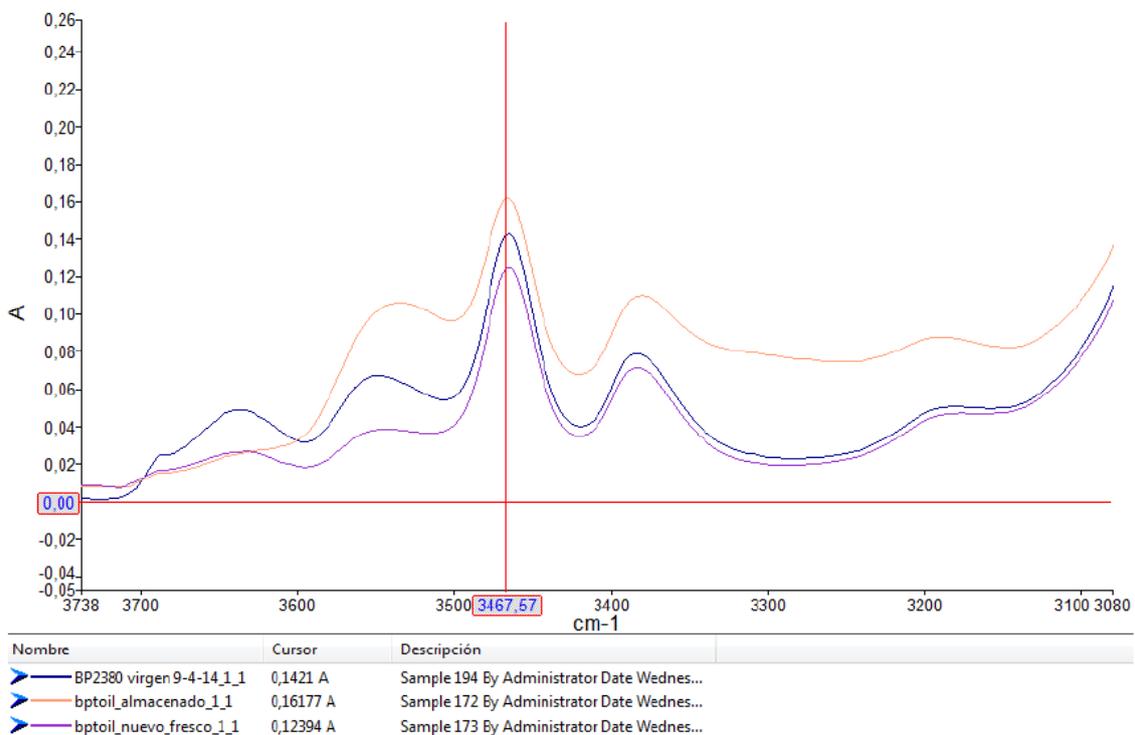
**Tabla 2. Análisis de Aceites Vírgenes BP TURBO OIL 2380.**

Nombre	TAN
BP Nuevo sin agitar	0,11
BP Nuevo sin agitar	0,07
BP Nuevo agitado	0,21
BP Nuevo agitado	0,24

BP Nuevo agitado	0,14
BP Nuevo deshumificado	0,37
BP Nuevo deshumificado	0,36
BP Almacenado	5,55
BP Almacenado	5,49

Al evaluar los resultados del aceite almacenado se encontró que la AN se incrementó hasta 5. Al analizar los espectros IR del aceite fresco y el almacenado encontramos cambios significativos en la región de 3700-3100  $\text{cm}^{-1}$ , región donde aparece el BD del poliolester y el antioxidante (PAN).

**Figura 1. Espectro en la región de 3700-3100  $\text{cm}^{-1}$ , para aceites fresco y almacenado**

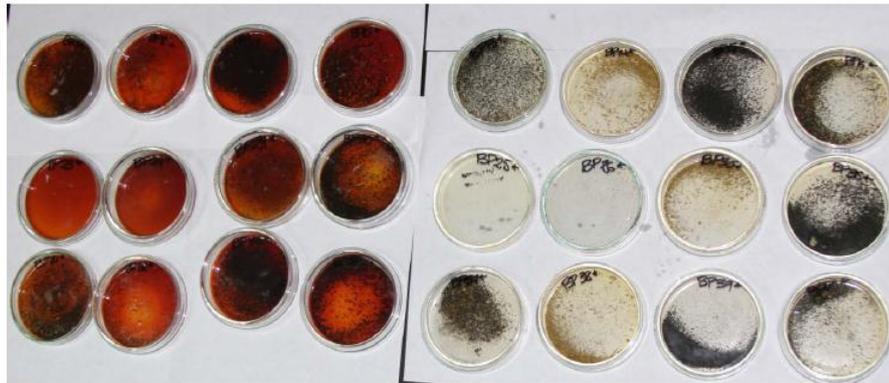


### 3.2 Análisis de muestras envejecidas a temperatura ambiente

Las probetas desde BP1 a BP8 fueron expuestas a la luz mientras que otras se conservaron en oscuridad. Se realizó un seguimiento mensual, y se registraron los resultados durante 8 meses monitorizando los parámetros por FluidScan.

Para las probetas con aceite BP 2380 virgen sufrieron pocos cambios en el periodo de observación. Es de destacar el gran oscurecimiento sufrido por las muestras expuestas a la luz.

**Figura 2. Probetas desde BP1 a BP8 con exposición a la luz y en ausencia de luz**



### 3.3 Análisis de muestras envejecidas a 95°C

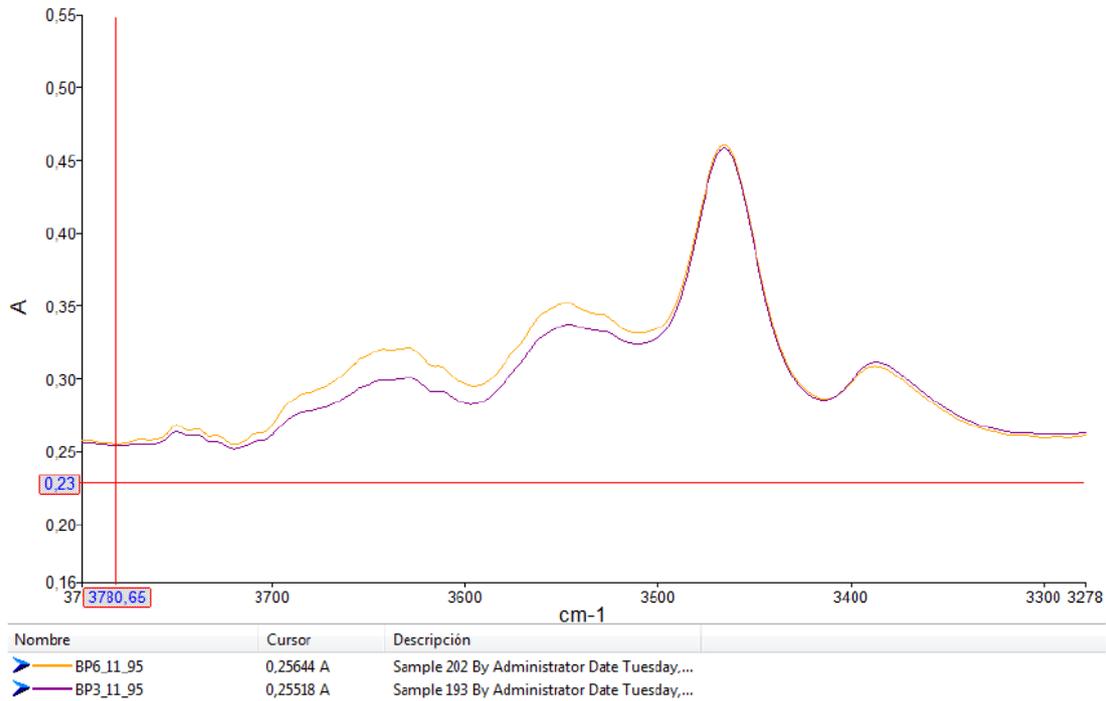
Las probetas fueron preparadas según la metodología propuesta. Analizadas periódicamente durante más de 1200 horas terminando el experimento a las 4622 h, tal y como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Tiempo de análisis empleado**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Tiempo (horas)</b>
O	0
T1	14
T2	24
T3	48
T4	102
T5	150
T6	332
T7	518
T8	704
T9	890
T10	1262
T11	4622

Por ejemplo para las muestras catalizadas con Hierro y Cobre en ausencia y en presencia de agua, los espectros no muestran variación significativa entre ambos (BP3 y BP6) excepto en el desplazamiento de la línea base como resultado de la presencia de agua (BP6) así como resultados similares en los parámetros evaluados por FluidScan y la acidez disminuyo a valores similares. Estos resultados pueden sugerir que las muestras se encontraban en el proceso de propagación vía radicales libres en el cual se forman alcoholes intermedios que disminuyen la acidez previo a la terminación en el cual se forman carbonilos entre ellos los ácidos carboxílicos que incrementan la acidez.

**Figura 3. Comparación de espectros para las probetas BP3 (Hierro y Cobre en ausencia de agua) y BP6 (Hierro y Cobre en presencia de agua)**

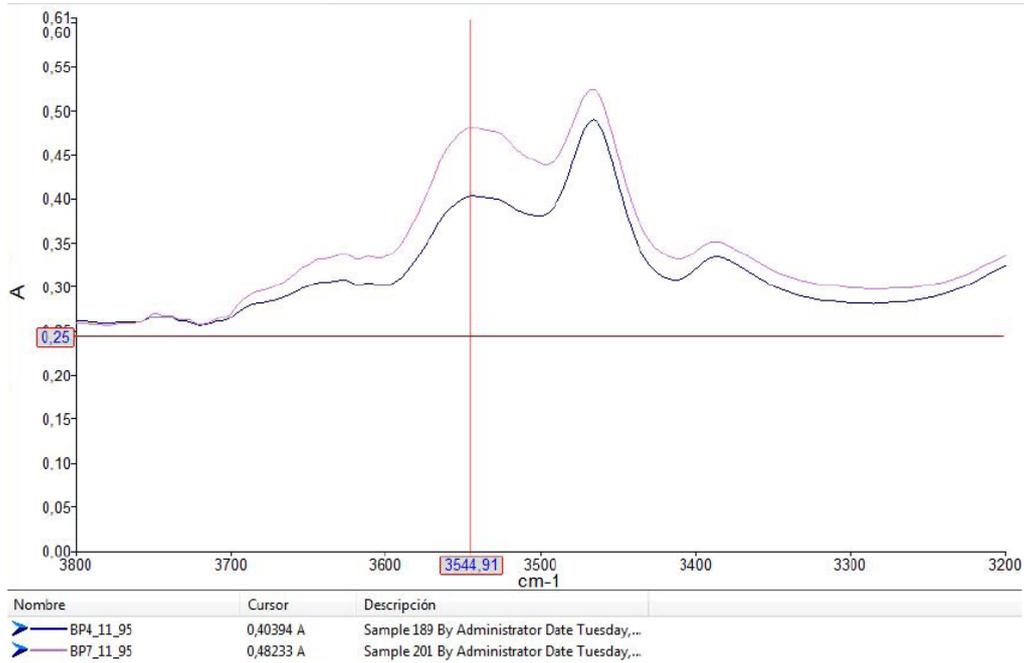


La comparación por parejas de las probetas BP4/ BP7 (Hierro con ausencia y con presencia de agua) (Figura 4) así como BP5/ BP8 (Cobre con ausencia y con presencia de agua), sugieren que el hierro en ambos catalizan las reacciones de descomposición, no haciéndolo el cobre.

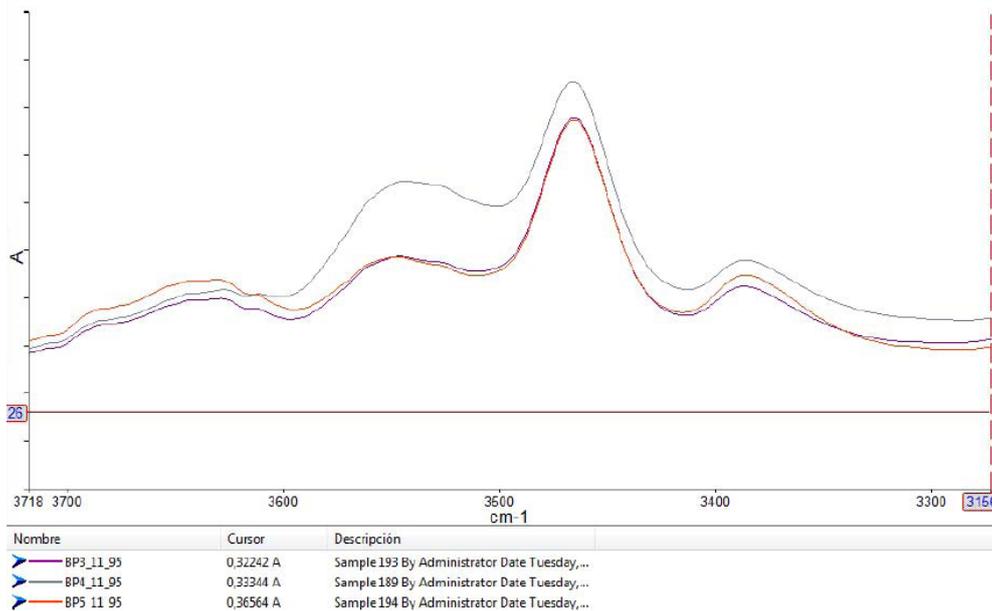
Se compararon los espectros a T11 (4622 h) entre las muestras con hierro encontrando una superposición casi exacta excepto en los alrededores de 3550 cm-1. El proceso de degradación fue similar, ligeramente superior en la probeta con agua, en ambos casos, atribuible a una descomposición del aceite básico que indica que los productos de descomposición están compuestos en su mayoría por alcoholes o grupos ácidos de enlace de hidrógeno débil. Se observa en la región atribuible a la descomposición que no se produjeron subproductos de enlaces de hidrogeno formados por el lubricante basado en poliéster.

En la Figura 5 se comparan los espectros de las muestras catalizadas en presencia de Cobre, Hierro y los dos metales. Se puede sugerir que el hierro cataliza las reacciones de descomposición en mayor proporción que la combinación de hierro con cobre, cuyo efecto es mínimo. El agua incluida en las muestras pudo contribuir con la mayor formación de grupos alcohólicos o grupos ácidos puede sugerir hidrolisis del aceite básico, aunque la presencia de agua no fue determinante ya que al comparar los resultados a T11 de las muestras catalizadas en ausencia de agua.

**Figura 4. Comparación de espectros para las probetas BP4 (Hierro con ausencia de agua) y BP7 (Hierro en presencia de agua)**



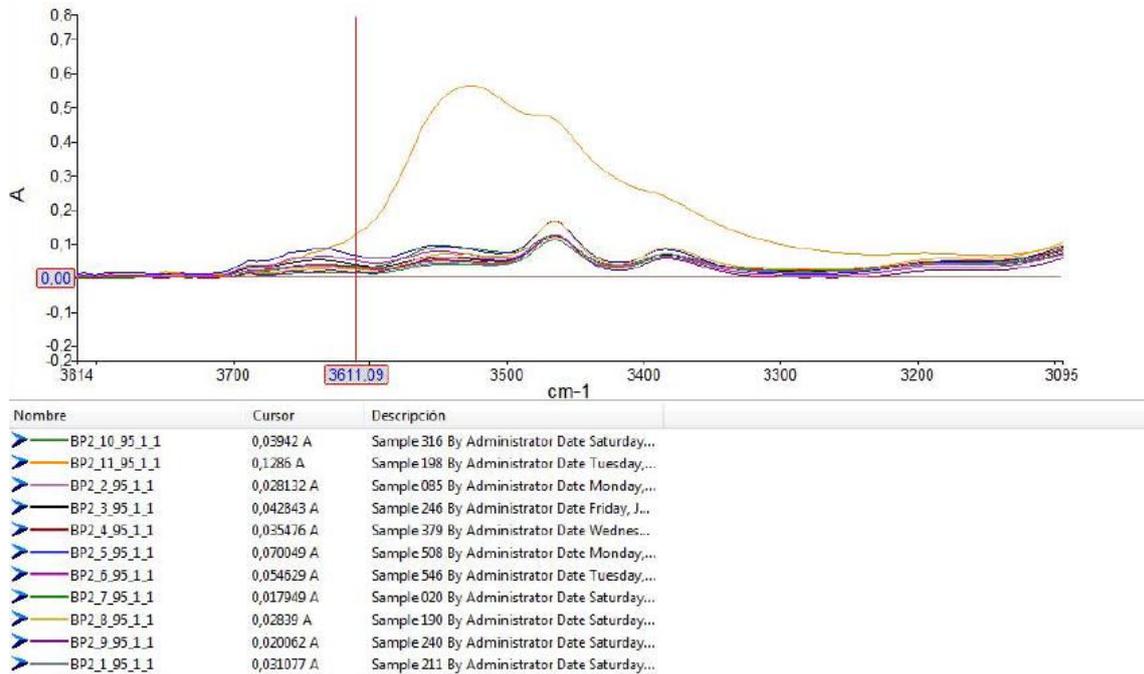
**Figura 5. Comparación de espectros para las probetas BP3 (Hierro con cobre), BP4 (Hierro) y BP5 (Cobre)**



### 3.4 Análisis de muestras envejecidas a 95°C en presencia de agua.

En la figura 6 se observa la muestra a T11, en la región 3600-3200 cm<sup>-1</sup>. La expansión de esta región espectral sugiere que el agua libre reacciona con el aceite básico hasta llegar a su degradación y a la suficiente formación de subproductos.

**Figura 6. Comparación de espectros para la evolución temporal de la probeta BP2**



### 3.5 Análisis de muestras envejecidas a 95°C en presencia de Hierro

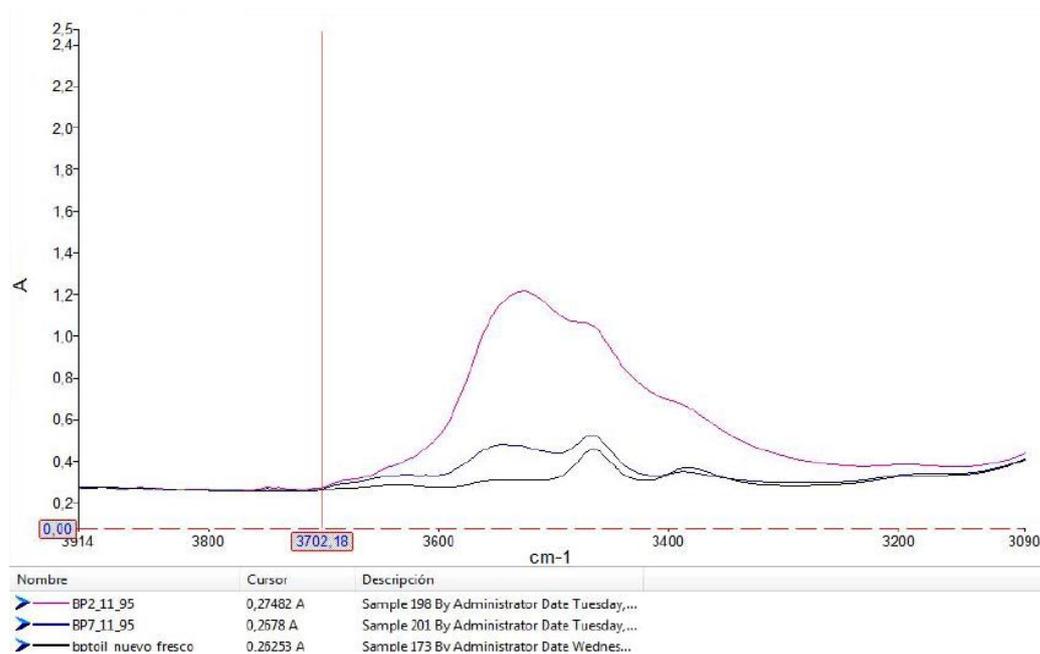
A fin de establecer si se está en presencia de hidrólisis se evaluaron los espectros y resultados del FluidScan del aceite BP 2380 solo en presencia de agua (BP2) para finalmente comparar los resultados obtenidos con Hierro y agua (BP7). Fueron comparados los espectros de las probetas exclusivamente con agua (BP2) y con agua y hierro (BP7) incluyéndose el aceite BP2380 virgen.

Los espectros originales de la figura 7 sugieren que toda la humedad inicial produjo degradación del aceite básico, lo cual se evidencia en la región de 3700-3000  $\text{cm}^{-1}$ . En aceites a base de poliéster el agua se presenta en la región comprendida 3700-3600  $\text{cm}^{-1}$ , por lo que ha desaparecido casi totalmente en las probetas contaminadas con un 1% (1000 ppm) iniciales ASTM E2412. El agua añadida reaccionó con el aceite básico produciendo un incremento en la región 3600-3500  $\text{cm}^{-1}$  especialmente en la BP2 sin catalizador. Es probable que el Hierro dado su potencial de oxidación haya utilizado el agua.

## 4 Conclusiones

La degradación de un aceite puede ser producto de tres mecanismos fundamentales, hidrólisis, oxidación y descomposición térmica. En este trabajo se ha analizado un aceite sintético de Tipo II con características de estabilidad térmica y oxidación, capacidad de carga y características de fluidez a bajas temperaturas. Se requirió más de 4000 horas de envejecimiento para obtener cambios en sus espectros así como en sus propiedades.

**Figura 7. Comparación de los espectros para las probetas BP2, BP7 y Aceite Fresco**



Se analizó el efecto de abrir la lata, durante 6 meses y se encontró que al extraer el aceite inmediatamente absorbe humedad del ambiente aumentando su acidez en una pequeña cantidad (0,1 mg KOH/ g de aceite). También se analizó el efecto de la luz y aunque sufrieron pocos cambios en el periodo de observación, es de destacar el gran oscurecimiento sufrido por las muestras expuestas a la luz.

Los aceites fueron sometidos a envejecimiento controlado exponiéndolos a las condiciones que podrían producir su descomposición así como el consumo de sus dos aditivos principales. Se prepararon distintas mezclas de aceite, agua y catalizadores en presencia de humedad y de catalizadores metálicos (Hierro y Cobre). En las muestras con catalizadores metálicos se observó que cuanto mayor era la presencia de hierro aumentaba la tasa de degradación y menor en presencia de Cobre, observándose el mismo efecto en presencia de agua. Todo parece indicar que el agua incluida en las muestras pudo contribuir con la mayor formación de grupos alcohólicos o grupos ácidos lo que sugiere hidrólisis del aceite básico.

## 5. Referencias

- Adams, M. J., Romeo, M. J. Rawson, P. (2007). FTIR analysis and monitoring of synthetic aviation engine oils. *Talanta*, 73, 629-634.
- ASTM D445-12 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), Book of Standards Volume: 05.01, 2012.
- ASTM D664-11a Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration, Book of Standards Volume: 05.01, 2011.
- Barnes M., (2003, Mayo) The Lowdown on oil breakdown. *Practicing Oil Analysis magazine*, 4-6.
- Cottingham R. L. & Ravner, H. (1968). Neopentyl Polyol Esters for Jet Engine Lubricants- Effect of Tricresyl Phosphate on Thermal Stability and Corrosivity. (número de publicación NRL Report 6667). Washington, D.C. Naval research laboratory
- Cuesta, M. (1980). *Motores de reacción* (6ª ed). Madrid, España: Editorial Paraninfo.

- Hamada, T. & Nishiura, N. (1996). Refrigeration Lubricant Based on Polyolester for Use With HFCs and Prospect of its Application With R-22 (Part 2) Hydrolytic Stability and Compressor Endurance Test Results. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 337.
- Mangolini, F., Rossi A., & Spencer N. D. (2011). Influence of metallic and oxidized iron/steel on there activity of triphenyl phosphorothionate in oil solution. *Tribology International*, 44, 670–683.
- Mousavi, P., Wang, D., Grant, C. S., Oxenham, W. & Hauser. P. J. (2005). Measuring Thermal Degradation of a Polyol Ester Lubricant in Liquid Phase. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(15) 5455-5464.
- Mousavi, P., Wang, D., Grant, C. S., Oxenham, W. & Hauser. P. J. (2006). Effects of Antioxidants on the Thermal Degradation of a Polyol Ester Lubricant Using GPC *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45 (1) 15-22.
- Shubkin, R. L. (1999). *Synthetic Lubricants and High- Performance Functional Fluids*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Siouris, S., & Wilson, C. W. (2010). Thermodynamic Properties of Pentaerythritol-Based Species Involved in Degradation of Aviation Gas Turbine Lubricants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(23), 12294-12301.
- Wang, L., & Wood, R. J. K. (2007). The influence of contact conditions on surface reaction layers formed between steel surfaces lubricated by an aviation oil. *Tribology International*, 40, 1655-1666.
- Wooton, D. L. (2003, Noviembre). Processing Techniques for Handling Multiple Spectra. *Spectroscopy*, 18(11), 16-24.
- Wyman, J. F., Porvaznik, M., Serve, P., Hobson, D. & Uddin, D. E. (1987). High Temperature Decomposition of Military Specification L-23699 Synthetic Aircraft Lubricants. *Journal of Fire Sciences*, 5(3) 162-177.
- Wyman, J., Pitzer, E., Williams, F., Rivera, J., Durkin, A., Gehringer, J., Servé, P., von Minden, D. & Macys, D. (1993). Evaluation of shipboard formation of a neurotoxicant (trimethylolpropane phosphate) from thermal decomposition of synthetic aircraft engine lubricant. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 54(10), 584-592.
- Zeman, A., Stuwe, R., & Koch, K. (1984). The DSC cell—a versatile tool to study thermal-oxidative degradation of lubricants and related problems. *Thermochimica Acta*, 80(1), 1-9.