

# EVALUACIÓN DE PROCESOS DE DESGASTE EN TURBINAS AERONÁUTICAS MEDIANTE ESPECTROMETRÍA POR DISCO ROTATIVO (RDE) y POR CONTADOR DE PARTÍCULAS LÁSER (LNF)

Beatriz Leal de Rivas

Ronald Torres Sanguino

*Universidad Metropolitana*

Salvador F. Capuz-Rizo

*Universitat Politècnica de València*

Joaquín Ordieres-Meré

*Universidad Politécnica de Madrid*

## Abstract

In this paper different methodologies for assessing wear processes of aeronautical turbines have been examined. Analysing the characteristics of lubricants used, through spectrometric analysis and evaluating particles by particle-size counters, exceeding 20 microns, we intend to determine wear processes and correlations between various operating parameters of turbines. For this purpose are showed the main methodologies of oil analysis, indicating information provided; areas where its application is relevant, and displays, results of different cases of application for fixed-wing and rotary wing aircrafts.

**Keywords:** *Oil wear analysis, Aviation.*

## Resumen

En esta ponencia se realiza una revisión de diferentes metodologías para la evaluación de procesos de desgaste en turbinas aéreas derivadas. Mediante el análisis de las características del lubricante utilizado, a través de espectrometría de micropartículas y de la evaluación por contadores de partículas de tamaño superior a los 20 micrómetros, se pretende determinar procesos de desgaste y correlaciones entre diversos parámetros de funcionamiento de la turbina. Para ello se presentan las principales metodologías de análisis de aceite en uso, indicando la información que suministran, los ámbitos en los que su aplicación es pertinente, y se muestran los resultados de diferentes casos de aplicación correspondientes tanto a aeronaves de ala fija como de ala rotativa.

**Palabras clave:** *Análisis de aceites usados, aviación.*

## 1. Introducción

La lubricación es fundamental para toda maquinaria, y muy especialmente en equipos aeronáuticos dada la criticidad de su operación, dado que cualquier fallo puede conducir a consecuencias catastróficas. Por ello, todos los sistemas que conforman una aeronave, bien

sea de ala fija (aviones) o bien de ala rotativa (helicópteros), son incluidos en programas de mantenimiento constante conocidos como Condition Monitoring (Mantenimiento Basado en Condición) en los cuales todos los equipos que conforman la aeronave son sometidos a monitoreo frecuente utilizando técnicas predictivas y proactivas con el fin de establecer las condiciones actuales y futuras, a disminuir la ocurrencia de fallos. (Yana et al 2005) (Thibault 2006), (Prabhakaran A., Jagga C. R., 1999)

Desde la década de los 50 se han llevado a cabo programas basados en el monitoreo frecuente de análisis espectrométricos del aceite medidos, en sus inicios, por técnicas de absorción atómica y por emisión por chispa, y ya para finales del siglo pasado por emisión por plasma y por disco rotativo (Departments of the Army, the Navy, and the Air Force, 2008), (ASTM D6595, 2000), (Mihalčová J., Dobránský J., 2008), (Lubricant & Fluid Power, 2006), (Espinoza et al. 2007), (Macian et al. 2003)

Dado que la espectrometría, bien sea por absorción o por emisión, sólo es capaz de evaluar partículas de tamaño inferior a los 10 micrómetros, la mayoría de los fabricantes de sistemas aeronáuticos implementaron la evaluación de partículas retenidas en los sistemas de filtración (partículas largas), mediante detectores magnéticos, e inclusive en el mismo aceite por la técnica de Ferrografía a fin de determinar poblaciones, morfologías y composición de partículas de tamaño superior. (Roynance, 2005), (Levi, Eliaz, 2009), (Qing Wang et al. 2011)

Trabajos realizados por Wang et al. (2005) así como por Jiang et al. (2011), Day (2008), Liangz hou et al. (2008), Edmonds et al (2000) y Anderson (1982) en el área de los motores demuestran que estas técnicas o metodologías de evaluación de partículas requieren del conocimiento de expertos y consumen mucho tiempo de técnicos con alta formación y coste, por lo que estos análisis suponen un importante desembolso.

Los motores alternativos, conocidos como motores de combustión interna (MCI), poseen una gran cantidad de piezas en movimiento relativo; durante el inicio y parada de las unidades, las piezas están sometidas a regímenes de lubricación que varían desde la capa o película límite hasta régimen elastohidrodinámico, razón por la cual sus lubricantes se formulan con aditivos antidesgaste (AW) o de extrema presión (EP) que a su vez protegen a las piezas constituyentes de la cámara de combustión (cilindros/ pistones/ anillos) en su movimiento alternativo.

Durante su operación se generan partículas de desgaste de tamaños variados, desde menos de un micrómetro hasta las denominadas partículas largas. Estas últimas son capturadas por los sistemas de filtración y las más pequeñas (menores al calibre de retención de los filtros) circularán libremente pudiendo ser monitoreadas mediante los análisis espectrométricos del aceite y hasta corregidas en función del consumo de aceite. (Wang et al. 2005), (Leal et al. 2009)

En el ámbito de la aviación basada en turbina de gas no existen tantas piezas móviles, básicamente los ejes y sus rodamientos, y los engranajes de las cajas de accesorios, siendo la función principal del lubricante extraer el calor y mantener las piezas bajo régimen de lubricación hidrodinámica gracias a la acción de las bombas principales y recuperadoras. Es importante destacar que en estos equipos, el lubricante no está en contacto con la cámara de combustión, denominada sección caliente, y las pocas posibles fugas de aceite solo pueden ocurrir a través de los sellos de los ejes del compresor o de la turbina, y de los sistemas de presurización, y poco por el escape. (Cuesta, 1995), (Pratt & Whiney, nd)

En la aviación comercial se presentan tres tipos de turbinas para los sistemas de propulsión dependiendo de la altitud y velocidad que requiera la aeronave, desde turbo-hélice, turbo-jet y turbo-fan. En el sector de aeronaves turbohélice las turbinas marca Pratt & Whiney (en adelante P&W) modelo PT6 son utilizadas por una amplia gama de modelos de aeronaves privadas, y hasta en ala rotativa en la versión Twin Pac PT6T (turbo-shaft). (Pratt & Whiney,

2001). A estas turbinas en todos sus submodelos no se les realiza un cambio real de aceite, como sí se hacía en décadas pasadas. Actualmente sólo se rellena el volumen faltante después de cada operación (capacidad de aceite de 8,70 litros, con una tasa de consumo de aceite de 0,09 litros/hora).

La acción de las bombas principales y recuperadoras a una presión de 100 psi asegura una lubricación hidrodinámica debido al alto régimen de flujo y baja carga. La alta tasa de reposición se debe a fugas de aceite en los sistemas de separación de aire, del sistema de respiración y presurización a través de los sellos laberínticos de carbón. Este modelo de turbina posee filtros by-pass para partículas mayores a 15-20 micrómetros (denominadas partículas largas), y un detector de partículas ferromagnéticas instalado en los sistemas de recuperación de las bombas. El fabricante (P&W) recomienda en sus manuales de mantenimiento la evaluación de estas partículas mediante los análisis de los filtros, y de partículas en los aceites por Ferrografía, tareas que requiere mucho tiempo y experticia del evaluador.

Con el desarrollo de los contadores de partículas se dispone de una técnica capaz de determinar la población de partículas cuantificándolas por tamaño; y con el desarrollo de contadores laser se mejoró ampliamente la evaluación al poder discernir entre partículas de carbón (hollín), agua y hasta burbujas de aire, (Tucker et al, 2009). El equipo instrumental conocido como LaserNet Fines (LNF) desarrollado por Lockheed Martin y el Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos, posee la versatilidad de ser un contador y también un clasificador de partículas que permite el análisis morfológico a partir de la forma de su silueta y distribución del tamaño de las mismas. (Raadnu S., 2005) (ASTM D7596, 2010), (Edmonds J. et al. 2000)

Trabajos realizados por Yan et al (1998), Sperring et al (1999), Barraclough et al (1999), Reintjes y Tucker, (2001), Lukas y Anderson, (2006) sobre equipos militares de las fuerzas armadas de Estados Unidos, establecen que las partículas grandes son constantemente eliminadas a medida que se generan y atrapadas por los sistemas de filtración, por lo que sugieren el establecimiento de un equilibrio dinámico, en tanto las muy pequeñas, desde partículas de tan sólo unas cuantas micrómetros hasta tamaño cercano a la película hidrodinámica, dependen de la tasa de generación en función del tiempo, y su concentración del consumo de aceite. (Yan et al, 2007), (Laghari M S. et al, 2009), (Laghari M S et al, 2010)

El presente trabajo pretende determinar si esta nueva metodología de evaluación para partículas largas puede llegar a sustituir la evaluación tradicional por Ferrografía (Jiang L et al, 2008), (Shakeel M., Ahmed, 2009), (Lu Z., et al, 2009), y si puede establecer tendencias de desgaste/contaminación presentes en los aceites en uso, que supongan equilibrios dinámicos, y que puedan sustituir los monitoreos espectrométricos de sus aceites bajo las condiciones de relleno frecuente (top-off) y hasta la evaluación la evaluación de partículas largas retenidas en los filtros. (Spectro, 2008), (Wang J., et al, 2003)

Autores como Yan et al. (2005) y más recientemente Spectro Inc (2010) sugieren que es posible establecer un equilibrio dinámico (velocidad de producción igual a la velocidad de pérdida) para muchos sistemas de lubricación y han propuesto un gran número de modelos, especialmente para partículas de tamaño inferior a la tasa de retención del sistema de filtración, y evaluadas por técnicas espectrométricas.

Se propone para el sistema de lubricación bajo estudio determinar si realmente se establece un equilibrio dinámico de partículas largas, y evaluar los modos de desgaste presentes para posteriormente utilizar metodologías de inteligencia artificial (Minería de datos) a fin de extraer conocimiento útil sobre un único modelo de turbina de amplia utilización internacional, con el fin de determinar las variables que deberán tomarse en cuenta cuando se realicen los modelajes.

## 2. Metodología

Para la realización de este trabajo se seleccionaron 50 muestras de aceites usados de dos tipos de aeronaves, ala fija y rotativa, con turbinas PT6, submodelos PT6 A (24 muestras) y PT6 T (26 muestras). A las muestras recogidas se les realizó un monitoreo durante más de 2.000 horas de operación a intervalos de 250-400 horas que coincidían con cambios de filtros de aceite, por un periodo de 2 años en aeronaves con frecuencia de vuelo de 30-50 horas/mes. El seguimiento se comenzó en ambos casos con un cambio de aceite completo después de una inspección mayor (o inspección de la sección caliente), e inspecciones de mantenimiento de rutina en cada intervalo.

Las muestras fueron evaluadas mediante espectrometría de emisión por Disco rotativo RDE de Spectro Inc, modelo W, y por conteo de partículas por laser de Spectro Inc, modelo LNF. Con este último se determino la concentración en número de partículas por unidad de volumen por modo de desgaste (corte, fatiga, deslizamiento severo) así como por la presencia de material foráneo/ no metálico para partículas largas mayores a 20 micrómetros, si bien se determinaron las poblaciones de partículas presentes (por unidad de volumen) de tamaño inferior

## 3. Resultados

Se evaluaron los resultados obtenidos por espectrometría por RDE encontrando que las concentraciones de metales en partes por millón (ppm) en función del tiempo de operación tanto para los motores Turbo Pro PT6A, como para los Turbo Shaft PT6T. Tablas 1 y 2.

**Tabla 1. Resultados de análisis de muestras de aceites usados de motores PT6A por espectrometría por RDE en ppm**

PT6A (ppm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Fe	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn	3	2	2	2	1	0	3	2	1	3	2	2	4	3	4	0	3	2	3	2	3	2	3	2
Al	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	1	0	1	0
Cu	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Ni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Si	3	1	1	2	1	2	1	2	2	1	1	4	1	2	1	1	1	1	2	2	1	5	4	2
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Ca	0	0	6	0	1	1	0	0	0	11	0	0	0	2	0	0	0	1	1	3	1	0	3	1
Ba	14	0	15	0	10	14	8	0	20	0	0	0	0	18	10	16	9	0	18	0	0	0	0	0
P	3656	3266	3582	3821	3103	4455	3741	3706	3523	2551	3387	3888	3379	3836	3039	4501	3725	3895	3492	2585	3274	3871	3429	3405
Zn	1	0	8	3	30	1	1	3	2	7	3	1	0	2	30	1	1	4	2	1	3	1	6	2

**Tabla 2. Resultados de análisis de muestras de aceites usados de motores PT6T por espectrometría por RDE en ppm**

PT6T (ppm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Fe	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn	2	2	2	3	3	1	4	2	0	1	1	2	2	3	1	3	2	3	3	3	2	3	0	4	1	2
Al	3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	3	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0
Cu	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Ni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Si	6	0	1	0	1	2	1	0	1	1	1	1	1	1	5	3	0	0	0	3	0	0	1	2	1	1
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg	28	1	0	0	2	0	1	0	1	0	11	0	2	0	17	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Ca	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Ba	22	0	0	0	13	0	7	15	0	0	0	19	7	18	0	0	0	0	0	9	20	0	0	20	8	
P	3933	3.457	3619	3454	3837	3457	3588	4.865	1802	3.761	3351	3489	3.880	3.441	4.006	3356	3.247	3729	3463	3643	3341	5.243	1544	3844	3.930	3.292
Zn	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	8	4	2	2	0	0	1	0	0	0	1	0	8	4	2

Los resultados obtenidos pueden sugerir que no se están generando partículas de tamaño inferior a los (5-8) micrómetros; ahora bien, según Tormos y Macian (2002), los valores en concentración medidas de partículas metálicas pueden no expresar la contaminación real ya que están afectadas por diferentes factores, entre los cuales destacar la tasa de consumo y/o reposición de aceite efectuados, que en este caso es muy alta debido tanto a las pérdidas por evaporación como por fuga directa del aceite que es ventilado al ambiente en el sistema de respiración/presurización, y que arrastra en su seno a las partículas que contiene.

Cabe destacar que el aire entra a través de los sellos laberínticos de los rodamientos (“bearing”) #1, #2, #3, donde toda la mezcla de aceite y aire es recogida por las cuatro bombas recuperadoras y enviada a la caja de accesorios, que opera como un separador de aire-aceite. El aire es lanzado mecánicamente contra las paredes del separador de aceite, lo drena al cárter o sumidero de aceite, enviando el aire al exterior por las líneas de ventilación o respiradero (Pratt & Whitney, nd).

Otro factor a considerar es la influencia de la composición del aceite. La especificación MIL-PRF-23699 STD indica que el aceite utilizado posee aditivo antidesgaste de reacción química de 1ª generación, en este caso el “Tri-crecil-fosfato de sodio, TCP” el cual disminuye la posibilidad del desgaste deslizante/adhesivo suave de partículas menores a las 5 micrómetros (“scuffing”) presente en la operación de encendido/apagado bajo condición de película límite, y también protege los dientes de los engranajes de las bombas contra el desgaste adhesivo, debido a la capacidad para aumentar el área de soporte de carga equivalente en un 25% del área aparente, muy especialmente para temperaturas de operación mayores a 80°C promoviendo la formación de una película hidrodinámica. Este aditivo es renovado continuamente con las respectivas reposiciones de aceite. (Kin et al 2011)

Por último está la influencia del filtrado. Es importante destacar que estos resultados de evaluaciones espectrométricas fueron similares para más de 200 muestras de aceite de turbinas PT6 de otros modelos/aeronaves, lo que sugería que debía ser investigada la presencia de partículas largas que deberían ser capturadas por el filtro de aceite (posterior al enfriador de aceite (“oil cooler”) y previo a la bomba principal, y/o por el detector de partículas magnéticas (“chip detector”) instalado en la caja reductora (únicamente detecta la presencia de partículas ferromagnéticas, desde borra hasta macropartículas).

Estos resultados por espectrometría por RDE sugieren que podían estar presentes partículas de mayor tamaño a las detectadas por la espectrometría y hasta no capturadas por el filtro ya que su tasa de eficiencia teórica es de (95,7-99,9) % para partículas de 10-20 micrómetros. (Pratt & Whiney, nd)

Paralelamente, se analizaron las mismas muestras de aceites usados por la metodología del conteo de partículas de imágenes Laser (LNF), y se evaluaron las morfologías de partículas mayores a los 20 micrómetros, a fin de establecer los modos de desgaste presentes en los sistemas de lubricación.

Se contabilizaron el número de partículas totales, según las normas ISO 4406 (ISO, 1999) y NAS 1638 (AIA, 2001), encontrando que la población de partículas no ofrecía un patrón claro de desgaste para las partículas en los rangos de mediciones de las normas para partículas inferiores a las (10-15) micrómetros. Se contabilizaron concentraciones máximas en # partículas/ 100 ml según tabla 3.

**Tabla 3. Concentraciones máximas de partículas/ 100ml por rango de tamaño (en micrómetros)**

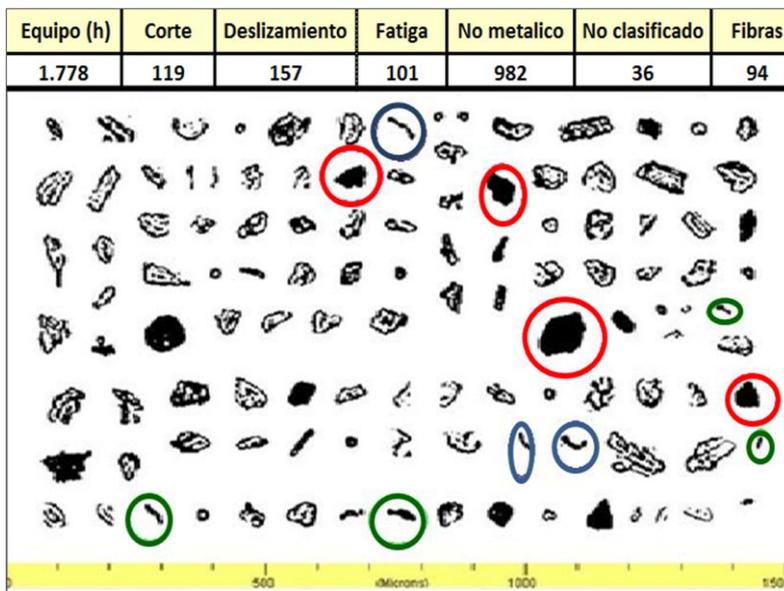
Rango de tamaño en micrómetros de partículas suspendidas en el aceite	Concentraciones máximas de partículas/ 100 ml de aceite
5 a 10	2.000.000
10 a 20	500.000
25 a 50	100.000
50 a 100	20.000

Dada la importancia que da Pratt & Whiney a la evaluación de partículas largas (macroscópicas) en sus filtros/detectores (Pratt & Whiney, nd) se procedió a evaluar las partículas que eventualmente debían ser capturadas por dichos filtros/detectores, clasificándolas según su morfología en las muestras de aceites usados con el contador de partículas por análisis de imagen (LNF) y determinando el número de partículas/ 100 ml presentes para cada modo de desgaste en diferentes rangos de tamaño.

Los resultados sugieren que, para ambos tipos de turbina PT6, el modo de desgaste predominante es el de tipo fatiga, seguido por el desgaste de deslizamiento, y por último el desgaste de corte. Sin embargo, se evidenció altos niveles de partículas contaminantes o no metálicas.

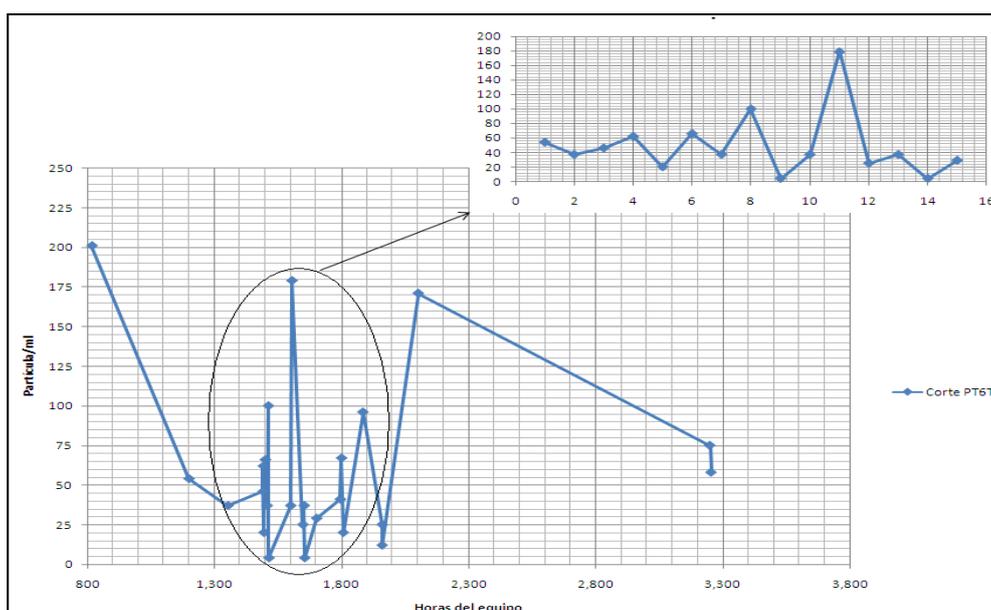
Estos modos de desgaste están asociados a sus imágenes, basadas en la clasificación dada por el fabricante P&W, como se puede visualizar en el siguiente ejemplo de la muestra 8 de una turbina PT6A (Figura 1), en la cual se observa la morfología de las partículas presentes en la muestra para cada modo de desgaste. Para las partículas de desgaste por deslizamiento, (círculo de color rojo), se aprecia que tiene efectivamente una forma de hojuela, el desgaste por corte, (círculo de color azul), tiene una forma de ralladura, y el desgaste de fatiga, tiene una forma de trozos de metal, (círculo de color verde).

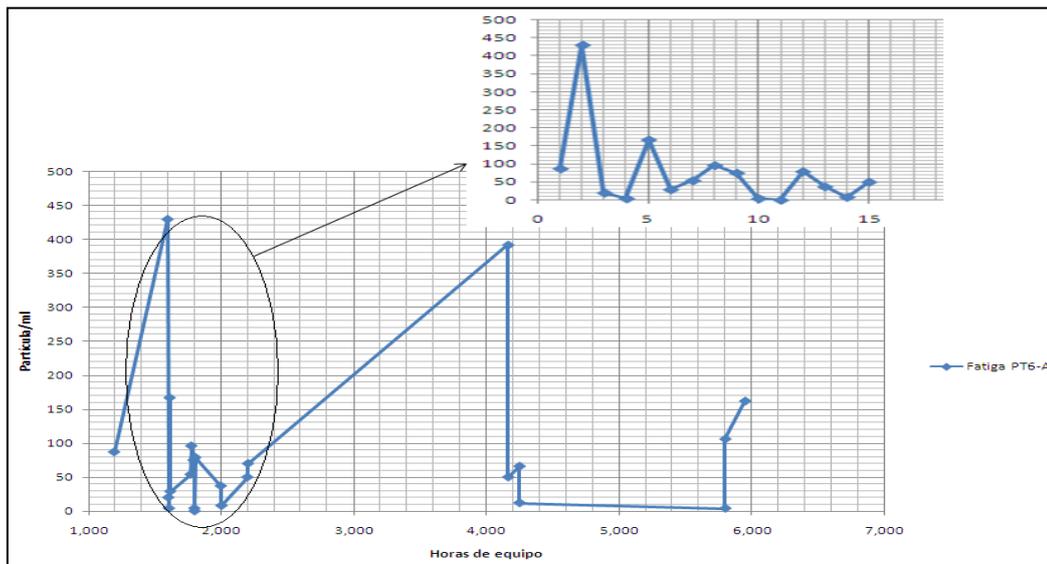
Figura 1. Morfología de partículas totales para una muestra de aceite de una turbina PT6A.



Basados en los resultados obtenidos para cada modo de desgaste se determinó el comportamiento de la formación de partículas/ 100 ml en función del tiempo de operación para partículas desde 20 hasta 100 micrómetros, (figura 2), encontrando que para un mínimo de 15 evaluaciones por modos de desgaste, existían variaciones en la concentración de partículas, especialmente para partículas en el rango de (20-25) micrómetros que, según Hubert,C (1982), Liu Yan, et al (1998) y Macián et al (2003) deberían haber llegado a una condición de equilibrio en función del tiempo, es decir que las partículas llegaron a un flujo de generación constante y removidas del sistema por los diferentes mecanismos. (Spectro Inc, 2010)

Figura 2. Desgaste tipo Corte total para turbinas PT6T y desgaste modo fatiga total para PT6A

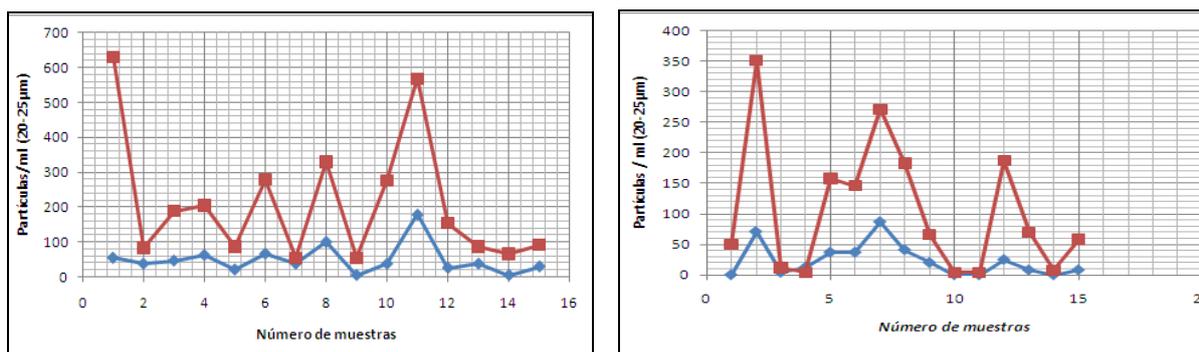




Estos resultados parecerían sugerir que debería ser posible establecer límites de tendencias por equipos o por sistemas de lubricación basados en la premisa de que la concentración de partículas/ volumen es directamente proporcional a la tasa de desgaste como lo sugieren Lukas y Jurko (2001), Bilbao (2004), Ciria (2004), Spectro Inc (2008) y Filicky (2009)

En el caso sujeto a evaluación y dado el alto porcentaje de aire que ingresa al sistema de lubricación, cargado tanto de humedad como de contaminantes no metálicos (foráneos), se estudiaron las posibles correlaciones entre los distintos modos de desgaste con la entrada de partículas foráneas, encontrando que las concentraciones de partículas de corte (azul) estaban influenciadas por el ingreso de contaminantes (rojo), como se muestra en la figura 3, así como para las partículas por fatiga para un tamaño de partículas similar.

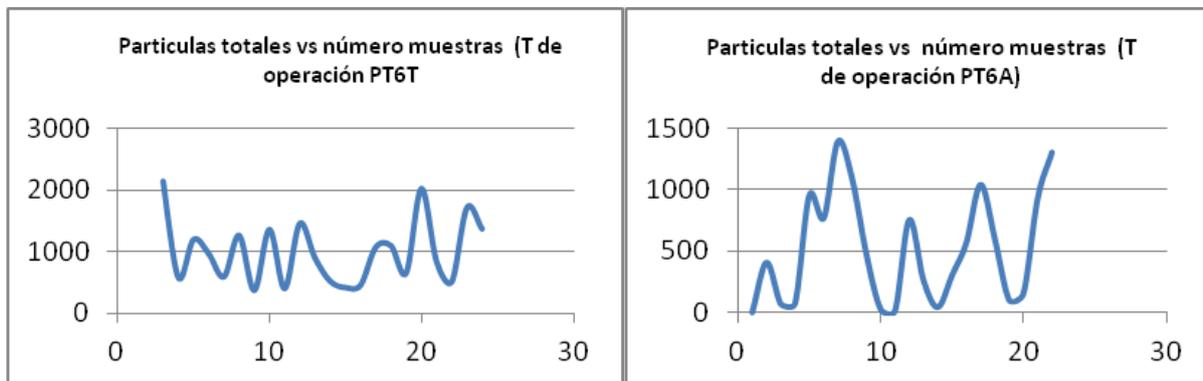
**Figura 3. Desgaste tipo corte y contaminantes externos para partículas (20-25)  $\mu\text{m}$ . PT6-T y PT6A respectivamente.**



Estos resultados sugieren que existe un efecto de la entrada de partículas foráneas que incrementa la concentración de partículas de tamaño (20-25)  $\mu\text{m}$  especialmente de corte y fatiga dado el alto poder abrasivo de contaminantes, tales como polvo, tierra y/o arena.

En cuanto a las partículas totales presenten en cada uno de los sub modelos de turbinas PT6, se encontró que para las 2000 y 4000 horas que duraron las pruebas para las PT6T y PT6A respectivamente se encontraron concentraciones de partículas tales como las presentadas en la figura 4.

**Figura 4: Número de partículas totales en función del número de muestras para turbinas PT6T y PT6 A**



Las diferencias en valores máximos en partículas totales y de corte/ contaminación externa pueden ser producto del tipo de operación de las aeronaves ya que las PT6T (ala rotativa/ helicópteros) operan a altitudes promedios inferiores a las de operación de las PT6A (ala fija/ aviones) y por tanto las primeras más expuesta a la contaminación ambiental.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se justifica la conveniencia de aplicar nuevas técnicas de monitorización de contaminantes y partículas por modos de desgaste en aceites de turbinas de aviación, para valorar su potencial contribución a las técnicas de mantenimiento predictivo, distintas al análisis espectrométrico de metales, y a los análisis de residuos en los filtros y de ferrografía analítica.

Se identificó la imposibilidad de realizar los análisis de cada muestra por horas de funcionamiento de sus aceites lubricantes debido, principalmente, a la alta tasa de reposición de aceite, lo que justifica el uso de métodos no paramétricos.

Por ello se plantea la necesidad de formular modelos de predicción para partículas largas. Se aplicarán métodos paramétricos y no paramétricos para el establecimiento de límites de confianza, así como técnicas de minería de datos para estimar coeficientes mediante regresores, y ajustar la estimación de producción de partículas/ contaminantes a lo largo de los períodos de funcionamiento, como elementos claves para poder construir una ley de evolución.

#### 5. Referencias

- Albidewi IA. (2008) Wear Particles Surface Identification Using Neural Network. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.8 No.1, 262-265.
- Anderson DP, Wear Particle Atlas (Revised). Prepared for the Naval Air Engineering Center, Lakehurst, NJ 08733, 28 June 1982, Report NAEC-92-163
- AIA (2001), NAS 1638 - Cleanliness requirements of parts used in Hydraulic systems, Aerospace Industries of America, Washington DC, USA.
- ASTM D 6595-00 (2000). Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry.
- ASTM D 7596-10 (2010). Standard Test Method for Automatic Particle Counting and Particle Shape Classification of Oils Using a Direct Imaging Integrated Tester.

- Barraclough TG, Sperring TP, Roylance BJ. (1999) Generic-based Wear Debris Identification – the First Step Towards Morphological Classification, International Conference on Condition Monitoring, University of Wales, Swansea, UK
- Bilboa M. (2004). Contaje de partículas. Wear check Iberoamerica. Obtenido en enero 2012 en: <http://www.wearcheckiberica.es/boletinmensual/pdfs/contaje.pdf>
- Kim B, Jiechao C, Jiang JC, Aswath PB. (2011) Mechanism of wear at extreme load and boundary conditions with ashless anti-wear additives: Analysis of wear surfaces and wear debris. *Wear* 270 (2011) 181–194
- Cao Y, Xie X. (2006) Wear Particles Classification Based On Wavelet Transform and Back-Propagation Neural Network. IMACS Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications"(CESA), Beijing, China.
- Ciria J. (2004). Seguimiento del desgaste en un aceite lubricante a través del LaserNet Fines-C. Wear check Iberoamerica. Obtenido en diciembre 2011 en: <http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/lasernet.pdf>
- Cuesta M. Motores de reacción. Editorial Paraninfo. Sexta Edición. Madrid, España.
- Day L. (2008). Filter debris analysis and differential pressure monitoring can reveal pending disaster—and help prevent it. *Tribology & Lubrication Technology*. Pg. 32
- Departments of the Army, the Navy, and the Air Force (2008). Joint Oil Analysis Technical Support Center” (JOAP-TSC)- JOAP-TSC. Washington, DC. USA.
- Edmonds J, Resner MS, Shkarlet K. (2000) Detection of Precursor Wear Debris in Lubrication Systems. *Aerospace Conference Proceedings, IEEE*. 73 - 77 vol.6
- Espinosa H, Patiño L, González Y, Laya Y, Tineo A. (2008) Estudio comparativo del desgaste en un motor de encendido por chispa en condiciones de velocidad variable usando gasolina y gas natural como combustible. *Saber, Universidad de Oriente, Venezuela*. Vol. 20. N° 1: 96-102.
- Espinoza H, Lara Y, Tineo A. (2007) Desgaste en un motor de encendido por chispa en condiciones de velocidad variable usando gasolina y gas natural como combustible. 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco, Perú.
- Espinoza H, Lara Y. Modelo analítico para la determinación de la velocidad de desgaste en motores de combustión interna mediante análisis de lubricante. *Científica* Vol. 12 Núm. 2 pp. 97-102. (2008)
- Filicky D. (2009). LaserNet Fines. Una nueva herramienta para la caja de herramientas de análisis de aceite. *Machinery Lubrication*. Obtenido en diciembre 2011 en: <http://www.machinerylubrication.com/Read/383/lasernet-fines-oil-analysis>
- Fygueroa-Salgado SJ, Serrano-Rico JC, Moreno-Contreras G. (2007) Método para normalizar las concentraciones metálicas medidas en muestras de aceite. 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco, Perú.
- Gonçalves-Valdeci D, de Almeida LF, Mathias MH. (2010). Wear Particle Classifier System Based on an Artificial Neural Network. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 56, 4, 284-288. UDC 004.032.26
- Huang H, Aiping L, Xiankun L. Application of PSO-based Wavelet Neural Network in Tool Wear Monitoring. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics* August 18 - 21, 2007, Jinan, China
- Hubert C, Beck J, Johnson J. (1983). A model and methodology for determining wear particle generation rate and efficiency in a Diesel engine using ferrography. *Wear*, Vol. 90, Issue 2. 335-379

- ISO (1999), ISO 4406 – Hydraulic fluid power – Fluids – Method for coding level of contamination by solid particles, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jiang L, Chen G, Long F. (2008) Auto-threshold Confirming Segmentation for Wear Particles in Ferrographic Image. 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design. DOI. 10.1109/ISCID.2008.107
- Laghari MS.(2003). Recognition of texture types of wear particles. Neural Comput & Applic (2003) 12: 18–25 DOI 10.1007/s00521-003-0367
- Laghari MS, Faheem A. (2009). Wear Particle Profile Analysis. International Conference on Signal Processing Systems. DOI 10.1109/ICSPS.2009.152
- Laghari MS, Ahmed F, Aziz J. (2010). Wear Particle Shape and Edge Detail Analysis. The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Volume 1, pp 122-125.
- Leal B, Ordieres J, Capuz-Rizo SF, Cifuentes P. (2009)Contaminants Analysis in Aircraft Engine Oil and its Interpretation for the Overhaul of the Engine. 9th WSEAS Int. Conf. on Simulation, modelling and optimitation (SMO '09). Budapest. Hungria 2009.
- Levi O, Eliaz N. Failure Analysis and Condition Monitoring of an Open-Loop Oil System Using Ferrography. 36:17–29. DOI 10.1007/s11249-009-9454-2. Tribol Lett (2009)
- Lubricant & Fluid Power. (2006). Introduction To The Use Of Atomic Emission Spectroscopy As Predictive Maintenance tool. September-October 2006. Pag 30-35
- Lukas M, Anderson D. Analytical Tools to Detect and Quantify Large Wear
- Lukas M, Anderson DP. Machine and Lubricant Condition Monitoring for Extended Equipment Lifetimes and Predictive Maintenance at Power Plants. Spectro Incorporated- Littleton, Massachusetts, U.S.A. TURN-02.
- Lukas M, Yurko R. (2001). Current technology in Oil Analysis spectrometers and what we may expect in the future. (pp. 161-168). Spectro incorporated.
- Macián V, Tormos B, Olmeda P, Montoro L. Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. Tribology International 36 (2003) 771–776
- Mihalčová J, Dobránsky J, (2008) Analysis of lubricant liquids in aircraft engines by tribotechnical diagnostics. The international conference of the carpathian euro-region specialists in industry system. 7th Edition, Prešov, Slovakia.
- Prabhakaran A., Jagga C. R. (1999) Condition monitoring of steam turbine-generator through contamination analysis of used lubricating oil. Tribology International 32 145–152
- Pratt & Whiney Canada. Maintenance Manual. (2001) Manual Part N° 3015442. Page 124 Table 1-2-2 y 1.2-4. February 01/2002
- Pratt & Whiney Maintenance Manual, Part No 3017542, section 79-20-52 page 213
- Pratt & Whiney PT6A, PT6T. Engines. Recuperado en enero 2001 en: <http://www.pwc.ca/en/engines/turboprops>
- Pratt & Whiney. Maintenance Manual. No 3013242, section 70-02-40, page 215 a 218
- Pratt & Whiney. Maintenance Manual. Identificaton of Metal particles. 70-34 page 1-4.
- Pratt& Whiney. Maintenance Manual Part No 3013342, section 79-32-42 page 1
- Pratt & Whiney Canada. Maintenance Manual. Manual Part N° 3015442. Page 124 Table 1-2-2 y 1.2-4. Febrary 01/2002
- Qing W, Zixin Z, Jingshun D, Xiaokai G. (2011). Oil Filter Debris Analysis of Aero-Engine. 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)

- Reintjes J, Tucker J. (2001). Applicatyon of Lasernet Fines to Mechanical Wear and Hydraulic Monitoring. DSTO International Conference on Health and Usage Monitoring, Melbourne, 19 – 20 February, 2001
- Roylance B.J. (2005) Ferrography—then and now. *Tribology International* 38, 857–862
- Shakeel Laghari M, Ahmed F. (2009) Computer Vision in the Field of Wear Particles. Second International Conference on Computer and Electrical Engineering. DOI 10.1109/ICCEE.2009.182
- Spectro Inc . (2010) Equilibrium Revisited- The Behavior of large paticles in lubricating oil and how to monitor them using LaserNet Fines Q 2000. QinetiQ North America. Dymanic.
- Spectro Inc. (2008). Establishing a wear particle limit using the LaserNet Fines dynamic limit calculator.
- Spectro Inc. (2008) Dynamic Equilibrium Revisited – The Behavior of Large Particles in Lubricating oil and how to monitor them using the LaserNet Fines Q200. Nota de Aplicación.
- Spectro Inc. (2008) Establishing a wear particle limit using the LaserNet Fines dynamic limit calculator. Rev. X.
- Sperring TP, Tucker J, Reintjes A, Schultz C, Roylance BJ. (1999), Wear Particle Imaging and Analysis – a contribution towards monitoring the health of military ships and aircraft, International Conference on Condition Monitoring, pp. 539-546, University of Wales, Swansea, UK.
- Raadnu S. (2005) Wear particle analysis—utilization of quantitative computer image analysis: A review. *Tribology International* 38, 871–878
- Thibault, Ray (2006). Lubricant & Fluid power. Introduction To The Use Of Atomic Emission Spectroscopy As Predictive Maintenance tool. pp 30-35.
- Tormos B., Macian V. (2002). Contribución al diagnostico de motores Diesel basado en el análisis del lubricante usado. Tesis doctoral. Departamento de maquinas y Motores Térmicos. UPV.
- Tucker JE, Reintjes J, Tankersley LL, Sebok T, Thoresen H, Fjerdingstad S, Howard PL. (2009). Operation of LaserNet Fines with Accurate Sampling. Obtenido en diciembre 2009 en: [http://fras.com/Pdf/ar\\_ASNE2003\\_paper.pdf](http://fras.com/Pdf/ar_ASNE2003_paper.pdf).
- Wang J, Darong C, Xianmei K. (2003) A Web-based Remote Intelligent Expert System for Ferrography Diagnosis. *Key Engineering Materials Vols. 245-246*, pp 367-372
- Wang, Wenbin, Zhang, Wenjuan (2005). A Model To Predict the Residual Life of Aircraft Engines Based upon Oil Analysis Data. En “Naval Research Logistics”, Volumen 52, Número 3, Abril 2005, pp. 276-284.
- Yan Liu, Youbai Xie , Fang Zhao , Zhigang Yao. Revision to the concept of equilibrium concentration of particles in lubrication system of machines. *Wear*, Volume 215, Number 1, March 1998, pp. 205-210
- Yan XP, Zhao CH, Lu ZY, Zhou XC, Xiao HL (2005). A study of information technology used in oil monitoring. *Tribology International*. Volume 38, Issue 10, Pages 879-886.
- Yana XP, Zhaoa CH, Lua ZY, Zhoua XC, Xiaoa HL. (2005) A study of information technology used in oil monitoring. *Tribology International* 38, 879–886
- Yuan CQ, Yan XP, Peng Z. (2007) Prediction of surface features of wear components based on surface characteristics of wear debris. *Wear* 263, 1513–1517.

Xufeng J, Jianbo W, Changying G, Yuan Z. (2011) Study on Aero-engine Wear Fault Diagnosis by Direct Reading Ferrograph. Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. DOI 10.1109/ICMTMA.2011.676

Lu Z., Yan X., Sheng C. , Yuan C. (2009) Wear Trend analysis Based on Ferrograph Cover area rates compares with other methods. Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09. IEEE. 7-10 Sept. 2009, pp: 1792 – 1797.

Peng Z (2002). An integrated intelligence system for wear debris analysis. Wear 252, 730–743.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Leal de Rivas, Beatriz C.  
Departamento de Estudios Ambientales.  
Laboratorio de Combustibles y Lubricantes  
Facultad de Ingeniería.  
Universidad Metropolitana.  
Urb. Terrazas del Ávila.  
Caracas (Venezuela) 58212240-3554/ 3595.  
E-mail: bleal@unimet.edu.ve