

## ANÁLISIS DE CONTAMINANTES EN ACEITE DE MOTOR DE AVIÓN, Y SU INTERPRETACIÓN PARA EL OVERHAUL DEL MOTOR

Beatriz Leal

Universidad Metropolitana. Caracas. Venezuela

Ana González Marcos

Ruben Lostado

Universidad de la Rioja. La Rioja. España

Joaquín Ordieres

Pedro Cifuentes

Universidad Politécnica de Madrid. España

### Abstract

The goal of this work is to analyse by means of artificial intelligence techniques, real possibilities for identifying when an aircraft motor must be discarded from its normal operation because of wear level. Existing models are to be revised and considered as specific environmental characteristics as well as a very low frequency of use change basic assumptions for these models.

From here the necessity of new models will be considered and discussed.

**Keywords:** *Oils contaminants; wearing models; intelligence artificial techniques.*

### Resumen

En este trabajo los autores tratan de determinar mediante técnicas basadas en Inteligencia Artificial, las posibilidades reales de que los análisis espectrométricos que se realizan periódicamente al aceite del motor puedan ser empleados como predictores del estado del motor.

Algunos trabajos similares han conducido a un modelo simple de regresión lineal , pero en el caso particular de este trabajo se pretende valorar si las específicas condiciones ambientales de la zona y el bajo uso de aeronaves permite discutir la conveniencia de disponer el mismo criterio o de elaborar alguna variante específica.. .

**Palabras clave:** *Contaminantes en el aceite; modelos de desgaste; técnicas de inteligencia artificial.*

### 1. Introducción

Los filtros de aceite capturan una enorme cantidad de información tribológica sobre la operación de una aeronave. Recuperar y analizar los residuos de los filtros se ha mostrado [Toms et al 2008] como una herramienta útil para gestionar la salud de los motores de esas unidades.

Es preciso resaltar que el análisis resulta tedioso pues requiere una técnica cuidadosa, gran experiencia del evaluador y una limpieza homogénea de los filtros, lo que implica un procedimiento operativo exhaustivo y una férrea mecánica de aseguramiento de los mismos, so pena de que los resultados se conviertan en poco valiosos por su oscilación.

El ministerio de defensa del Reino Unido ha evolucionado su sistema FUMS (Fleet and Usage Management System) hacia un sistema de diagnóstico y pronóstico continuo basado en el sistema de ayuda a la decisión para motores de avión y/o helicóptero. El sistema permite la construcción inteligente de aplicaciones de usuario sin la reescritura de software. El sistema incluye como elemento clave del diagnóstico y del pronóstico, los residuos en filtros del sistema de lubricación, cuyo subsistema ha sido bautizado como HUMS (Health and Usage Management System). El sistema se basa en la aplicación rutinaria y sistemática de los procedimientos para disponer de una base de datos consolidada. El ministerio de defensa reporta significativos beneficios en el ámbito militar como resultado de su aplicación diaria [Azzam et al. 2006].

Las ventajas reportadas a través de la gestión de la información proveniente de los residuos en el sistema de lubricación y más concretamente en los filtros de aceite de los motores de aeronaves tienen que ver con la predicción de vida útil del equipo que permita maximizar la disponibilidad del mismo, planificando y ejecutando operaciones de mantenimiento, no sobre una base de horas fijas sino cuando se estima necesario [Powrie 2000] conocido internacionalmente como “mantenimiento basado en condición” (*Condition Monitoring*), que conjuga la predicción con la proactividad. Obviamente en todos los casos se resalta como esencial un sistema muy robusto de monitorización del subsistema de motores de la aeronave para disponer de datos fiables y exhaustivos sobre los que basar los métodos de estimación.

En este trabajo se pretende estudiar la aplicabilidad de estas técnicas al caso de la industria aeronáutica venezolana, donde existen factores tanto ambientales como estructurales que pueden suponer una interesante configuración que merezca un tratamiento específico.

## **2. La visión de uso en la industria aeronáutica venezolana**

En el caso del presente estudio, se han considerado las aportaciones de [Wang et al 2005] en lo relativo a la aplicación de la monitorización del estado o grado de desgaste interno basado en el aceite del motor, quien considera que el análisis del mantenimiento preventivo, basado en el estado del aceite es una herramienta apropiada para maximizar la vida y la disponibilidad de los equipos, lo que ayuda tanto a prevenir y a reducir o eliminar costosos fallos como a reducir mantenimiento e indisponibilidades de servicio innecesarias.

La compañía Shell ha reportado [Jones 2001] que aproximadamente el 70% de los fallos en servicio de los motores de aviación eran debidos a contaminación, de los cuales el 50% tenía que ver con problemas de desgaste y abrasión metálica.

Para la evaluación de partículas que están presentes en el fluido lubricante (por desgaste, contaminación o aditivos) se cuentan con técnicas tales como el análisis espectrométrico (plasma, chispa y absorción atómica), la microscopía electrónica de barrido, el análisis de dispersión de rayos X tanto con como sin fluorescencia, microscopía óptica, ferrografía, conteo de partículas y mas recientemente el monitoreo óptico de partículas conocido como LASERNET que evalúan desde partículas menores al huelgo hidrodinámico hasta partículas de gran tamaño que eventualmente quedan retenidas en los sistemas de filtración, producto

de desgastes severos. Sin embargo, independientemente de la técnica empleada los principios básicos son los mismos: Datos de estado que requieren ser interpretados y, en función de ello, las acciones apropiadas deben ser emprendidas.

Salvo en aquellos casos en los que el estado pueda ser determinado exactamente por los datos obtenidos en términos generales, existirá una relación estocástica entre los datos relativos al mantenimiento predictivo y el estado (no observable) del equipo monitorizado [Wang et al 2005].

El mantenimiento predictivo puede tener naturaleza continua, periódica o basarse en reconocimientos con tiempo variable. También los valores a estudiar, normalmente asociados a ensayos de naturaleza física tendrán una naturaleza escalar, si bien podría ser posible definir estructuras de representación de información útiles de naturaleza vectorial o de otra naturaleza. En este sentido conviene resaltar el hecho de que el mantenimiento predictivo no es un fin en si mismo, sino que plantea un proceso organizado de toma de decisiones que considera aspectos de seguridad, de indisponibilidad o de confiabilidad del equipamiento. Así por ejemplo [Aghjagan 1989] reporta que el sistema de ferrocarriles canadiense implementó un mantenimiento predictivo basado en el análisis de datos (3 a 4 muestras por locomotora y semana durante las 52 semanas del año) y los fallos en las cajas reductoras durante la operación se redujeron un 90%.

La metodología empleada en el sector aeronáutico en concreto puede entenderse con una toma de muestras conforme a un protocolo basado, inicialmente en horas voladas por el motor y, para ellas, llevar a cabo un análisis de laboratorio que permita evaluar su contenido en metales, así como viscosidad y otros factores microbianos [Hussin et al. 2006].

Una vez obtenidos estos valores se lleva a cabo una interpretación de los mismos que trata de establecer la conveniencia de realizar una reparación menor (Top Overhaul) o una reparación total del mismo (overhaul), o bien en continuar con su ciclo de operación, después del pertinente cambio de aceite.

Esta técnica y sus criterios asociados dependen para su interpretación precisa de experimentar unas condiciones determinadas de frecuencias y control del resto de factores que puedan suponer algún tipo de distorsión en la evolución normal del aceite. En el caso venezolano, existen gamas de aviones y segmentos de mercado con muy pocas horas de vuelo durante períodos significativos, lo que, junto a las condiciones ambientales de calor y humedad que reinan en este territorio puede hacer influir, significativamente, determinados factores considerados poco influyentes en las formalizaciones teóricas que vinculan el estado del motor a la presencia de material particulado en el aceite para un régimen de vuelo dado. La discusión de este fenómeno será el interés de este trabajo.

### **3. Estudio de campo**

Los fabricantes de Motores Recíprocos para aeronaves privadas, tales como Teledyne Continental Motors, recomiendan que el tiempo calendario o límite para el reacondicionamiento (Time Between Overhaul TBO), de los motores recíprocos se practique al cumplimiento de los 12 años calendario, o entre las 1200 a 1400 horas de vuelo aproximadamente.

Por otra parte, y dada su importancia para el establecimiento de la producción de metales de desgaste a nivel de cilindros se seleccionaron los resultados de los análisis de un sector

conformado por motores que no han llegado a su tiempo máximo de reacondicionamiento (TBO) pero que ya han cumplido 12 años calendario, lo cual requeriría realizar el reacondicionamiento (Overhall) condición muy común internacionalmente en este sector y que ha requerido atención tanto por la Administración Federal de Aviación [FAA 1993] como por otros países latinoamericanos y por la Venezuela para lo cual se han creado programas de monitoreo por condición que les permiten evaluar las condiciones de aeronavegabilidad año a año pudiendo llegar hasta 18 años calendario [INAC 2004, FAA 1982] para lo cual las aeronaves deben ser sometidas a chequeos funcionales y análisis de aceites usados cada 50 horas o cada año (lo que ocurra primero) por talleres certificados por los institutos aéreos de cada país. Tales chequeos están muy orientados a evaluar las condiciones de los componentes de la cámara de combustión (temperaturas/ compresión/ evaluación visual por boroscopia) y en cierta medida del sistema de lubricación a través de la evaluación de los residuos que encuentran en los filtros de aceite (filtergrafía) y de los análisis espectrométricos y de las propiedades fisicoquímicas de los aceites en uso [Lycoming, Teledyne 2008, Fitch 1999, Toms 1998] Cabe destacar que técnicas predictivas tales como ferrografía [Roynance et al. 2005], filtergrafía [Marquez et al. 2007] y espectrometría [Scekaturóviene 2004, Poley 2007, Macian et al. 2003] requieren de la experticia de un evaluador.

Las aeronaves bajo estudio no operan frecuentemente, es decir menos de 100 horas anuales, y por tanto expuestos a condiciones ambientales propias del trópico (alta humedad y calor) lo que puede promover procesos de corrosión/ herrumbre de las piezas de componentes no lubricados tales como las cámaras de combustión (cilindros/ anillos/ pistones), árbol de levas y sistemas de válvulas sin que ello suponga que los motores no estén en condiciones de operación.

De la observación de algunas de las muestras de laboratorio se concluye que existe un fenómeno subyacente de transporte de metales, pues cuando se muestrea a menos horas de vuelo de las establecidas se constata que los niveles de contaminantes no alcanzan los valores medios para ese motor.

			<b>MODELO:TSIO-520-E</b>
47163	47161	47165	MUESTRA
30/11/2008	12/12/2008	31/12/2008	FECHA TOMADA
49	23	36	TIEMPO DE SERVICIO
179	223	336	TSO (OVERHAUL)
869	913	1026	EQUIPO (horas) totales
19,53	18,89	19,23	VISCOSIDAD 100° C cSt
3,56	1,76	2,57	T.A.N. mgKOH/g
9,37	8,37	7,16	SOOT A/0,1 mm
10,11	5,21	10,18	NITRACION Ab/0,1 mm
13,61	8,16	10,88	OXIDACION Ab/0,1 mm
141	64	143	HIERRO Fe
43	17	58	CROMO Cr
2237	1744	1649	PLOMO Pb
4	2	4	ESTAÑO Sn
39	12	49	ALUMINIO Al
20	6	28	COBRE Cu
45	24	38	NIQUEL Ni
20	8	21	MOLIBDENO Mo
1	1	1	TITANIO Ti
20	8	27	SILICE Si

3	1	4	SODIO Na
1	1	2	MAGNESIO Mg
7	7	5	CALCIO Ca
5	2	5	ZINC Zn

Tabla 1.- Datos mostrando la dependencia con las horas de vuelo

Por otro lado también puede observarse una débil correlación entre algunos compuestos como el contenido en hierro y el tiempo transcurrido entre las tomas de muestras, relacionada con el tiempo sin volar transcurrido:

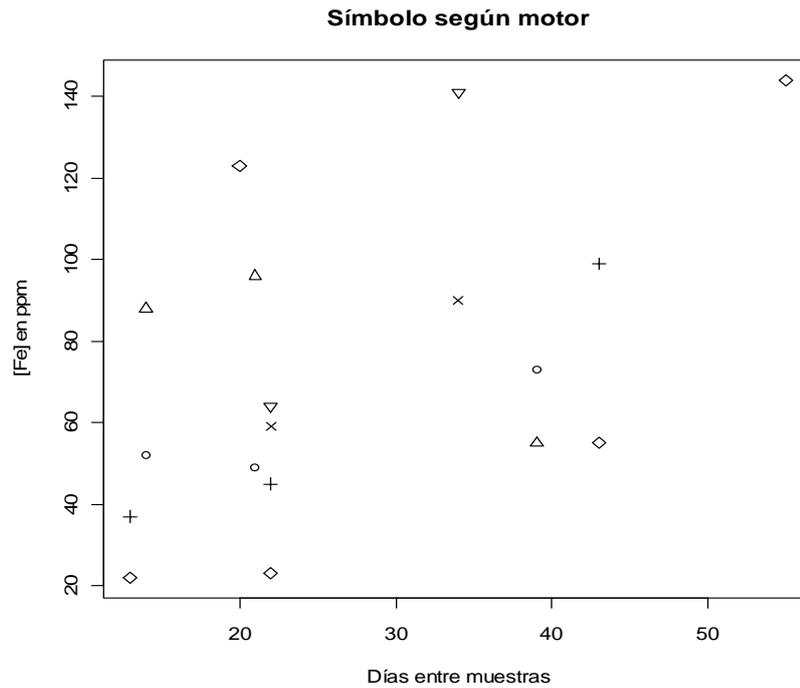


Figura 1: Relación entre tiempo no volado y concentración de metales por motor.

#### 4. Modelos de predicción de concentración de metales

Dada la escasa cantidad de muestras existentes por motor y la variabilidad intrínseca en los valores de cada motor:

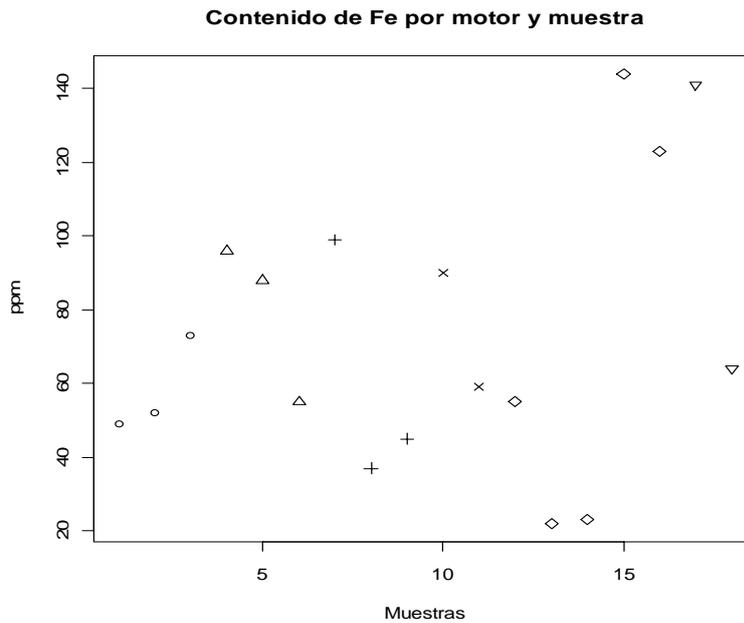


Figura 2. "Variabilidad en los niveles de Fe por motor"

Parece razonable llevar a cabo un ajuste preliminar que elimine la dependencia de las horas voladas con el mismo tipo de aceite, teniendo esto la ventaja de que permite abordar la modelización posterior con un mecanismo de corrección de contaminante producido en el tiempo de uso del aceite y proporcionar un mecanismo de combinación de contaminantes producido en términos de masa total, para poder comparar los criterios con los del SOA [SOA 2004].

Para ello se aceptarán algunas hipótesis que permitan formular la teoría que se desarrolla en este trabajo:

- Cuando un aceite es reemplazado no se queda nada de metal en el motor y, por tanto, la concentración de metales en ese aceite limpio es 0. Es decir, se supone que la cantidad de aceite residual en el radiador es nula.
- La ley de carga de metales en el tiempo en el aceite no es lineal, sino que sigue una ley exponencial  $metal(t) = metal_{final} * e^{-k_1 * t}$
- El paso de aceite de lubricación a la cámara de combustión es constante en el tiempo. Ello supone una pérdida lineal de metales.

Con estas hipótesis básicas, el objetivo será desarrollar una formulación que permita estimar, función del tiempo, la producción másica de metales en los cilindros del motor. Se adoptará una formulación incremental, evaluando los valores de control en los puntos de cambio de aceite del motor.

Esta aproximación tiene la debilidad asumida de que no tolera ausencias en datos de cambio de aceite intermedios y no controlados, así como precisa también conocer la aportación de aceite durante cada período, para mantener los niveles, como indicación de la velocidad de paso de aceite a los cilindros.

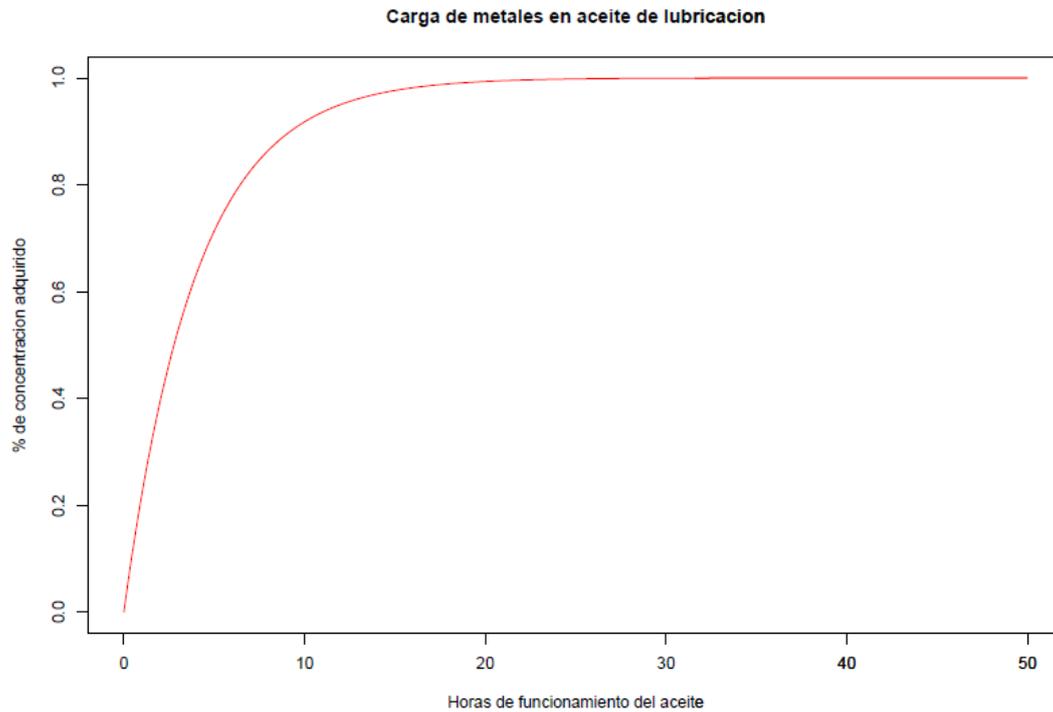


Figura 3. Ley de transferencia de metales al aceite

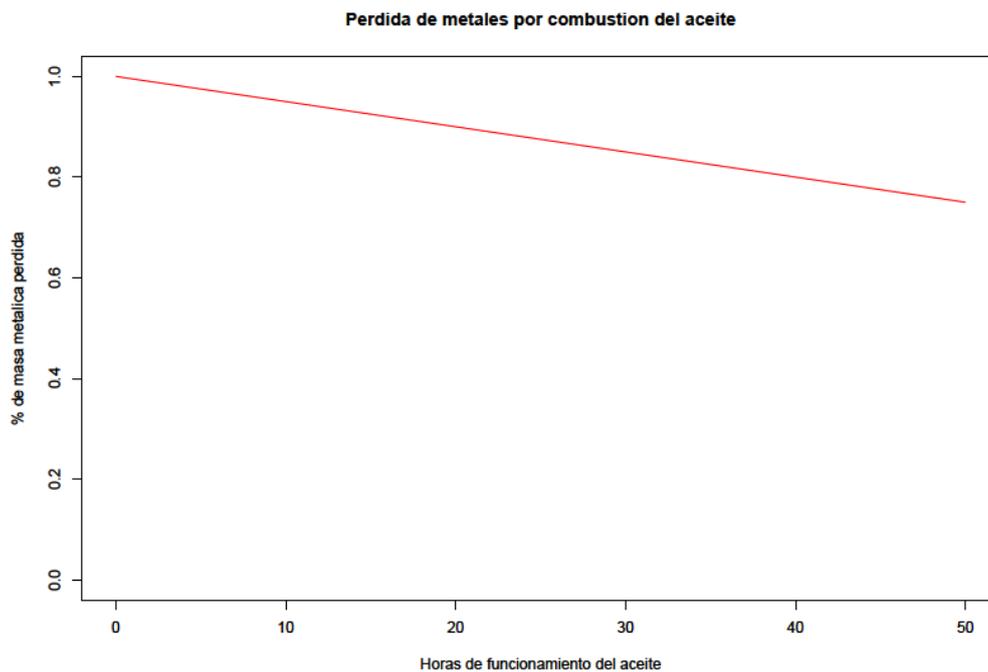


Figura 4. Ley de transferencia de aceite a la cámara de combustión

Designaremos:

Símbolo	Significado
$M(t)$	Masa del metal de interés en mg en el instante $t$
$[M](t)$	Concentración del metal de interés, medida en mg/l en el instante $t$
$M^{\text{TANQUE}}(t)$	Masa de metal debida al aceite en el tanque en el instante $t$

$V^{TANQUE}$	Volumen de aceite en el tanque
$V(t)$	Volumen efectivo de aceite en el tanque en el instante t
$m(t)$	Masa de metal que se ha perdido debido a la combustión del aceite desde el último cambio y hasta la actualidad
$n_i$	Instante del i-esimo cambio de aceite
$t$	Instante actual, cumpliendo que $t > i$
$k_1$	Coeficiente que marca la velocidad de carga de metales en el aceite nuevo.
$k_2$	Coeficiente que marca la velocidad de paso de aceite a los Cilindros.

Con carácter general y teniendo en cuenta la notación definida con anterioridad, se podrá escribir:

$$M(t) = M(n_i) + M^{TANQUE}(t) + m(t) \quad n_i < t \leq n_{i+1}$$

Ahora bien, sabemos que:

$$M^{TANQUE}(t) = [M](t) * V^{TANQUE}$$

El valor de  $m(t)$  se determinará mediante un balance de masas:

$$m(t) = \int_0^t [V^{TANQUE} - V(s)] * [M](s) ds$$

Sustituyendo las relaciones de volúmenes perdidos y de generación de metales en el aceite tendremos:

$$m(t) = \int_0^t k_2 \cdot s \cdot (1 - e^{-k_1 \cdot s}) ds$$

De modo que operando tenemos:

$$m(t) = \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot t^2 + \frac{k_2}{k_1} \cdot e^{-k_1 \cdot t} \cdot (t + \frac{1}{k_1}) - \frac{k_2}{k_1^2}$$

Es decir:

$$M(n_{i+1}) = M(n_i) + [M](\Delta T) \cdot V^{TANQUE} + \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot \Delta T^2 + \frac{k_2}{k_1} \cdot e^{-k_1 \cdot \Delta T} \cdot (\Delta T + \frac{1}{k_1}) - \frac{k_2}{k_1^2}$$

Empleando la expresión anterior y sin más que aplicarla en los sucesivos cambios de aceite, se podrá tener una estimación de la evolución de la masa de metal que ha ido siendo arrancada de los cilindros y evacuada a través del sistema de lubricación.

Nótese, así mismo, que las constantes  $k_1$  y  $k_2$  pueden ser variables en cada intervalo  $n_i < t < n_{i+1}$ , permitiendo así un mayor grado de flexibilidad en la modelización de la realidad.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se justifica la conveniencia de aplicar las técnicas de monitorización de contaminantes en el aceite de motores de aviación, para valorar su potencial contribución a las técnicas de mantenimiento predictivo. También se identifica la dificultad del análisis con

cada muestra, derivado de la variabilidad de cada modelo de avión y de cada equipo dentro de un modelo, así como de la diferente frecuencia de muestreo.

Por ello se ha llevado a cabo la formulación de un modelo constructivista incremental de producción de metales arrastrados al sistema de lubricación que permita tener en cuenta la diferente edad del aceite. A partir de esta formulación se aplicarán técnicas de minería de datos para estimar los coeficientes mediante regresores y ajustar la estimación de producción de metales a lo largo de los períodos de funcionamiento, como elementos clave para poder construir una ley de evolución de contaminantes.

## Referencias

- Aghjagan H.N., "Lube oil analysis expert system", Can Maintenance Eng Conf, Toronto, 1989.
- Azzam, H., Knight, P. , Cook, J , Moses, E. "FUMS™ fusion and decision support for intelligent management of aircraft data". IEEE Aerospace Conference Proceedings. Volume 2006, 2006, Article number 1656115.
- Federal Aviation Administration.(FAA). *Aeronautics and Space. Part. 43. Maintenance, Preventive Maintenance, Rebuldind and Alteration.* Cap. 3. USA. (1993).
- Federal Aviation Administration (FAA). *Records of overhaul and rebuilding.* Part 43.2. USA. (1982).
- Fitch, J. Troyer, D. "Oil Analysis Basics", Noria (1999)
- Hussin B, Wang W. "Conditional residual time modelling using oil analysis: A mixed condition information using accumulated metal concentration and lubricant measurements". Proceedings of the First International Conference on Maintenance Engineering. 2006. pp 328-336.
- Instituto Nacional de Aviación Civil (INAC). "Programa de Mantenimiento por Condición de Motores Recíprocos Instalados en Aeronaves Privadas". Circular de Asesoramiento, AC N- 43-50. (2004).
- Jones M.H., "Tribology-a key element in condition monitoring, Proc Condition Monitoring 2001, Coxmoore, Oxford, 2001, pp. 20–29.
- Lycoming Division. "General Aspects of Spectrometric Oil Analysis". Service Letter N° L 171. AVCO Williamsport, Pennsylvania 17701.
- Macian V., B. Tormos, P. Olmeda, L. Montoro. "Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis". Tribology International 2003 Vol. 36 pp. 771–776
- Marquez, F. Schmid, F "A digital filter. Based approach to the remote condition monitoring of raliway turnouts". Realibility Engineering & System Safely. (2007), Vol. 92 pp 830-840.
- Poley, J. "Know your limitiations in evaluating data".. Tribology & Lubrication Technology. 2007
- Powrie, H. "Use of electrostatic technology of aero engine oil system monitoring". IEEE Aerospace Conference Proceedings. Volume 6, 2000, pp 57-72
- Roylance B. J. "Ferrography- them and now" . Tribology International Vol- 38 (2005) pp 857-862
- Scekaturoviene, D. Visniakov. "Atomic Emission Spectrometric Analisys in the Assessment of Wearing of Vehicle Engines". Materials Science Vol. 10, No 1. (2004).

- SOA. United States Air Force. Manual de Procedimientos JOAP (Joint Oil Analysis Program). USA. 2004
- Teledyne Continental, Aircraft Engine. Service Information Letter. Time Between Overhaul Periods. [www.tcmlink.com/distributor/servicebulletins.cfm](http://www.tcmlink.com/distributor/servicebulletins.cfm) Pág. 1-4. Alabama, U.S.A. 2003
- Teledyne Continental Motors// Visitor Services/ Oil Analysis):  
<http://tcmlink.com/visitors/index.cfm> [5/4/2008]
- Toms, L. "Expert Systems, a decade of use for used-oil data interpretation". (1998)
- Toms A.M., Cassidy K. "Filter Debris Analysis for Aircraft Engine and Gearbox Health Management". Journal of Failure Analysis and Prevention. Volume 8, Number 2 / abril de 2008. pp 183-187.
- Wang W, Zhang W. "A Model To Predict the Residual Life of Aircraft Engines Based upon Oil Analysis Data". Naval Research Logistics, Vol. 52 .2005, pp 277-284.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen al MICINN (<http://www.micinn.es>) por su contribución inestimable a los desarrollos que han dado lugar a este trabajo, gracias a la cofinanciación del proyecto DPI2007-61090. A la Universidad Metropolitana (<http://www.unimet.edu.ve>) por su apoyo a esta línea de investigación, y a Industrias Venoco C A (<http://www.venoco.com>) por su invaluable apoyo en el financiamiento de los análisis de aceites usados

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

Leal, Beatriz C.  
Departamento de Estudios Ambientales.  
Facultad de Ingeniería.  
Universidad Metropolitana.  
Urb Terrazas del Ávila.  
Caracas (Venezuela) 582122403554.  
E-mail: [bleal@unimet.edu.ve](mailto:bleal@unimet.edu.ve)