

# Estimación del desgaste volumétrico de componentes tribológicos lubricados, mediante la aplicación combinada de modelos de cuantificación de partículas de desgaste

Yamile Lara

Universidad de Oriente  
Centro de Termofluidodinámica y Mantenimiento (CTYM)  
Puerto La Cruz,  
VENEZUELA.

Fax: 0281-4203271, apartado: 4653

correos electrónicos (email): yamilelara@gmail.com  
ylara@udo.edu.ve

Recibido 04-08-2016, aceptado 20-12-2016.

## Resumen

Se presenta un estudio que combina los modelos propuestos por Espinoza [1], Macian *et al.* [2] e Iwai [3], los cuales plantean aproximaciones analíticas entre el desgaste de las máquinas y la concentración de las partículas contaminantes presentes en el aceite que las lubrica. Para esto, se realizó un estudio experimental de desgaste por deslizamiento de piezas de metal, en diferentes condiciones de operación, con una máquina tribológica, la cual posee una parte dinámica (cilindros de desgaste) y una parte estática (cojinetes de contacto deslizante). La contaminación del lubricante se midió con un espectrómetro de emisión atómica y un contador de partículas. Se concluye, que los modelos de cuantificación de desgaste propuestos por Espinoza [1], Macian *et al.* [2] e Iwai [3], por sí solos, presentan diferencias significativas, entre un 50% y 80%, con respecto al valor de desgaste que se quiere medir, sin embargo con los datos experimentales obtenidos y la aplicación combinada de estos modelos es posible minimizar el error relativo porcentual en un 20 y 30%.

**Palabras clave:** desgaste, modelos analíticos, análisis de lubricante.

## Abstract (Volumetric Wear Estimation of Lubricated Tribological Components by Means of Combining Analytical Models for Wear Prediction)

Espinoza [1], Macian *et al.* [2] and Iwai [3] developed analytical models to correlate machine wear to the concentration of wear particles found in their lubricant. A wear apparatus was designed and built in order to address the validity of the proposed models. The apparatus, composed of a rotating wear cylinder and a static contact bearing, allows sliding metal parts at different operational conditions. The wear particles captured in the lubricant were measured with an atomic emission spectrometer and a particle counter. Then, the parameters of the Espinoza [1], Macian *et al.* [2], and Iwai *et al.* [3] were calculated. The predicted wear with the fitted models were off by as much as 50%, in some cases 80%, when compared with the experimental wear. This work shows that the models, in fact, complement each other and that the combined model can reduce the relative error, when predicting wear, somewhere between 20% and 30%.

**Index terms:** wear, analytical approaches, used oil analysis.

## 1. Introducción

El análisis de las partículas que son generadas por el roce de dos o más superficies en contacto y en movimiento relativo, que son transportadas por el aceite lubricante (partículas de desgaste), se ha consolidado como una técnica con gran potencial para la estimación cuantitativa del desgaste en los sistemas tribológicos lubricados (STL).

En efecto, en diversos trabajos presentados por la comunidad científica del área tribológica, se ha reseñado que el estudio de la morfología, tamaño, concentraciones y composiciones de estas partículas, proveen valiosa información de los mecanismos y severidad del desgaste que pudiera presentarse en la operación de los STL [4], [5], [6], [7], [3].

Esto ha impulsado dos campos de investigación: uno, enfocado al estudio morfológico de las partículas de desgaste [6] [8] y el otro, dirigido a su cuantificación [9], [10], [1], [11], para lo cual, se ha promovido el desarrollo de varias técnicas que permiten determinar la presencia de estas en el aceite y evaluar sus características.

Este conjunto de técnicas que se pueden clasificar como métodos de monitoreo continuo (e.g., analizadores ferromagnéticos, contadores de partículas) y métodos de monitoreo discontinuos o de laboratorio (e.g., espectrometría, ferrografía analítica, conteo de partículas) [12], [13], poseen limitaciones importantes (e.g. límites de detección, sensibilidad), que son inherentes al fenómeno físico que las gobierna, por lo que el desgaste estimado a través de las mismas, no se correlaciona con el desgaste verdadero que se quiere medir.

De lo anterior, se infiere, que la determinación del desgaste a partir del análisis de partículas contaminantes en el lubricante, aún es una técnica que se encuentra en desarrollo y que requiere de una mayor investigación.

En cuanto a los antecedentes, Tormos [11] indica que varios investigadores entre los que se pueden nombrar: Rigaux, Pérez, Kjer, Hubert, Stodola, Espinoza, Fygueroa, Macian *et al.*, desarrollaron aproximaciones analíticas modelando algunos aspectos que afectan la determinación de las concentraciones de las partículas de desgaste en motores de combustión interna usando técnicas espectrométricas. Estos trabajos presentan metodologías que se extienden desde los acercamientos estadísticos, corrección y normalización de los efectos de la condición de funcionamiento del motor sobre las concentraciones, hasta la búsqueda de concentraciones de referencia que permitan caracterizar el grado de contaminación de aceite y generar escalas comparativas confiables [14], [15]. En el año 2010, Iwai *et al.* [3], propusieron un modelo que permite estimar cuantitativamente el desgaste de piezas bajo condiciones de lubricación, pero usando la técnica de conteo de partículas.

Basado en lo anteriormente expuesto, y destacando que la verificación experimental de los modelos analíticos es de vital importancia para garantizar la confiabilidad de los resultados y su aplicabilidad en el sector industrial, el presente trabajo experimental, está dirigido a la evaluación del desgaste que se produce en componentes tribológicos, mediante la aplicación combinada de los modelos de cuantificación de desgaste propuestos por: Espinoza [1], Macian *et al.* [2] e Iwai *et al.* [3], buscando una mejor aproximación al valor del desgaste real.

Para esto, se realizan pruebas de desgaste por deslizamiento de piezas de metal lubricadas, en diferentes condiciones de

operación, con una máquina tribológica diseñada para tal fin, la cual se caracteriza por poseer una parte dinámica (cilindros de desgaste) y una parte estática (cojinetes de contacto deslizante).

## 2. Desarrollo

### 2.1. Metodología y resultados

El desarrollo de esta investigación se presenta por etapas (véase Fig. 1) a fin de facilitar su comprensión.

#### **Etapas 1. Revisión de los modelos analíticos de cuantificación de partículas de desgaste en aceite lubricante usado, basados en espectrometría de emisión atómica y conteo de partículas**

Los modelos presentados por Espinoza [1], Macian *et al.* [2], se basan en determinar la velocidad de desgaste de un motor de forma indirecta con la medición de la velocidad de contaminación del aceite usando espectrometría. El modelo desarrollado por Espinoza [1], corrige la concentración de las partículas de desgaste generadas por un motor considerando la influencia combinada del filtro, consumo y añadidos de aceite. Por otra parte, Macian *et al.* [2], describen una formulación parecida a la de Espinoza [1], sin considerar el filtro de aceite, pero incorporando en su el consumo de aceite por evaporación que se presenta en los motores. En ambos modelos, se calcula el aporte de elementos químicos individuales de las partículas contenidas en el aceite lubricante, lo cual podría relacionarse con el desgaste volumétrico total del STL, pero se requiere de una mayor investigación para relacionarlo con el desgaste de un componente específico de un STL complejo [16].

Por otro lado, Iwai *et al.* [3] desarrollaron una formulación matemática usando las características geométricas de las celdas de flujo de los contadores de partículas ópticos y de las partículas contenidas en el aceites. Con este modelo se pue-

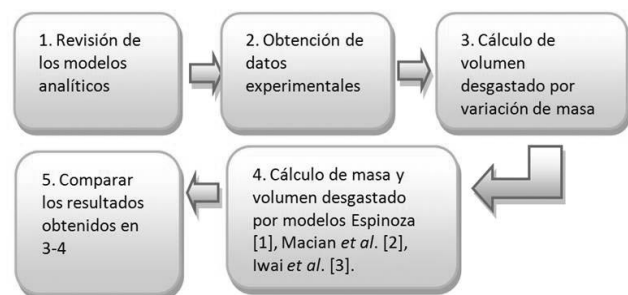
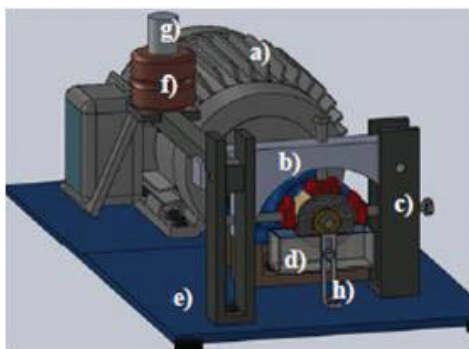


Fig. 1. Etapas de desarrollo de la investigación.



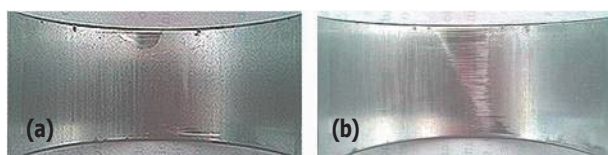
**Fig. 2.** Esquema del equipo utilizado para la generación de desgaste. Partes: a) motor, b) porta cojinete, c) soporte, d) depósito de lubricante, e) base, f) banco de pesas, g) guía de pesas, h) elemento de ascenso-descenso.

de cuantificar directamente el desgaste volumétrico total de las piezas de un STL, pero como el contador óptico no indica la composición química de las partículas, los resultados de desgaste obtenidos, no se pueden relacionar con algún componente específico de los STL.

### Etapa 2. Obtención de los datos experimentales: concentración y características geométricas de las partículas de desgaste en condiciones de laboratorio

El estudio demandó la obtención de muestras de aceite lubricante con partículas de desgaste generadas con un STL simple con el que se pudiera calcular el desgaste real generado en las piezas a través del método de variación de masa, por lo que se utilizó el equipo presentado en la Fig. 2, el cual hace incidir cojinetes de contacto deslizante con la parte periférica de unos discos de desgaste, a una velocidad constante y bajo condiciones de carga controladas.

Para la medir las concentraciones de partículas en el aceite lubricante se usó un espectrómetro de emisión atómica (Spectroil M) y un contador de partículas Laser Net FinesC. Hubo un especial cuidado en la homogenización de las muestras, ya que esto tiene un efecto importante en los resultados experimentales que se obtienen [16].



**Fig. 3.** Huellas del desgaste generadas en los cojinetes usados en el ensayo 1 (a) y el ensayo 2 (b).

**Tabla 1.** Condiciones de operación de los ensayos.

Parámetro	Ensayo 1	Ensayo 2
Voltaje	40 V	40 V
Velocidad giro (rpm)	1690-1715	1690-1715
Cantidad de aceite (ml)	200	200
Carga (N)	156,44	501,06
Presión contacto (kpa)	57,6	103,29
Tipo de lubricante	SAE 20 W 50	SAE 20W 50
Distancia recorrida (km)	45	45
Número de muestras	10	10
Cantidad de muestra (ml)	5	5

Seguidamente, a través de pruebas de funcionamiento del equipo de generación de desgaste, se establecieron las condiciones experimentales mostradas en la Tabla 1, lográndose recrear 2 escenarios: El "ensayo 1" con condiciones de poco desgaste y el "ensayo 2" de mayor desgaste.

En conformidad con los escenarios usados (ensayo 1 y ensayo 2) en la Fig. 3 se muestran imágenes fotográficas de marcas de desgaste dejadas en la superficie de los cojinetes luego de realizar los ensayos, se evidencia mayor desgaste en el cojinete que fue ensayado con mayor carga (véase Fig. 3b).

Los elementos químicos considerados para el cálculo de los métodos que usan espectrometría fueron aluminio (Al), estaño (Sn) hierro (Fe) y plomo (Pb), se seleccionaron después de comparar los resultados de desgaste obtenidos en pruebas piloto, la composición química del AISI 4140, material del disco de desgaste, y de un análisis de espectrometría dispersiva de rayos X (EDAX) realizado al cojinete usado (véase Tabla 2).


### Etapa 3. Cálculo del volumen desgastado de las piezas por el método de variación de masa

Usando el método de variación de masa de las piezas (cojinete + disco) y con la información de la densidad de los materiales, se determinó el volumen desgastado generado las piezas (véase Tabla 3), el cual es considerado el valor de referencia "desgaste real volumétrico" para esta investigación.

### Etapa 4. Cálculo del volumen desgastado por los modelos Espinoza [1], Macian *et al.* [2] e Iwai *et al.* [3]

En la Fig. 4, se muestran las concentraciones experimentales, y las corregidas por el modelo de Espinoza [1] para el Al,

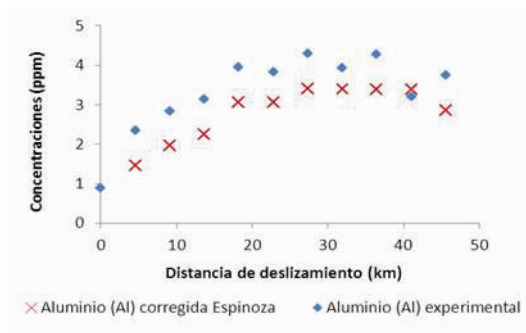
**Tabla 2.** Resumen del análisis químico obtenido para el semicojinete de biela en estudio.

Área	Metal	%Wt
		
A	Hierro	100,00
B	Aluminio	100,00
C	Matriz: Aluminio	84,80
D	Matriz: Plomo	81,20
Capa de contacto	Plomo	89,58
	Hierro	1,96
	Indio	8,46

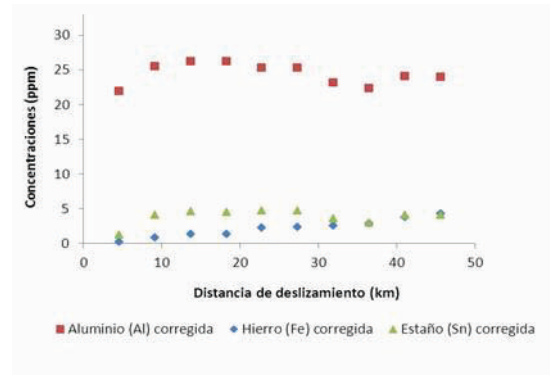
**Tabla 3.** Desgaste real volumétrico del conjunto cojinete-disco para cada ensayo realizado.

Ensayo	Tribo-elemento	Variación de masa (mm <sup>3</sup> )
1.	cojinete + disco	0,7407
2.	cojinete + disco	3,3425

correspondiente al ensayo 1, donde se evidencia, que este método, permite corregir las desviaciones ocasionadas por fugas y añadidos. Se observa que a partir de 27,36 km de deslizamiento, las concentraciones se mantuvieron constantes (3,41 ppm), con pequeñas variaciones propias del instrumento, lo que indica que a partir de ese punto no se generó más desgaste.



**Fig. 4.** Gráfico de comparación de concentraciones experimentales y concentraciones corregidas para el elemento aluminio (Al) versus la distancia en km.



**Fig. 5.** Gráfico de las concentraciones corregidas del hierro (Fe), aluminio (Al) y el estaño (Sn) versus la distancia de deslizamiento en km.

En la Fig. 5, para el ensayo 2, se observan las concentraciones corregidas por el modelo de Espinoza [1] de los elementos: Fe, Al y Sn. Se observa que el Al dejó de desgastarse a los 13,68 km de deslizamiento, el Sn a los 27,36 km, mientras que el Fe estuvo desgastándose hasta el final de la prueba (45,5 km).

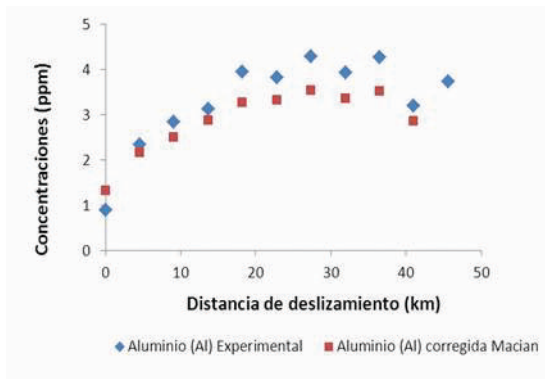
En la Tabla 4, se presentan los resultados de las masas contaminantes acumuladas de los elementos químicos estudiados en los ensayos 1 y 2 usando el modelo de Espinoza [1]. Para la correspondencia en gramos (g) se empleó la Ec. 1, considerando el volumen total de aceite usado por ensayo (200 ml).

En la Fig. 6, se muestran las concentraciones experimentales, y las concentraciones corregidas por el modelo de Macian *et al.* [2] para el Al, correspondiente al ensayo 1. Se observa que este método también corrigió las concentraciones experimentales en cuanto a fugas y añadidos y a partir de 27,36 km de deslizamiento (3,53 ppm) no se produjo más desgaste.

**Tabla 4.** Masa de contaminantes: aluminio (Al), hierro (Fe) y estaño (Sn) (ppm) para el ensayo 1 y 2, en un volumen de 200ml, y su equivalencia en gramos (g).

Ensayo	Elemento	Masa (ppm)	Masa (g)
1.	Aluminio (Al)	682,04	0,00055
2.	Hierro (Fe)	863,00	0,00069
	Aluminio (Al)	5243,92	0,00419
	Estaño (Sn)	944,00	0,00076



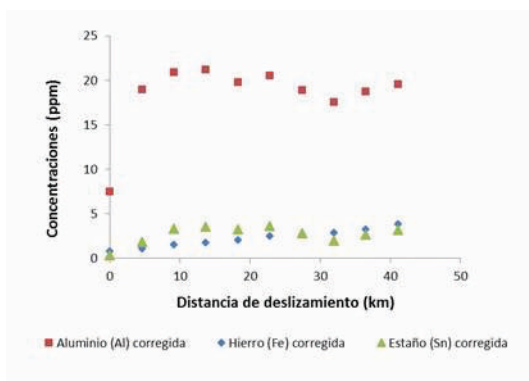


**Fig. 6.** Gráfico que compara las concentraciones experimentales vs las concentraciones corregidas del aluminio (Al) versus la distancia en km.

La Fig. 7, muestra el gráfico de las concentraciones corregidas de los elementos Fe, Al y Sn por el modelo de Macian *et al.* [2]. Se observa que el Al dejó de desgastarse a los 13,68 km de deslizamiento, el Sn a los 22,80 km y el Fe estuvo desgastándose hasta el final de la prueba (45,5 km).

En la Tabla 5, se presentan los resultados de las masas contaminantes acumuladas de los elementos químicos estudiados en ensayos 1 y 2 usando el modelo de Macian *et al.* [2].

Para el cálculo de Iwai *et al.* [3], los datos geométricos de la celda de flujo se consiguieron del equipo, y el espesor de las partículas, se obtuvo filtrando muestras aceite con tamices de diferentes tamaños y midiendo estadísticamente el espesor de las partículas filtradas con la ayuda de un microscopio óptico. Los resultados obtenidos se graficaron y se encontró relación entre el tamaño de las partículas y su espesor (véase Fig. 8).



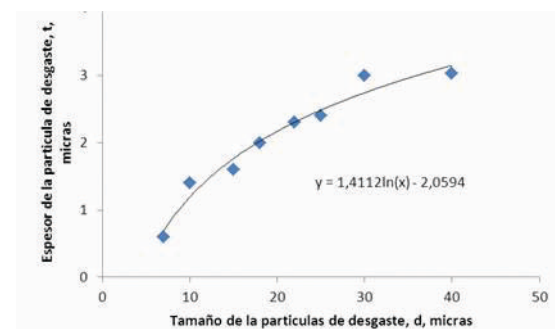
**Fig. 7.** Gráfico de las concentraciones corregidas del hierro (Fe), aluminio (Al) y el estaño (Sn) versus la distancia de deslizamiento en km.

**Tabla 5.** Masa de contaminantes: aluminio (Al), hierro (Fe) y el estaño (Sn) (ppm) para el ensayo 1 y 2, en un volumen de 200 ml, y su equivalencia en gramos (g).

Ensayo	Elemento	Masa (ppm)	Masa (g)
1.	Aluminio (Al)	707,6	0,00057
2.	Hierro (Fe)	773,2	0,00062
	Aluminio (Al)	4251,0	0,00340
	Estaño (Sn)	733,6	0,00059

En las tablas 6 y 7, se presenta el volumen de desgaste promedio por intervalo de distancia, para el ensayo 1 y el ensayo 2, respectivamente. Se puede observar, que a pesar de que en el ensayo 2 se genera una mayor cantidad de partículas (part/ml) que en el ensayo 1, el desgaste global calculado ( $W$ ) por este modelo es mayor para el ensayo 1. Esta incongruencia se debe, al cálculo del diámetro equivalente ( $d$ ) de las partículas de desgaste que hace el instrumento de medición, la cual puede estar afectada por la presencia de burbujas de aire en la muestra, y la posición en la que la partícula de desgaste pasa por la celda de flujo.

En las tablas 6 y 7 se observa que el volumen de desgaste generado evaluado por distancia deslizada (km), disminuyó con el tiempo tanto para ambos ensayos. Esto es de esperarse, ya que el desgaste inicial se generó en condiciones de lubricación de película delgada habiendo mayor contacto



**Fig. 8.** Relación entre el tamaño y el espesor de las partículas de desgaste del conjunto disco de desgaste-cojinete estudiado.

**Tabla 6.** Volumen de desgaste promedio generado (W), por intervalo de distancia (km) para el ensayo 1.

Ensayo 1					
km	part/ml	q(núm/ml)	d(micras)	t(micras)	W(micras <sup>3</sup> )
0	18200				
0	143580	109045	7	0.69	126387740.6
5	229526	85946	6.9	0.67	93927072.31
10	302002	72476	6.8	0.65	74548692.77
15	366917	64915	6.9	0.67	70943102.63
20	426734	59817	7.1	0.71	73404674.16
25	482777	56043	6.9	0.67	61247235.63
30	535866	53089	7.1	0.71	65148381.67
35	586551	50685	6.6	0.60	45908819.14
40	635222	48671	7.2	0.73	63136570.03
45	681160	45938	7.3	0.75	62899564.26
<b>Total (micras<sup>3</sup>) = 737551853.23</b>					
<b>Total (mm<sup>3</sup>) = 0.7376</b>					

**Tabla 7.** Volumen de desgaste promedio generado (W), por intervalo de distancia (km) para el ensayo 2.

Ensayo 2					
km	part/ml	q(núm/ml)	d(micras)	t(micras)	W(micras <sup>3</sup> )
0	18200				
0	492316	474116	6.2	0.52	323572640.1
5	681142	188826	5.9	0.45	100852000.8
10	791597	110455	5.9	0.45	58994035.51
15	869967	78370	6.1	0.49	49469096.92
20	930755	60788	5.9	0.45	32466881.81
25	980422	49667	6.2	0.52	33896519.66
30	1022420	41998	6.3	0.54	30891203.56
35	1058790	36370	6.1	0.49	22957650.31
40	1090880	32090	6	0.47	18669056.3
45	1118980	28100	6.1	0.49	17737420.23
<b>Total (micras<sup>3</sup>) = 689506505.24</b>					
<b>Total (mm<sup>3</sup>) = 0.6895</b>					

entre las superficies (cojinete-disco de desgaste) y posteriormente con el desgaste de las piezas, se llegó a una condición hidrodinámica sin contacto.

### Etapa 5. Comparación de los resultados obtenidos por los modelos estudiados y el método de variación de masa

En la Tabla 8 se muestra el desgaste obtenido en mm<sup>3</sup> y el error relativo porcentual (ER%) de cada método tomando como referencia los valores de la variación de masa. Es importante destacar, que los resultados del método de variación de masa, los obtenidos por el método de Espinoza [1] y de Macian *et al.* [2], se pasaron a volumen perdido (mm<sup>3</sup>), usando la densidad volumétrica de los materiales previamente estudiados.

Como se observa en la Tabla 8, existe una marcada diferencia entre el desgaste perdido determinado por el método de variación de masa y los obtenidos por el modelo de Espinoza [1] y de Macian *et al.* [2], para el ensayo 1 y 2, con errores relativos porcentuales de 73% y 47%, y de 64% y 48%, respectivamente. Esto se debe, a que la espectrometría posee limitaciones en la detección de partículas con tamaños mayores a 8 micras. En cuanto al modelo de Iwai *et al.* [3] se observa para el ensayo 1, una buena aproximación con un error relativo porcentual del 0,41%, contrariamente al resultado del ensayo 2 (ER% de 79,4%). Esta variación tan significativa entre los ensayos 1 y 2, para este último modelo, puede deberse al diámetro equivalente promedio usado para el cálculo, *d*, variable de entrada al modelo (y que también se usó para determinar el espesor de las partículas), que puede estar afectado por la presencia de burbujas de aire, y la posición en la que la partícula pasa por la celda de flujo del instrumento, debido a que es un contador del tipo óptico.

En este sentido, Iwai *et al.* [3] en la presentación de su modelo plantea, que para velocidades y cargas pequeñas, se pueden presentar diferencias relativamente grandes en los resultados.

### 3. Discusión

Se evaluaron tres modelos analíticos a través de los cuales se puede obtener el desgaste volumétrico de los componentes de un STL y que utilizan dos técnicas diferentes de cuantificación de partículas, que son complementarias: el modelo de Espinoza [1] y el de Macian *et al.* [2], usan la técnica de espectrometría de emisión, con el que se puede cuantificar partículas con tamaños de 1 a 8 micras, y el modelo de Iwai *et al.* [3], que usa el conteo de partículas, cuantificando partículas con tamaños desde 5 a 100 micras. En este sentido, la propuesta de esta investigación consiste en combinar el modelo de Espinoza [1] con

**Tabla 8.** Resumen del desgaste obtenido por el método de variación de masa y los modelos estudiados.

Ensayo	Tribo-elemento	Variación de masa	Volumen perdido (mm <sup>3</sup> )		
			Iwai <i>et al.</i> (ER%)	Espinoza (ER%)	Macian <i>et al.</i> (ER%)
1	cojinete + disco	0,7407	0,7376 (.41%)	0,2022 (73%)	0,2111 (64%)
	cojinete + disco		3,3425	0,6895 (79,4%)	1,7403 (47%)

el de Iwai *et al.* [3] y el modelo de Macian *et al.* [2] con el de Iwai *et al.* [3], para comprobar si existe o no, mejoría de los resultados obtenidos (véase Tabla 8) con respecto al valor de desgaste real que fue obtenido por el método de variación de masa.

Para evitar la cuantificación doble de las partículas en el rango de solape de los métodos (5 a 8 micras) y considerando las observaciones realizadas por Iwai *et al.* [3] en cuanto a las causas de las desviaciones en los resultados obtenidos por su modelo (esto en función de tratar de minimizar los problemas relacionados con la distribución de partículas), se realizó nuevamente el cálculo para el método de Iwai *et al.* [3], pero solo se consideraron partículas iguales y mayores a 20 micras, aprovechando que el software del contador posee un reporte especial para estas, lo cual resultó ser más confiable para los cálculos subsiguientes.

Luego, los resultados determinados con el modelo de Espinoza [1] y el modelo de Macian *et al.* [2], por separado, se suman con los resultados de este nuevo cálculo (véase Tabla 9) obteniéndose el desgaste volumétrico (mm<sup>3</sup>) de la combinación de los modelos mostrados en la Tabla 10.

**Tabla 9.** Resumen de resultados obtenidos por el método de Iwai *et al.* [3] considerando solo partículas iguales y mayores a 20 micras.

Ensayo	Tribo-elemento	Volumen perdido (mm <sup>3</sup> ) Iwai <i>et al.</i>
1	cojinete + disco de desgaste	0,2139
2	cojinete + disco de desgaste	0,5999

## 4. Conclusiones

- Los modelos de cuantificación de desgaste propuestos por Espinoza [1], Macian *et al.* [2], e Iwai *et al.* [3], presentan por si solos, diferencias significativas respecto al valor real de desgaste que se quiere medir.
- La aplicación combinada de los modelos estudiados es posible, para el cálculo volumétrico de del desgaste y con esto se obtiene un valor de desgaste que se aproxima mejor al valor real.
- El modelo de Iwai, se aproxima muy bien al desgaste obtenido en un intervalo de tiempo dado.
- El desgaste calculado a partir de las concentraciones medidas por espectrometría, es inferior a la real, ya que detecta una fracción del desgaste total.

## Referencias

- [1] H. Espinoza, "Diagnóstico de fallos en motores de encendido por compresión de automoción". Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España, 1990.
- [2] V. Macián, B. Tormos, P. Olmeda, & L. Montoso, "Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis," *Tribology International*, núm. 36, pp. 771-776, 2003.
- [3] Y. Iwai, T. Honda, T. Miyajima, S. Yoshinaga, M. Higashi, & Y. Fuwa, "Quantitative estimation of wear amounts

**Tabla 10.** Resumen de los resultados obtenidos por el método de variación de masa y el desgaste obtenido por la combinación de los modelos estudiados, y error relativo porcentual (ER%) de cada uno de estos modelos con respecto a la variación de masa.

Ensayo	Tribo-elemento	Variación de masa	Volumen perdido (mm <sup>3</sup> )	
			Iwai <i>et al.</i> + Espinoza (ER%)	Iwai <i>et al.</i> + Macian <i>et al.</i> (ER%)
1	cojinete + disco	0,7407	0,4161 (43%)	0,4225 (42%)
	cojinete + disco		3,3425	2,3403 (30%)

- by real time measurement of wear debris in lubricante oil," *Tribology International*, núm. 43, pp 388-394, 2010.
- [4] K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*. Ed. Elsevier, 2002.
- [5] P. Dempsey, D. Lewicki, & H. Decker, *Investigation of Gear and Bearing Fatigue Damage Using Debris Particle Distributions*, NASA/TM-2004-212883. EEUU, 2004.
- [6] A. Memon, & S. Mohammad, "Building Relationship Network for Machine Analysis from Wear Debris Measurements," *International Journal of computational intelligence*, vol. 3, núm. 2, 2006.
- [7] N. Myshkin, L. Markova, & A. Grigoriev, "Condition Monitoring and Predictive Analysis of Tribosystems by Wear Debris," *Practicing Oil Analysis Magazine*, 2005.
- [8] A. Sala, B. Tormos, V. Macian, & E. Royo, "Fuzzy diagnosis module based on interval fuzzy logic: oil análisis aplicación," *ICINCO 2005. International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, España, (2005)
- [9] D. Anderson, & R. Driver, "Equilibrium Particle Concentration in Engine Oil," *Wear* 56, pp. 415-419, 1979.
- [10] J. Brown, C. Saba, W. Rhine W. & K. Eisentraut, "Particle Size Independent Spectrometric Determination of Wear Metals in Aircraft Lubricating Oils," *Analytical Chemistry*, núm. 52, pp. 2365-2370, 1980.
- [11] B. Tormos, *Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado*. Ed. Reverté, España, 2005.
- [12] A. Davies, *Handbook of Condition Monitoring*, Ed. Springer, Londres, UK, 1998.
- [13] S. Raadnui, "Transmission condition evaluation through magnetic chip detector (MCD) ferrous wear particle analysis," in: Shrivastav OP, Al-Najjar B & Rao RBKN (eds) *Proc of the 16th Int Congress of COMADEM*, Växjö, Sweden, 27th - 29th August 2003, pp. 473-479, 2003.
- [14] Y. Lara, & H. Espinoza, "Estudio comparativo del desgaste en un motor de encendido por chispa usando gasolina y gas natural como combustible", *Científica*, vol. 13, núm. 1, 2009.
- [15] Y. Lara, & H. Espinoza, "Modelo analítico para la determinación de la velocidad de desgaste en motores de encendido provocado mediante análisis de lubricante," *Científica*, vol.12, núm. 2, 2008.
- [16] Y. Lara, "Estimación del desgaste en componentes tribológicos lubricados, mediante la aplicación combinada de modelos de cuantificación de partículas contenidas en el lubricante," Tesis de maestría. Universidad de Oriente núcleo Anzoátegui, Barcelona, Venezuela, 2011

## Sistema de Información Científica

Redalyc:

Red de Revistas Científicas de América Latina  
y el Caribe, España y Portugal

[www.redalyc.org](http://www.redalyc.org)