

# La normalización de las concentraciones de partículas de desgaste en aceite aplicada a motores diesel

Henry Espinoza<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Centro de Termofluidodinámica y Mantenimiento, Instituto de Investigación y Desarrollo Anzoátegui, Universidad de Oriente, Venezuela  
\*hjespinozab@gmail.com

Fecha de recepción del artículo: 1/6/2011 Fecha de aceptación del artículo: 1/7/2011

## Resumen

En el presente trabajo se presentan los fundamentos del modelo de normalización de análisis del aceite lubricante de motores de combustión interna alternativos y la aplicación la evaluación de la velocidad de desgaste del elemento hierro en un motor diesel mono cilíndrico. El método de normalización representa un aporte importante al uso de técnicas en la evaluación del desgaste y el diagnóstico de fallas, ya que independiza el análisis del tipo y tamaño del motor, capacidad de lubricante y de las condiciones operativas. La concentración normalizada para un elemento metálico en la muestra de aceite  $C_n$  se obtiene multiplicando la concentración del elemento de desgaste, por coeficientes que ajustan dicha concentración en función de las relaciones de tamaño ( $K_t$ ), volumen de lubricante en el sistema ( $K_v$ ) y composición química de los componentes del motor  $K_m$ . Para la evaluación experimental del método se utilizó motor Diesel de cuatro tiempos, monocilíndrico, sin filtro de lubricante. Las concentraciones se midieron con espectrometría de emisión atómica. Del análisis de los resultados de los Coeficientes de Normalización se observa que los efectos del tamaño del motor, volumen de lubricante y composición química, afectan significativamente la concentración medida de un elemento de desgaste en el lubricante. Las medidas de las mismas concentraciones de un elemento de desgaste en el aceite en dos motores diferentes, no significa que ambos motores tienen la misma velocidad de

desgaste. Lo que implica, que la interpretación del análisis del lubricante sin normalización de motores diferentes puede conducir a diagnósticos errados. Se concluye que la normalización del análisis del lubricante permite la comparación de los resultados entre motores diferentes, tanto en valores puntuales de las concentraciones, como de sus velocidades de desgaste. Esto garantiza diagnósticos más precisos y predicciones mejores de la vida remanente de las máquinas.

## Palabras clave

Análisis de lubricante, diagnóstico de motores diesel, normalización del diagnóstico de falla.

## Abstract

In this paper the fundamental of the normalization model of the analysis of wear elements in lubricating oil of reciprocating internal combustion engines and a case of applying this methodology to the evaluation of the wear rate of the element iron in a single cylinder diesel engine is present. The normalization method represents an important contribution to the use of wear debris analysis in the assessment of wear and troubleshooting. The oil analysis does not depend of engine type and size, carter capacity and operating conditions. The concentration of a metallic element  $i$  normalized  $C_n(i)$  is calculated multiplying the concentration of the element of wear in the oil by the concentration coefficient ( $K_t$ ), which considers the

size difference, the volume of lubricant coefficient ( $K_v$ ), which considers the carter volume difference and the chemical composition coefficient  $K_m$  (i), with consider chemical composition difference. For the experimental evaluation of the method a four-stroke, single cylinder, unfiltered lubricant diesel engine is used and the concentrations were measured with atomic spectrometric emission. The analysis of the results of the normalization coefficients shows that size, volume of lubricant and chemical composition affect significantly the wear debris concentration measured. The measurements of the same concentrations of a wear element on the oil in two different engines, it does not means that both engines have the same wear rate. This implies that the interpretation of the oil analysis without using the normalization can lead to misdiagnoses. The normalization of lubricant analysis allows comparison of the concentrations and wear rates of engines. This method ensures more accurate diagnoses and better predictions of remaining life of the machines.

## Keywords

Oil analysis, diagnostic of diesel engines, standardization of failure diagnostic.

## Introducción

La práctica de analizar aceites ha estado presente desde 1940. En sus inicios estaba dirigida, solamente, a evaluar la condición de lubricante con fines de diagnóstico [1], pero en las últimas décadas ha ampliado su campo de aplicación a la obtención de valiosa información sobre el desgaste de componentes de sistemas tribológicos [2][3] [4][5]. Esto ha sido posible, debido al vertiginoso desarrollo en sus técnicas y procedimientos [1], constituyéndose en una técnica altamente eficaz en la detección de fallas durante su etapa de gestación. El principal inconveniente que ha tenido la aplicación a gran escala el análisis de aceite como herramienta de diagnóstico y predicción de fallas es la dependencia de los resultados del análisis

del lubricante usado del tipo y tamaño del motor, materiales utilizados y volumen de aceite usado, así como de las condiciones operativas. Esto hace más difícil que los expertos diagnostiquen la misma falla en motores diferentes, ya que por lo general las mismas concentraciones de elementos de desgaste se interpretan de manera similar.

En el presente trabajo se presentan los fundamentos de un modelo de normalización de los resultados del análisis de elementos de desgaste en el aceite lubricante de motores de combustión interna alternativos y un caso de aplicación de esta metodología a la evaluación de la velocidad de desgaste del elemento hierro en un motor diesel mono cilíndrico.

El método de normalización que se presenta representa un aporte importante al uso del análisis del lubricante como técnicas en la evaluación del desgaste y el diagnóstico de fallas de máquinas, ya que independiza el análisis del tipo y tamaño del motor, capacidad de lubricante y de las condiciones operativas.

## Modelo de corrección de concentraciones medidas

El proceso de corrección de los resultados se realiza previamente a la corrección con el fin de eliminar los efectos de filtros, fugas y añadidos de aceite, sobre la concentración de elementos de desgaste medidos en el aceite durante el intervalo entre tomas de muestras, [1], [5], [6], [7], [8], [9].

La corrección de las concentraciones medidas por el espectrómetro, con el objetivo de considerar el efecto de la pérdida de partículas en la muestra tomada, se realizó a través el modelo de velocidad constante para sistemas con fuga y añadidos, desarrollado por Espinoza [2], y el cual se resume en las siguientes ecuaciones:

$$(1) \quad C_m(t) = \frac{P}{Z * V_o} \left( C_{m_o} - \frac{P}{Z * V_o} \right) * e^{Z.t}$$

Donde:

$$(2) Z = \frac{Qa}{V_o}$$

Con la Ec.(1) se determina (P). En la presente investigación no se consideró el efecto del filtro, debido a que las pruebas se hicieron con el motor sin filtro de aceite.

Las concentraciones corregidas, que representan el número de partículas que existieran en el cárter si no hay fugas, añadidos ni filtros en el tiempo t, se calculan a través de las Ec.(3) y Ec.(4).

$$(3) Cc = Co + \frac{P}{V_o}(t_1 - t_0)$$

Si  $t_0$  es el instante de cambio del aceite, por lo que es igual a cero, la ecuación anterior queda:

$$(4) Cc = Co + \frac{P}{V_o}t$$

## Fundamentos del modelo de normalización

La teoría de normalización representa un aporte importante al uso de técnicas en la evaluación del desgaste y el diagnóstico de fallas, ya que independiza el análisis del tipo y tamaño del motor, capacidad de lubricante y de las condiciones operativas.

El modelo de normalización que se presenta a continuación fue desarrollado por Espinoza [2] [10] en 1990. La concentración normalizada para un elemento metálico i en la muestra de aceite  $Cn(i)$  se obtiene multiplicando la concentración del elemento de desgaste medida en el aceite, por coeficientes que ajustan dicha concentración en función de las relaciones de tamaño (Kt), volumen de lubricante en el sistema ( $Kv$ ) y composición química de los componentes tribológicos  $Km(i)$  [2]. Esto se representa por las ecuaciones (5)(6)(7)(8).

$$(5) Cn(i) = Cd(i) Kt Kv Km(i)$$

$$(6) Kt = Z/Zn * 1/\lambda^2$$

$$(7) Kv = V/Vn$$

$$(8) Km(i) = Yn(i)/Y(i)$$

En la Ec. 6, Z es el número de cilindros,  $\lambda$  es la relación de semejanza entre el motor analizado, V es el volumen de lubricante en el sistema. El subíndice n se refiere al motor normalizado o de referencia.

$\lambda$  es la relación de semejanza entre los dos motores, definido para el caso de motores como la relación de diámetros del cilindro, como se expresa en la Ec. 9.

$$(9) D/D_n = \lambda$$

El coeficiente metalúrgico de un elemento de desgaste (i) o  $Km(i)$  es el cociente entre las concentraciones del elemento i en la composición global del motor normalizado entre la del motor analizado.  $Y(i)$  se calcula sumando los productos de las concentraciones ( $Y_{i,j}$ ) del elemento i en cada pieza del motor j sometida a desgaste en la que aparece, por los diferentes porcentajes de desgaste relativo de cada pieza del motor ( $\phi_j$ ). (Ec. 10).

$$(10) Y(i) = \sum_{j=1}^n Y_{i,j} \phi_j$$

## Procedimiento experimental

### Descripción del equipo experimental

La aplicación del método se realizó en un motor Diesel de cuatro tiempos, monocilíndrico, Diámetro del cilindro: 80mm (3.15 in), Carrera: 110mm (4.33 in), Potencia y velocidad: 5 BHP a 1500 rev/min., Número de cilindros: 1, Cilindrada: 553cm<sup>3</sup> (33.7 in<sup>3</sup>), Inyección: Directa, Capacidad del tanque de aceite: 2.84 L. Los valores del motor normalizado fueron tomados de Espinoza [11],

### Procedimiento experimental

Para la realización de estas pruebas, primero se definieron los parámetros de control y los parámetros variables medidas durante el estudio.

Los parámetros de control son magnitudes cuyo control garantiza que los ensayos se ejecuten en las condiciones establecidas, estos parámetros se mantienen generalmente constantes e invariables. Asegurando de este modo la precisión y repetitividad de los ensayos, al mismo tiempo se impide que algunos de los parámetros puedan tener algún efecto negativo en los resultados obtenidos.

Los parámetros variables incluyen la variable independiente y la variable dependiente, que servirán para evaluar el fenómeno estudiado.

### Parámetros de control

Los parámetros de control que fueron considerados en las pruebas fueron los siguientes:

- *Volumen de aceite en el motor:* La cantidad de aceite que se encuentra circulando por el sistema afecta la velocidad de crecimiento de la concentración. Por lo tanto se debe chequear que se mantenga un mismo volumen de aceite en el transcurso de los ensayos, para esto se deben evitar fugas extras en el motor y suministrar la cantidad de aceite adecuada. El volumen de aceite en los ensayos se mantuvo en 2,84 litros.
- *Fugas de aceite:* Se considera como fuga de aceite, aquellas extracciones de aceite del sistema, que se produjeron intencionalmente durante los ensayos para pretender el consumo de aceite en el motor, y las pérdidas de lubricante por fugas reales, por esto se midió el volumen de aceite sustraído cada vez que se tomaba una muestra 25 cc.
- *Añadido de aceite:* Los añadidos se ejecutaban para mantener constante el nivel de aceite en el motor, durante las pruebas. La cantidad dependía directamente de la cantidad sustraída del motor.
- *Velocidad de prueba:* Esta medición se llevo a cabo a través del panel de control, manteniéndose en 1500 r.p.m. constante.
- *Temperatura del aceite:* Se midió para detectar si había variaciones importantes que pudieran variar las propiedades del aceite, esta

temperatura se mantuvo en un rango de 85-90 °C, aceptables para realizar los ensayos.

- *Tiempo de toma de muestras:* Se midió a través de un reloj, se estableció cada cinco horas.

### Parámetros variables

- *Variable independiente:* Tiempo de operación del motor.
- *Variable dependiente:* Concentración de partículas contaminantes: Su medición se efectúa mediante el espectrómetro de emisión atómica.

### Medición de elementos de desgastes en el aceite

Los análisis del aceite se realizaron con un equipo el espectrómetro de emisión atómica fabricado por Spectro, modelo Spectroil M.

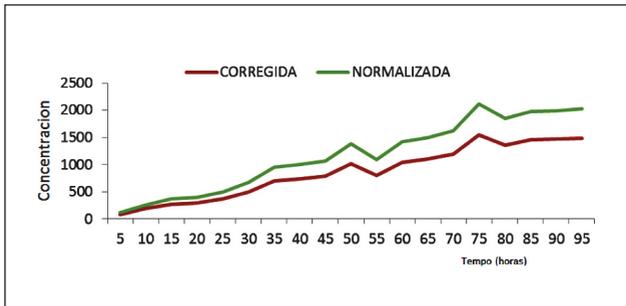
### Resultados

Los valores obtenidos de los coeficientes de normalización para la última muestra son los siguientes: El Coeficiente de Tamaño (Kt) 11,76, lo cual explica que el motor analizado es 11,76 veces mayor en tamaño que el de referencia, por lo que el aporte de partículas al aceite en el motor experimental es 11,76 veces mayor que el de referencia. El Coeficiente de Volumen de aceite fue de 0,188, lo cual significa que el motor analizado tiene el 18,8% del aceite que tiene el motor de referencia. El Coeficiente de Composición química fue de 0,97, lo que se interpreta como que el motor analizado tiene un 3% más de hierro en sus componentes que el de referencia.

El efecto combinado de estos factores sobre la concentración medida y corregida, calculado con la Ec. 5, se muestra en la Figura 1. Donde se observa que la concentración de hierro medida y corregida, se reduce al aplicarle el modelo de normalización.

### Discusión

Del análisis de los resultados de los Coeficientes de Normalización se observa que los efectos



**Figura 1.** concentraciones corregida y normalizada del hierro en función del tiempo de operación

del tamaño del motor, volumen de lubricante y composición química, afectan significativamente la concentración medida de un elemento de desgaste en el lubricante. Por tanto, los valores de referencia que se utilizan para comparar las concentraciones medidas y diagnosticar condiciones contaminación desgaste anormal o presencia de condición de falla, no pueden ser los mismos para motores diferentes.

Del análisis de la Figura 1, se observa que la velocidad del desgaste, expresado por la pendiente de la curva concentración – tiempo, es menor en el caso de datos normalizados que sin normalizar o corregidos, demostrándose que la velocidad de desgaste de un motor está afectada por el tamaño del motor, volumen de lubricante y composición química.

Las medidas de las mismas concentraciones de un elemento de desgaste en el aceite en dos motores diferentes, no significa que ambos motores tienen la misma velocidad de desgaste. Lo que implica, que la interpretación del análisis del lubricante sin normalización de motores diferentes puede conducir a diagnósticos errados.

Se concluye que la normalización del análisis del lubricante permite la comparación de los resultados entre motores diferentes, tanto en valores puntuales de las concentraciones, como de sus velocidades de desgaste. Esto garantiza diagnósticos más precisos y predicciones mejores de la vida remanente de las máquinas.

## Referencias

1. A.Memon, and S. Mohammad, Building Relationship Network for Machine Analysis from Wear Debris Measurements. International Journal of computational intelligence, volume 3, number 2, ISSN 1304-2386. (2006).
2. H. Espinoza, Diagnostico de fallos en motores de encendido por compresión de automoción. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España, (1990). [2] Y. Jaluria and K.E. Torrance, Computational Heat Transfer, Hemisphere, Washington, D.C., 1986.
3. E. Yardley, Condition Monitoring-Engineering the practice, ISBN 186058361X, Ed. John Wiley and Sons, (2002). [4] E. Book y H. Bratman, Using Compilers to Build Compilers, Systems Development Corp. Rept. SP-176, Santa Monica, Calif., Aug. 1960.
4. Dempsey, P., Lewicki, D. and H, Decker., Investigation of Gear and Bearing Fatigue Damage Using Debris Particle Distributions NASA/TM—2004-212883. EEUU, (2004)
5. Macián, V., Tormos, B., Olmeda, P., y L. Montoso., Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. Tribology International 36, pp. 771–776, (2003).
6. Espinoza, H., Monitorizado del estado y funcionamiento global del motor de encendido por compresión. Trabajo de investigación presentado como trabajo de ascenso, Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui. Venezuela (1990)
7. Kjer, T., Wear Rate and Concentration of Wear Particles in Lubricating Oil, Wear, 647, pp 217-226, (1981).
8. Hubert, C., Beck, J., Johnson, J., A model and the methodology for determining wear particle

generation rate and filter efficiency in a diesel engine using ferrography, Sae paper 821195, (1982).

9. Figueroa, S., Diagnostico del desgaste y el estado de motores de encendido por

compresión, Universidad Politécnica de Valencia, SPUPV-94.2044, España, (1994).

10. Espinoza H., Diagnóstico de motores de encendido por compresión mediante análisis de aceite, Universidad Politécnica de Valencia, SPUPV-90-1018. España, (1990).