

Estudio comparativo del desgaste en un motor de encendido por chispa usando gasolina y gas natural como combustible

H. Espinoza

Y. Lara

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

Fax: 0281-2676885.

Correo electrónico: yamilelara@gmail.com

Recibido el 26 de agosto de 2008; aceptado el 16 de diciembre de 2008.

1. Resumen

Se presenta un estudio experimental donde se compara el desgaste ocurrido en un motor de 1.3 litros usando gasolina y gas natural vehicular (GNV) para las condiciones de velocidad variable y arranque-calentamiento. El desgaste se midió indirectamente mediante la cuantificación de las partículas metálicas contaminantes del lubricante, proveniente del desgaste de las piezas internas del motor. Las partículas de desgaste se midieron con un espectrómetro de emisión. Las muestras de lubricantes se tomaron y analizaron cada cinco horas de operación. Las velocidades de desgaste se calcularon para cada elemento metálico considerado, usando un modelo de velocidad constante desarrollado por Espinoza. El estudio se basó en el análisis de las concentraciones de hierro, plomo, cobre, aluminio y sílice. Los resultados evidencian que la velocidad de contaminación del aceite por partículas de desgaste de Fe, Pb, Cu y Al es mayor utilizando gasolina que GNV en porcentajes de 447%, 910%, 129% y 142% para velocidad variable y de 240%, 630%, 203% y 71% en condición de arranque y calentamiento.

Palabras clave: desgaste, motor de encendido por chispa, gas natural, análisis de aceite.

2. Abstract (Comparative Study of Wear in a Spark-Ignition Engine Gasoline and Compressed Natural Gas as Fuel)

A comparative study of the wear in a 1.3 liters spark-ignition engine using gasoline and compressed natural gas (CNG) is presented for variable speed and starting-warming conditions. The wear was indirectly measured by quantifying the contaminant metallic particles in the oil, originated by the wear motor's internal parts. The wear debris was measured with an atomic emission spectrometer. The used oil samples were taken and analyzed every five hours of accumulated operation. The wear rates for every metallic element being considered were estimated with the model of constant speed developed by Espinoza. The study was based on the analysis of Fe, Pb, Cu, Al and Si concentrations. The results demonstrate that the oil pollution rate generated by Fe, Pb, Cu and Al wear debris is greater when using gasoline than CNG in 447%, 910%, 129% and 142 % percentages by variable speed and in 240%, 630%, 203% and 715 % in a starting and warming condition.

Key words: wear, spark-ignition engine, natural gas, oil analysis.

Nomenclatura

$C_m(t)$	concentración medida en un instante t (ppm)
C_{m0}	concentración medida en el momento del inicio de la prueba (ppm)
Q_a	caudal de fuga (l/h)
V_0	volumen total de lubricante en el carter (l)
t	intervalo de tiempo entre ensayos (h)
P	velocidad de desgaste (mg/h)
C_c	concentraciones corregidas (ppm)

3. Introducción

El gas natural vehicular (GNV) es un combustible económico y ambientalmente menos contaminante que los combustibles de hidrocarburos convencionales [1][2], a pesar de que se ha demostrado que su uso en los motores de combustión interna produce detrimento de algunas características del motor como

la potencia [3]. Las investigaciones sobre el comportamiento de este combustible continúan con el objetivo de generar mejoras tecnológicas con el uso del GNV.

En el área de tribología y desgaste, en 1997 Beck *et al.* [4] realizaron una investigación sobre el desempeño y durabilidad en un motor diesel de inyección piloto de gas natural durante 1 000 hr de operación, sometiendo el motor a cuatro velocidades diferentes y llegaron a la conclusión que usando GNV se experimenta mayor vida útil, extensión de los intervalos de servicios y reducción de los costos por disminución de los cambios de aceite.

En este orden de ideas, y en lo referente a la cuantificación del desgaste de motores a partir del análisis del lubricante, desde 1960 se han desarrollado aproximaciones analíticas para la determinación de la contaminación usando este método.

En la última década, la investigación en esta área registra a investigadores como: Espinoza [5], Fygueroa [6] y Macian *et al.* [7], con modelos basados en la ley de la conservación de la masa. Espinoza [5] consideró la influencia de aspectos como: técnicas de medida, añadidos y consumo de aceite, filtro de aceite, composición del aceite, sílice externo y volumen del cárter e introduce formulaciones matemáticas que llegan al desarrollo de índices independientes de desgaste del motor, mientras que los otros investigadores con algunas consideraciones sobre el modelo de velocidad constante ya propuesto, plantean también análisis estadísticos y la búsqueda de concentraciones de referencia que permiten caracterizar el grado de contaminación de aceite para generar escalas comparativas confiables.

El presente trabajo compara los dos combustibles, gasolina y GNV, a partir del desgaste que se produce en el motor para dos condiciones operativas. La primera, para la condición de velocidad variable y la segunda para la condición de arranque y calentamiento del motor. En ambos casos se utiliza la velocidad de desgaste del motor como parámetro indicativo del desgaste.

La velocidad de desgaste se midió mediante análisis de las concentraciones de elementos metálicos provenientes del desgaste, utilizando espectrometría de emisión atómica, bajo la premisa de que la velocidad de desgaste expresada en miligramos de material por unidad de tiempo es igual a la velocidad de contaminación del aceite, mientras no exista ningún aporte externo de contaminante.

4. Caso de estudio

El banco de prueba está conformado por un motor de combustión interna de encendido por chispa con alimentación de combustible dual (gasolina-gas natural) y un freno dinámometro tipo Eddy Current (Fig. 1). El motor tiene las

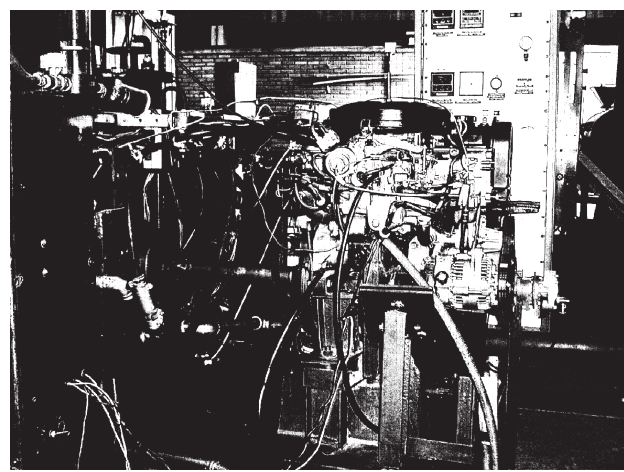


Fig. 1. Banco de prueba utilizado.

siguientes especificaciones: modelo Toyota 2E, 4 cilindros en línea. 1296 cc de cilindrada, diámetro del pistón: 73 mm, carrera: 77.4 mm, potencia máxima: 72 Hp, torque máximo: 101 NM alimentado mediante carburador de dos bocas para gasolina con mezclador de gas natural.

Para el análisis de partículas en el lubricante, se utilizó un espectrómetro de emisión de electrodo de disco rotativo, marca *Spectro*, modelo Spectroil M en [8][9]. Las muestras de aceite se tomaron a través del medidor de nivel del lubricante (5 ml.) cada cinco horas de funcionamiento y (100 ml) cada 20 horas de funcionamiento.

Los procedimientos para cada condición operativa se establecieron como sigue:

- Para ambas pruebas se colocó aceite nuevo (SF, SAE 20W-50, con TBN 7), filtros de aire y bujías.
- Se entonó el motor.

Caso velocidad variable

- El motor se encendió y esperó hasta que se estabilizara
- El motor se aceleró hasta colocarlo a 1 500 revoluciones por minuto (RPM).
- El motor se aceleró y desaceleró 20 veces cada 15 minutos (de 1500 a 2800 RPM).

Caso arranque y calentamiento

- El motor se encendió y esperó hasta que se estabilizara.
- El motor se dejó operando 15 minutos más en velocidad de ralenti.
- El motor se apagó y se dejó enfriar.

Los ensayos se detuvieron cuando el motor alcanzó 100 horas de funcionamiento.

Se realizaron los ensayos con el motor usando primero, gasolina y luego GNV.

En el estudio se plantearon las siguientes hipótesis:

- El intervalo de tiempo entre una prueba y otra no influye significativamente sobre el desgaste.
- No se consideran cambios en las tolerancias, como para establecer que el motor y las condiciones de prueba sean diferentes, salvo las establecidas por el sistema de cambio de combustible.

Los resultados de las concentraciones medidas por el espectrómetro se corrigieron con el modelo de velocidad de contaminación constante para procesos con fugas y añadidos, desarrollado por Espinoza [5], el cual se basa en la solución de la ecuación diferencial obtenida al aplicar el principio de la conservación de la masa sobre el sistema de lubricación para un volumen de control definido.

El cálculo de la concentración corregida se hace en dos etapas. Primero se calcula la velocidad de contaminación del lubricante por elementos de desgaste (1) y luego se calcula la concentración corregida (2). La concentración corregida se basa en la cantidad real de partículas contaminantes que entraron al lubricante debido al desgaste. Es decir, la concentración de partículas que existirían en el aceite, si no hubiese fugas, añadidos ni filtrado en el tiempo.

$$C_m(t) = \frac{P}{Z * V_0} \left(C_{m_0} - \frac{P}{Z * V_0} \right) * e^{Z * t} \quad (1)$$

donde:

$$Z = \frac{Q_a}{V_0}$$

En este estudio no se considera el efecto del filtro, debido a que los espectrómetros de emisión no detectan partículas de tamaños superiores a 8 micras, que son las retenidas por los filtros comerciales [5,6,7].

$$C_c = C_0 + \frac{P}{V_0} (t - t_0) \quad (2)$$

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

$$C_c = C_0 + \frac{P}{V_0} t \quad (3)$$

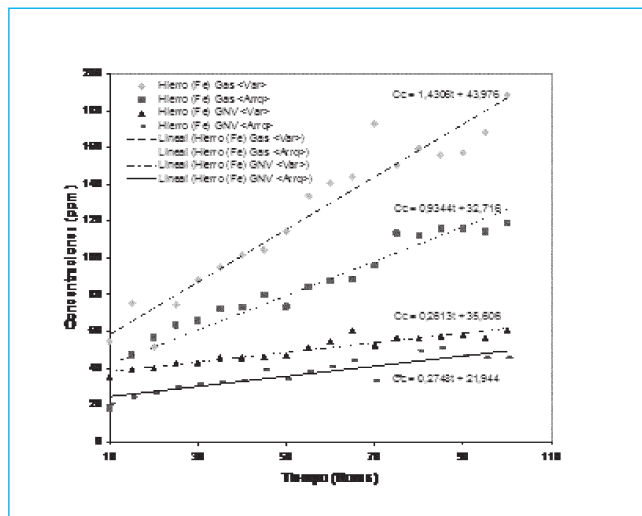


Fig. 2. Comparación de las concentraciones corregidas del Fe vs. tiempo.

5. Resultados

En cada una de las figuras de la 2 hasta la 6 se muestran los resultados para cada uno de los elementos de desgaste analizados. Se presentan los datos para el combustible GNV en prueba de velocidad variable (GNV <var>) y en prueba de arranque y parada (GNV <arrq>). Igualmente, se presentan los resultados para la gasolina en prueba de velocidad variable (gas <var>) y en prueba de arranque y parada (gas <arrq>). A cada conjunto de datos se les graficó su curva de ajuste lineal.

Análisis cuantitativo del hierro de desgaste

En el caso del aporte de hierro de desgaste se observa en la figura 2 que: a) En condición de velocidad variable, la velocidad de contaminación usando gasolina es 4,47 veces mayor que usando GNV. b) En condición de arranque y calentamiento la velocidad de contaminación usando gasolina es 2,40 veces mayor que usando GNV. c) Con el uso de gasolina se produce mayor velocidad de contaminación durante la prueba de velocidad variable que durante la prueba arranque y parada. d) En el caso del GNV no hay diferencia considerable en la velocidad de contaminación para ambas pruebas. e) La discrepancia de valores de concentración, que en este caso en particular se debe al efecto de la concentración al inicio de ambas pruebas, es diferente.

Análisis cuantitativo del plomo de desgaste

En el caso del aporte de plomo se observa en la figura 3 que: a) En condición de velocidad variable, la velocidad de

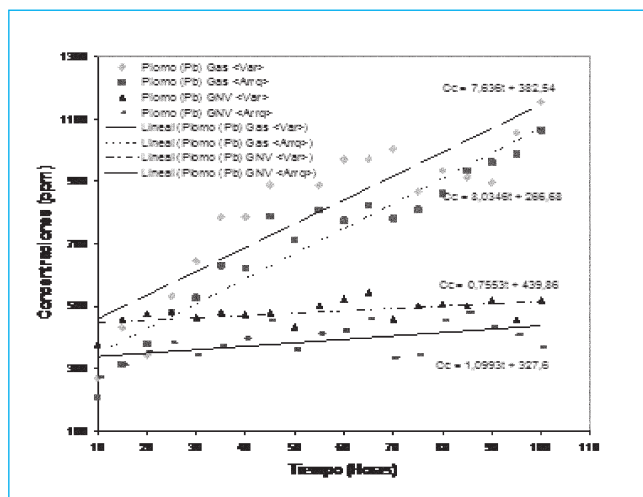


Fig. 3. Comparación de las concentraciones corregidas del Pb vs. tiempo.

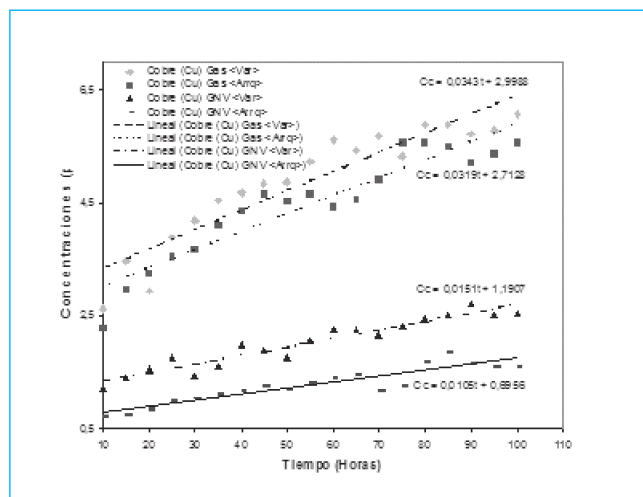


Fig. 4. Comparación de las concentraciones corregidas del Cu vs. tiempo.

contaminación usando gasolina es 9.10 veces mayor que usando GNV. *b)* En condición de arranque y calentamiento, la velocidad de contaminación usando gasolina es 6.30 veces mayor que usando GNV. *c)* Al usar gasolina se produjeron velocidades similares de contaminación durante la prueba de velocidad variable y la prueba arranque y parada. *d)* En el caso del GNV, al igual que la gasolina, no hubo diferencia considerable en la velocidad de contaminación para ambas pruebas. *e)* La diferencia de valores de concentración para cada combustible en ambas pruebas se debió al efecto de la concentración inicial.

Análisis cuantitativo del cobre de desgaste

En el caso del aporte del cobre se observa en la figura 4 que: *a)* En condición de velocidad variable, la velocidad de contaminación usando gasolina es 1.29 veces mayor que usando GNV. *b)* En condición de arranque y calentamiento la velocidad de contaminación usando gasolina es 2.03 veces mayor que usando GNV. *c)* Al usar gasolina se produjo la misma velocidad de contaminación durante la prueba de velocidad variable que durante la prueba arranque y parada. *d)* En el caso del GNV, no hubo diferencia en la velocidad de contaminación para ambas pruebas. *e)* La diferencia de valores de concentración para cada combustible en ambas pruebas se debió al efecto de la concentración inicial que fue diferente en ambas pruebas.

Análisis cuantitativo del aluminio de desgaste

En el caso del aporte del aluminio se observa en la figura 5 que: *a)* En condición de velocidad variable, la velocidad de

contaminación usando gasolina es 1.42 veces mayor que usando GNV. *b)* En condición de arranque y calentamiento la velocidad de contaminación usando gasolina es 0.71 veces mayor que usando GNV. *c)* Usando gasolina se produjo, mayor velocidad de contaminación durante la prueba de arranque y parada que durante la prueba velocidad variable. *d)* En el caso del GNV, no hubo diferencia considerable en la velocidad de contaminación para ambas pruebas. *e)* Como en los casos anteriores, se observa el efecto de la concentración inicial sobre los valores de concentración en todas las pruebas y combustibles.

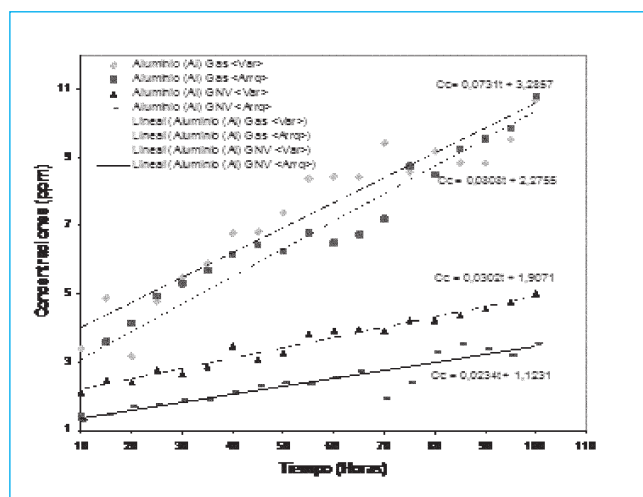


Fig. 5. Comparación de las concentraciones corregidas del Al vs. tiempo.

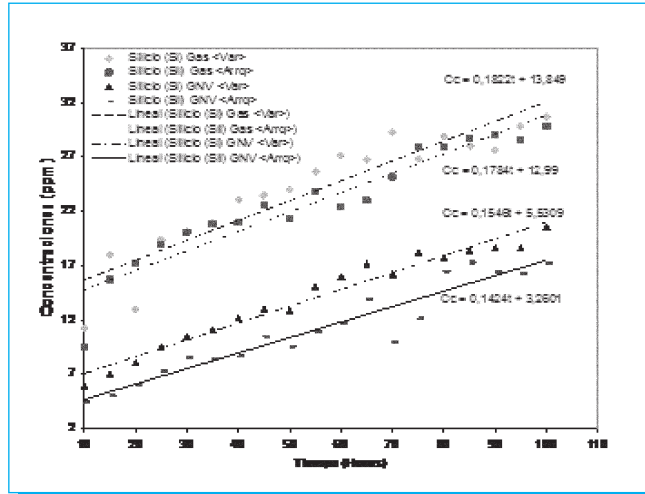


Fig. 6. Comparación de las concentraciones corregidas del Si vs. tiempo.

Análisis cuantitativo del sílice de desgaste

En el caso del aporte del sílice se observa en la figura 6 que: a) En condición de velocidad variable, la velocidad de contaminación usando gasolina es similar a la de GNV. b) En condición de arranque y calentamiento la velocidad de contaminación usando gasolina es similar que usando GNV c) Usando gasolina se produjo la misma velocidad de contaminación durante la prueba de velocidad variable que durante la prueba arranque y parada. d) En el caso del GNV, no hubo diferencia en la velocidad de contaminación para ambas pruebas. e) La diferencia de valores de concentración para cada combustible en ambas pruebas se debió al efecto de la concentración inicial que fue diferentes en ambas pruebas.

6. Discusión

En relación al efecto del tipo de combustible sobre los elementos de desgaste, se demuestra que para todos los elementos estudiados, a excepción de la sílice, la gasolina produce mayor desgaste que el GNV.

Los resultados coinciden con los presentados por Breck en 1997 [4] quien plantea que en cualquier condición operativa del motor, el uso de la gasolina como combustible produce mayor desgaste que el uso de gas natural vehicular. El resultado de una mayor velocidad de desgaste de las piezas lubricadas en condición de velocidad variable usando gasolina, se debe a la vaporización del combustible líquido sobre la capa lubricante, que deja un espacio desprotegido contra el desgaste. Igualmente, el paso de gasolina e hidrocarburos

parcialmente quemados hacia el aceite genera el lavado de las paredes de los cilindros removiendo también la capa lubricante. Aunado a lo anterior, en el proceso de combustión con gasolina se producen gran cantidad de condensados corrosivos por la presencia de azufre y la contaminación por agua [10][11].

En cuanto al efecto de la condición operativa o tipo de prueba se demuestra que sólo existe en el desgaste de piezas a base de hierro cuando se usa gasolina, pero esto no se observa con el GNV, lo cual se evidencia por la mayor velocidad de desgaste con gasolina en la prueba de velocidad variable que en la prueba de arranque y parada.

La misma velocidad de contaminación de sílice en todas las pruebas expresa, que el mismo no está afectado ni por las condiciones operativas, ni por el tipo de combustible y sólo se justifica si proviene de la contaminación externa, en lugar del desgaste interno del motor [5].

En las pruebas con gasolina, se observaron mayores concentraciones y velocidades de contaminación de plomo que de hierro y de los restantes elementos. Como el aporte de plomo de desgaste del motor de acuerdo a la composición química de las piezas lubricadas, debe provenir de los cojinetes y los resultados del cobre no se corresponden con lo del plomo, se concluye que el origen del plomo es la gasolina, la cual usa como aditivo antidetonante el tetraetil de plomo y que pasa al lubricante a través del conjunto de pistón, anillos y camisa por el soplado de los gases producto de la combustión. Por lo tanto, el análisis de este elemento no tiene importancia para el desgaste, pero si demuestra el efecto que puede producir el combustible sobre la contaminación del lubricante.

Debe tomarse muy en cuenta el efecto de las concentraciones iniciales de los elementos sobre los valores de contaminación medida, al analizar el efecto de diagnóstico de fallas, el cual puede deberse a los residuos del aceite anterior y/o al desgaste durante la puesta en marcha del motor

7. Conclusiones

- El motor produce menor concentración de metales de desgaste en el lubricante cuando opera con GNV como combustible que cuando utiliza gasolina.
- Igualmente, se observa que la condición de velocidad variable del motor produce mayor desgaste que la condición de arranque y calentamiento, lo cual evidencia que las condiciones de lubricación son críticas durante los procesos de aceleración que en el calentamiento, debido a la mayor

viscosidad del lubricante durante la prueba de calentamiento con respecto a la de velocidad variable.

- Los resultados evidencian que la velocidad de contaminación del aceite por partículas de desgaste de Fe, Pb, Cu y Al es mayor utilizando gasolina que GNV en porcentajes de 447%, 910%, 129% y 142% para velocidad variable y de 240%, 630%, 203% y 71% en condición de arranque y calentamiento.
- El GNV, como combustible en motores duales, produce menor desgaste que la gasolina, garantizando mayor vida útil tanto al motor como al lubricante, independientemente de la condición de operación del equipo.

8. Referencias

- [1] Haeng Muk Cho y Bang-Quan He. "Spark ignition natural gas engines". A review. *Energy Conversion and Management*, Volume 48, Issue 2, February 2007, pp. 608-618. 2007
- [2] Zizow, E ; Hoppe, M; Schollmeyer y H. Ruhrgas AG, 45117 Essen, ALLEMAGNE. *Erdgaseinsatz im Verkehr* (Using natural gas for vehicles). Gas- und Wasserfach. Gas - Erdgas (Gas- Wasserfach, Gas-Erdgas) ISSN 0016-4909. CODEN GWGEAQ. Vol. 144 N° 10, 2003 pp. 635-637 [3 page(s) (article)]. 2003.
- [3] Mello, P.; Pelliza, G; Cataluna, R. y Da Silva, R., "Evaluation of the Maximum Horsepower of Vehicles Converted for Use with Natural Gas Fuel". *Fuel* (Fuel) ISSN 0016-2361 2006, vol. 85, no14-15, pp. 2180-2186, 2006.
- [4] Breck, P; Hamilton, B; Shephered, R; Cemensha, R; Lautman, L. "Performance, Engine Durability and Oil Life Analysis of Pilot Ignition Natural Gas Engines", *SAE* 972664, 1997.
- [5] Espinoza, H. *Diagnóstico de fallos en motores de encendido por compresión de automoción*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España. 1990.
- [6] Figueroa, S. *Diagnóstico del desgaste y el estado de motores de encendido por compresión*. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Valencia. 1994.
- [7] Macián, V.; Tormos, B.; Olmeda, P. y Montoso, L. "Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. *Tribology International* 36. 771-776. 2003.
- [8] Aucelio, R.; de Souza, R.; de Camposa, R.; Miekeleya, N. y da Silveiraa, C., "The determination of trace metals in lubricating oils by atomic spectrometry". *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2007. This paper was presented at the 9th Rio Symposium on Atomic Spectrometry, held in Barquisimeto, Venezuela, 5-10 November 2006
- [9] Šekaturovien, D. y Višniakov, N., "Atomic Emission Spectrometric Analysis in the Assessment of Wearing of Vehicle Engines". ISSN 1392-1320 *Materails Science (MED•IAGOTYRA)*. vol. 10, No. 1. 2004.
- [10] Schwartz, S. E. "An analysis of upper cylinder Wear with Fuel containing Metanol". *Lubrication Engineering*. May. pp. 292-299. 1986.
- [11] Eyre T.; Dent, N. y Dale, P., "Wear characteristics of piston rings and cylinder lines". *Lubrication Engineering*. pp. 216-220. 1983.

Redalyc

Red de revistas científicas de
América Latina, el Caribe,
España y Portugal

www.redalyc.uaemex.mx