

## **ESTUDIO COMPARATIVO DEL DESGASTE EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA EN CONDICIONES DE VELOCIDAD VARIABLE USANDO GASOLINA Y GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE**

### **A COMPARATIVE STUDY OF THE WEAR-OUT IN A SPARK IGNITED ENGINE UNDER CONDITIONS OF VARIABLE SPEED USING GASOLINE AND NATURAL GAS AS FUELS**

HENRY ESPINOZA, LUÍS PATIÑO, YORDY GONZÁLEZ, YAMILE LARA, ANTONIO TINEO

*Centro de Termodinámica y Mantenimiento (CTYM). Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui. Puerto La Cruz, Venezuela.*

*hespinoza@cantv.net ygonzalez@anz.udo.edu.ve*

#### **RESUMEN**

Se presenta los resultados de la comparación del desgaste producido en un motor de encendido por chispa de 1,3 litros cuando opera con gasolina y el gas natural para vehículos usado en Venezuela (GNV). La evaluación del desgaste se hizo indirectamente mediante la medición de elementos de desgaste en el lubricante por espectrometría de emisión, durante un lapso de 100 horas de ensayo. El experimento se realizó en el laboratorio utilizando un banco de prueba con un motor de escasas horas de funcionamiento y en condiciones de operación controlada en función de garantizar una velocidad de desgaste normal. El procedimiento de arranque y calentamiento consistió en encender el motor sin carga y a velocidad de ralentí, dejarlo estabilizar, para luego fijarlo a 1500 RPM. La condición de velocidad variable se estableció mediante ciclos de aceleración y desaceleración, los cuales se realizaron 20 veces cada 15 minutos (de 1500 a 2800 RPM). Las muestras de aceite se tomaron a través del medidor de nivel de lubricante cada 5 y 20 horas de funcionamiento, sustrayéndose 8 ml y 100 ml de aceite correspondientemente. Los análisis espectrométricos se realizaron cada 5 horas de operación acumulada. Los resultados medidos se corrigieron considerando la variación en el volumen total a consecuencia de las muestras tomadas. Las velocidades de desgaste se calcularon utilizando el modelo de velocidad constante para sistemas con fuga y añadidos desarrollado por nuestro grupo y el estudio se basó en el análisis de las concentraciones de hierro, plomo, cobre, estaño, aluminio, y sílice. Los resultados evidencian que la velocidad de desgaste del Fe, Pb, Cu y Al es mayor usando gasolina en comparación con el GNV en porcentajes de 434,83%, 734,31%, 145,63%, 146,57%, respectivamente; y la contaminación de Si usando el GNV como combustible alternativo es menor en un 24,42% con respecto a la gasolina.

**PALABRAS CLAVE:** Mantenimiento, Tribología, desgaste de motores de combustión interna.

#### **ABSTRACT**

The results of a comparative study of the wear-out in a 1.3 liter internal combustion engine using gasoline and Venezuelan natural gas (GNV) are reported in this research. The wear-out evaluation was performed indirectly by measuring worn-out elements in the lubricant through spectrometry of emission during a 100 hour testing lapse. The experiment was carried out in laboratory using an engine with few running hours and in conditions of controlled operation to guarantee a normal wear-out speed. The procedure of starting and warming up included igniting the engine without load at a very slow speed and allowing it to stabilize, then setting it to 1500 RPM. The condition of variable speed was set by cycles of acceleration and deceleration, which were performed 20 times every 15 minutes (from 1500 to 2800 RPM). Oil samples were taken through the oil level gauge every 5 and 20 running hours, subtracting 8 and 100 ml of oil, respectively. Spectrometric analyses were done every 5 hours of cumulative running. The results were corrected considering the variation in the total volume as a result of the samples taken. The wear-out speeds were calculated using the constant speed model of wear-out for systems with oil leakage and additions developed by our group. The study was based on the concentration analysis of iron, lead, copper, tin, aluminum, and silica. The results demonstrate that the wear-out speed of Fe, Pb, Cu and Al is greater using gasoline than GNV in percentages of 434.83%, 734.31%, 145.63%, 146.57% respectively; and the contamination of Si using the alternative combustible GNV is smaller in 24.42% compared to gasoline.

**KEY WORDS:** Maintenance, Tribology, wear-out of internal combustion engines.

## INTRODUCCIÓN

El gas natural ha sido ampliamente utilizado como combustible alternativo a la gasolina en los motores de combustión interna (Rousseau *et al.*, 1999). Diversos estudios han demostrado las ventajas del uso del gas natural como sustituto de los combustibles líquidos por las reducciones en las emisiones de contaminantes y los bajos costos (Zizow *et al.*, 2003; Hanaki, Y. 1996). En estudios previos se ha demostrado que el gas natural produce beneficios sobre el desgaste en comparación con otros combustibles. En este sentido, Beck en (1997) realizó una investigación sobre el desempeño, durabilidad del motor y análisis de vida del aceite en un motor de inyección piloto de gas natural durante 1000 horas, sometiendo el motor a cuatro velocidades constantes diferentes durante el tiempo de prueba, llegando a la conclusión que el motor dual (Diesel-gas) podría experimentar una larga vida de operación, extender los intervalos de servicios, y reducir los costos por servicio de los cambios de aceite comparado con un motor Diesel. Debido a la limitada bibliografía disponible sobre desgaste en condiciones operativas que simulen las diversas condiciones operativas del motor, Espinoza *et al.* (2002), presentó un estudio simulando la condición de arranque y calentamiento de un motor de encendido por chispa y demostró que la velocidad de desgaste del motor con Gas Natural Vehicular es menor que con gasolina, obteniendo disminuciones porcentuales de 191,59% del hierro, 471,50% del plomo, 162,96% del cobre y 192,79% del aluminio.

En el presente trabajo se presentan el estudio comparativo del desgaste de un motor donde la contaminación del lubricante producto del desgaste del motor en condiciones de variación de la velocidad, simulada mediante procesos cíclicos de aceleración y desaceleración del motor, midiéndose el desgaste indirectamente por análisis de la contaminación del aceite por las partículas de desgaste provenientes del motor y utilizando la técnica de espectrometría de emisión. La justificación del presente método se basa en que la velocidad de desgaste expresada en miligramos de material por unidad de tiempo es igual a la velocidad de contaminación del aceite, siempre que no haya aporte externo, tal como lo define (Rigaux, J. 1961; Pérez, R. 1976; Espinoza, 2002).

Entre los antecedentes de usos de modelos matemáticos en el análisis de lubricante, se observa que varios investigadores entre los que se pueden nombrar Rigaux, J. (1961); Pérez, R. (1976); Kjer, T y Hubert, J. (1982), Stodola, J. (1990), Espinoza H. (1990), Figueroa S. (1994); Macian *et al.*, (2003) han desarrollado y

publicado aproximaciones analíticas para modelar el comportamiento de la contaminación del lubricante y el desgaste de motores de combustión interna alternativos. Estos modelos incluyen análisis estadísticos de la distribución de partículas en el tiempo, modelos de corrección de las concentraciones medidas, modelos de normalización para independizar las medidas de contaminantes de variables dimensionales del motor y poder comparar motores diferentes, modelo de cálculo de índices que expresen la severidad de desgaste y métodos de cálculo de concentraciones de referencia para determinar valores de desgaste normal considerando el comportamiento estadístico de flotas de motores, esto permite establecer rangos de valores normales y anormales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción de la instalación experimental

El Banco de prueba esta conformado por un motor de combustión interna con alimentación de combustible dual (gasolina- gas natural) y un freno Dinamómetro tipo Eddy Current (Figura 1). El motor tiene las siguientes especificaciones: modelo Toyota 2E, 4 cilindros en línea. 1296cc de cilindrada, diámetro del pistón: 73 mm, Carrera: 77.4 mm, Potencia Máxima: 72 Hp, Torque máximo: 101 Nm alimentado mediante carburador dos bocas para gasolina con mezclador de gas natural colocado encima.

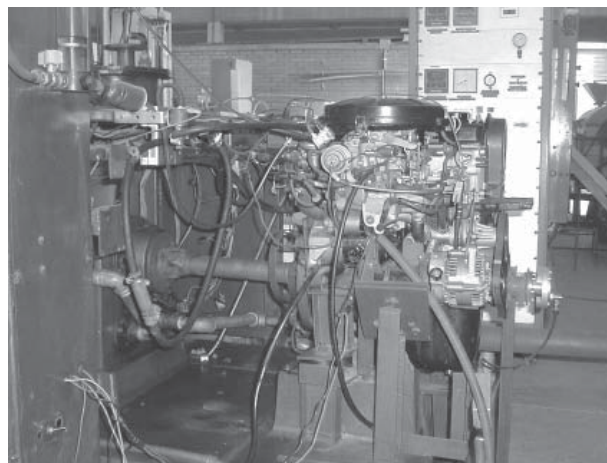


Figura. 1 Banco de prueba utilizado para la obtención de la data.

### METODOLOGÍA UTILIZADA

#### *Actividades preliminares a los ensayos con cada combustible.*

- Se realizó cambio de aceite y filtro de aceite, filtro de aire y bujías.

- Se entonó el motor para garantizar que cumpliera el buen funcionamiento del mismo y los requerimientos establecidos por el fabricante.
- Se utilizó como lubricante aceite comercial SF, SAE 20W-50, con TBN 7.

**Procedimiento experimental en condiciones de velocidad variable del motor de encendido por chispa.**

- Se colocó la válvula de selección de combustible en la posición de gasolina.
- Se encendió el motor del banco de prueba, siguiendo normas de laboratorio establecidas.
- Luego, se esperó hasta que la temperatura de salida del refrigerante se estabilizara a velocidad de ralentí, posteriormente se aceleró hasta colocarlo a 1500 revoluciones por minuto (RPM).
- Se aceleró y desaceleró 20 veces el motor cada 15 minutos (de 1500 a 2800 RPM).
- Se tomaron muestras de aceite (8 ml.) cada 5 horas de funcionamiento y (100 ml) cada 20 horas de funcionamiento, a través del medidor de nivel del lubricante.
- La prueba se detuvo cuando el motor alcanzó 100 horas de funcionamiento.

Las condiciones de prueba fueron:

- Velocidad de Ralenti: 1100 RPM.
- Velocidad de Operación: 1500 RPM
- Velocidad Máxima: 2800 RPM.
- Intervalo de tiempo de aceleración: 15 minutos
- Combustible Utilizado: Gasolina de 91 octanos o GNV dependiendo del ensayo.
- Temperatura de Salida del Refrigerante: 97°C usando gasolina y 93° para GNV.
- Temperatura del Ambiente: 27° a 31° C
- Presión Barométrica: 760 mm de Hg.

Se realizó primero el ensayo con el motor usando gasolina y luego gas natural.

Con el fin de garantizar condiciones iguales durante los ensayos, antes de cada prueba se verificó el estado de funcionamiento del motor para detectar fallas o anomalías que puedan afectar el comportamiento del motor. El punto de encendido del motor para gasolina se ajustó según lo recomendado por el fabricante del motor. El punto de encendido para GNV se adelantó automáticamente de acuerdo a la ley avance que trae el equipo de conversión.

- El aceite utilizado se cambió al inicio de cada prueba.

*En el estudio se plantearon las siguientes suposiciones:*

- Se desprecia el desgaste de una prueba sobre la siguiente, en la práctica esta hipótesis es cierta ya que los niveles de desgaste registrados en 1000 horas de prueba es insignificante y no produce variaciones en las dimensiones de las piezas sometidas a desgaste.
- Los cambios que se presenten en el motor solo se deben al efecto de uso de combustibles diferentes.

**Técnica de medición indirecta del desgaste**

Para la medición de la velocidad de desgaste se parte del principio, que en ausencia de contaminación externa la contaminación del aceite se produce por efecto del desgaste del motor, por lo que la velocidad de contaminación del aceite es igual a la velocidad de desgaste del motor. Para medir los elementos de desgaste en el aceite se utilizó la data experimental de concentración de elementos medidas en el aceite obtenida por espectrometría de emisión. Los análisis espectrométricos se realizaron cada 5 horas.

Aunque se midieron 19 elementos, el estudio comparativo del análisis se basó en las concentraciones de elementos representativos del motor: hierro, plomo, cobre, estaño, aluminio, y sílice. Estos elementos se seleccionaron debido a que son representativos del desgaste general y de los principales componentes del motor sometido a desgaste. El sílice se analizó para detectar la posible influencia de la contaminación externa.

**Corrección de los datos obtenidos por efectos la toma de muestra y añadidos de aceite.**

Los resultados medidos se corrigieron para tomar en cuenta el efecto de la pérdida por la muestra tomada y las velocidades de desgaste se calcularon experimentalmente y con el modelo. Para la corrección de los resultados de las concentraciones medidas por el espectrómetro con el objetivo de considerar el efecto de la pérdida de partículas en la muestra tomada, se utilizó el modelo de velocidad constante para sistemas con fuga y añadidos, desarrollado por Espinoza H. (1990), y el cual se resume en las siguientes ecuaciones:

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

Donde:

C<sub>mo</sub>= es la concentración medida en el momento del inicio de la prueba.

S= es el caudal másico de fuga de partículas.

Qa= es el caudal de fuga.

m(t)= es la masa de contaminantes sólidos en el instante t.

Vo= es el volumen total de lubricante en el cárter.

t= es el intervalo de tiempo del aceite.

P= es la velocidad de desgaste

Cc= son las concentraciones corregidas

$$Z = \frac{Qa}{Vo} \quad (2)$$

La Ec. 1 determina la velocidad de desgaste (P). No se considera el efecto del filtro, debido a que para las condiciones de prueba y desgaste normal no se producen partículas mayores a 5 µm, y los filtros convencionales no retienen partículas inferiores a este tamaño. Por otro lado los espectrómetros de emisión no detectan partículas de tamaños superiores a 8 micras (Espinoza, 1990; Macián, 2003).

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.

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

Si t<sub>0</sub> es el instante de cambio del aceite, por lo que es igual a cero, la ecuación anterior queda:

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

## RESULTADOS

En las figuras 2, 3, 4,5 y 6 se muestra el comportamiento de las concentraciones de los elementos de desgaste medidos en función del tiempo del aceite. En base a los resultados obtenidos, en las Figuras 2 y 3 se observa que la velocidad de desgaste de los componentes del motor a base de hierro y plomo son menores cuando se utiliza GNV que cuando se utiliza gasolina como combustible. Funcionando con gasolina, el incremento de partículas de desgaste de de hierro fue de 310,14% y el de plomo de 444,43%, mientras que funcionando con GNV los incrementos fueron de 82,52% para el hierro y 43,42% para el plomo. Como no se mantiene la proporción entre el hierro y el plomo para los dos combustibles, se supone que el mayor incremento del plomo con la gasolina se debió a la contaminación de plomo proveniente de los gases de la combustión de la gasolina

(gasolina con tetraetilo de plomo).

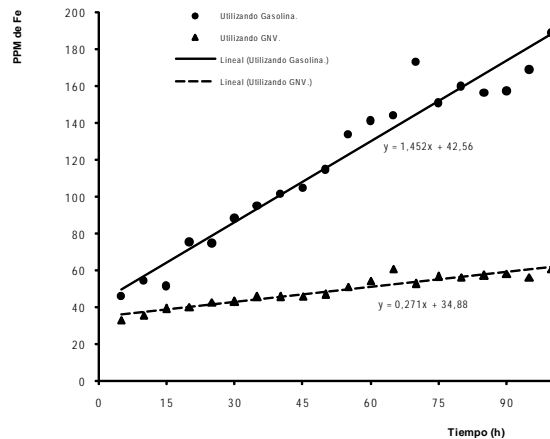


Figura 2. Comparación de las Concentraciones Corregidas del Fe vs. Tiempo.

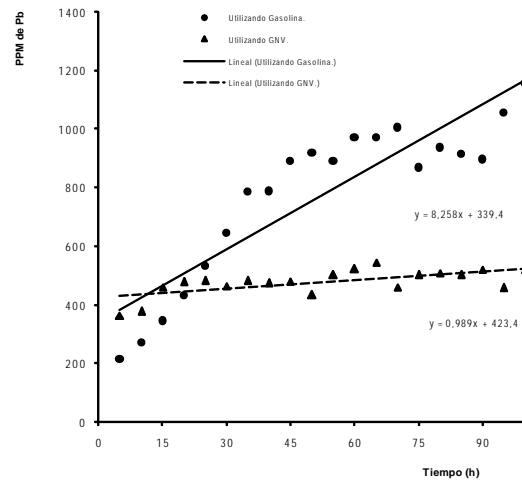


Figura 3. Comparación de las Concentraciones Corregidas del Pb vs. Tiempo.

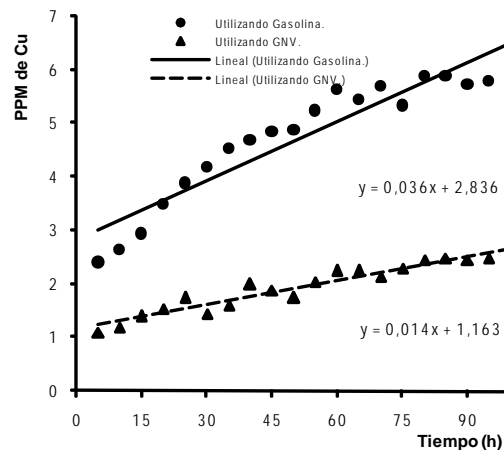


Figura 4. Comparación de las Concentraciones Corregidas del Cu vs. Tiempo

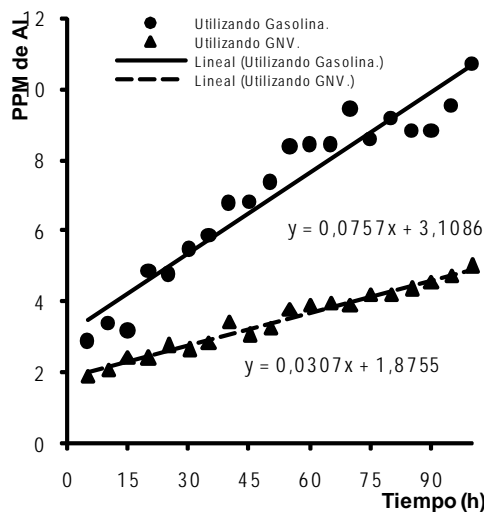


Figura 5. Comparación de las Concentraciones Corregidas del Al vs. Tiempo.

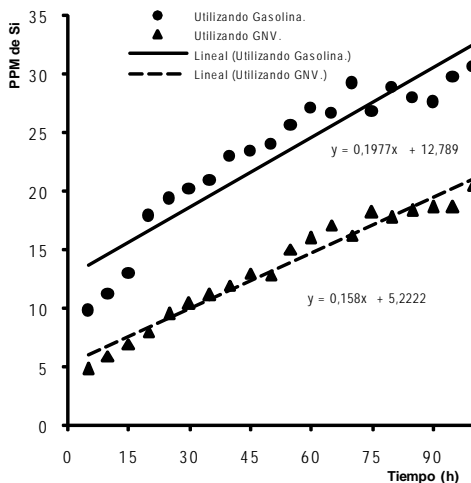


Figura 6. Comparación de las Concentraciones Corregidas del Si vs. Tiempo.

En cuanto a los valores de velocidad de desgaste calculados representados por las pendientes de las líneas de ajuste de las figuras, se observa una diferencia importante entre la velocidad de desgaste del hierro (1,4526  $\mu\text{gr}/1^*\text{h}$ ) y el plomo (8,2588  $\mu\text{gr}/1^*\text{h}$ ) para la prueba de gasolina mientras que para el GNV, se obtuvieron valores de 0,2716  $\mu\text{gr}/1^*\text{h}$  para el hierro y 0,9899  $\mu\text{gr}/1^*\text{h}$  para el plomo. Es decir, la velocidad de desgaste de hierro usando gasolina es 4,34 veces mayor que usando GNV y en el caso del plomo fue de 7,34 veces mayor, pero en este caso no se debe solo al desgaste, sino que incluye el efecto de la contaminación proveniente del plomo de la gasolina.

El análisis de los resultados de la contaminación por

cobre y el aluminio, y la velocidad de desgaste (Figuras 4 y 5) indican igualmente un mayor desgaste de piezas que aportan estos elementos cuando se usa gasolina que cuando se usa GNV. La velocidad de desgaste del cobre fue de 0,0366  $\mu\text{gr}/1^*\text{h}$  y del aluminio de 0,0757  $\mu\text{gr}/1^*\text{h}$  para el caso con gasolina y de 0,0149  $\mu\text{gr}/1^*\text{h}$  para el cobre y 0,0307  $\mu\text{gr}/1^*\text{h}$  para el aluminio usando GNV. La velocidad de desgaste del cobre usando gasolina es 1.456 veces mayor que utilizando GNV, mientras que para el aluminio resultó ser 1,465 veces mayor. El valor bajo de velocidad de desgaste del cobre en comparación con el plomo cuando se usa gasolina, comprueba la hipótesis que un elevado porcentaje de la contaminación de plomo proviene de la gasolina.

En cuanto al silicio, en la Figura 6 se observa cierto paralelismo entre las líneas de ajuste de las concentraciones de la gasolina y GNV, por lo que la velocidad de contaminación puede considerarse, aproximadamente la misma. Esto demuestra que el sílice proviene principalmente de contaminación externa y no está afectado por los niveles de desgaste del motor. La pequeña diferencia de la acumulación de contaminación en motor con gasolina sobre el GNV se explica porque los cilindros contienen pequeñas cantidades de sílice en su composición química.

## UNA EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO OBSERVADO

Los mecanismos de desgaste que se presentan en el motor son: (1) La abrasión producida por partículas contaminantes duras que circulan entre las superficies en movimiento. En el conjunto pistón, anillos y cilindro, el efecto de la abrasión es mayor cuando el pistón se encuentra en los puntos muertos, donde la velocidad es baja y la película de lubricante es muy delgada (Eyre T. S. 1983). (2) El desgaste adhesivo (Scuffing) el cual genera tasas elevadas de desgaste y produce fugas de gas y aceite de compresión por el cambio de la topografía de la superficie. (3) La corrosión originada por el ataque de condensados corrosivos en las superficies del motor (Schwartz, S. E. 1986).

El incremento de los mecanismos de desgaste con gasolina se debe a dos fenómenos: 1) Al lavado que se produce en las paredes de los cilindros cuando se usan hidrocarburos líquidos, que al ser transportados por el soplado (blow-by) remueven la capa lubricante facilitando los mecanismos de desgaste por abrasión, adhesivo y corrosivo. 2) La formación de áreas libres, originada por la vaporización del combustible líquido sobre la capa

lubricante, deja un espacio sin lubricación, desprotegido contra el desgaste y la fricción.

El efecto de la degradación o consumo de aditivos protectores contra la corrosión y la fricción se desecha, debido a que el lubricante utilizado esta recomendado para ambos combustibles.

En este orden de ideas, el comportamiento observado (mayor desgaste usando gasolina que el GNV) se debe a que a diferencia de la gasolina, el gas natural por su naturaleza gaseosa, no promueven mecanismos de desprotección de las superficies lubricadas, como la formación de huecos libres de lubricante y lavados de las películas de lubricantes. Aunado a esto, el uso de la gasolina con composición alta en azufre puede producir mayor cantidad de condensado corrosivo (formación de  $H_2SO_4$ ).

### AGRADECIMIENTOS

Al Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente, por su financiamiento parcial del presente proyecto.

### CONCLUSIONES

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 434.83%, 734.31%, 145.63% y 146.57%, respectivamente.

La velocidad de contaminación por Si se mantuvo, aproximadamente constante, debido a que su origen es externo. La diferencia de valores de las concentraciones se debe a que los valores iniciales son distintos para cada combustible.

El GNV como combustible en motores duales produce menor desgaste que la gasolina, confiriéndole mayor vida útil tanto al motor como al lubricante para condiciones de velocidad variable.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRECK, P; HAMILTON, B; SHEPHERD, R; CEMENSHA, R; LAUTMAN, L. 1997. "Performance, Engine Durability and Oil Life Analysis of Pilot Ignition Natural Gas Engines", SAE 972664.
- ESPINOZA, H. 1990. Diagnostico de fallos en motores de encendido por compresión de automoción. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- ESPINOZA, H; TINEO, A; CARABALLO, M; 2002. "Desgaste en un motor de encendido por chispa en condiciones de arranque y calentamiento usando gasolina y gas natural como combustible", Ciencia e Ingeniería. ULA. Volumen 23, N° 2 Julio 2002.
- EYRE T. S.; DENT, N; DALE, P. 1983. "Wear characteristics of piston rings and cylinder lines". Lubrication Engineering. PP. 216-220.
- Figueroa, S. 1994. Diagnostico del desgaste y el estado de motores de encendido por compresión. Universidad Politécnica de Valencia. SPUPV-94.2044.
- HANAKI, Y. 1996 "Research on emission control characteristics of a natural gas vehicle", *Elsevier* JSAE 9631588.
- HUBERT, J. BECK; JOHNSON. 1982. A model and the methodology for determining wear particle generation rate and filter efficiency in a diesel engine using ferrography. Sae paper 821195.
- KJER, T. 1982. Wear rate and concentration of wear particles in lubricating oil. WEAR.
- MACIÁN, V.; TORMOS, B.; OLMEDA, P.; MONTOSO, L. 2003. Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. *Tribology International* 36 771-776.
- PÉREZ, R. 1976. Control de desgaste y diagnosis anticipada de averías en motores por medio del análisis de aceite. Tesis Doctoral. Universidad Politecnica de Madrid UPM.
- RIGAUX, J. 1961. Le controle des moteurs diesel par la spectrographie des hulies de graissage. Dunop. Paris.
- ROUSSEAU, S.; LEMOULT, B.; TAZEROUT, M. 1999. "Combustion characterization of natural gas in a lean burn spark-ignition engine". *Proc. Instn Mech Engrs.* Vol 213. Part D. P481-489.
- STODOLA, J. 1990. Tribo-Technical Diagnostics of Combustion Engine. XXIII FISICA Congress, Sae paper 905152.

SCHWARTZ, S. E. 1986. "An analysis of upper cylinder  
Wear Whit fuel containing Metanol". Lubrication  
Engineering. May. pp. 292-299.

ZIZOW ERIK; HOPPE MANFRED; SCHOLLMAYER HANS- JÜRGEN  
2003. 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, pp. 635-637  
[3 page(s) (article)].