

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL GAS NATURAL EN UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO⁴

John R. Agudelo Santamaría¹, Jaime N. Gutiérrez Ibarra² y Julio C. González Romero³

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de un motor Toyota 4.5 litros, carburado montado en un banco de ensayos móvil ubicado en el laboratorio de motores térmicos de la universidad de Antioquia (Medellín 1500 m.s.n.m). La conversión en modo bicombustible a gas natural se logró con un *kit* de la casa italiana BRC. Operando con gas natural y tomando como línea base la gasolina, la potencia se reduce en torno a un 20% para régimen de par máximo y aumenta a mayores regímenes de giro debido a la disminución del rendimiento volumétrico. El torque se reduce en torno a un 20% en todo el rango de operación del motor. La experiencia muestra que estos resultados no se deben generalizar, ya que las conversiones de motores convencionales a gas natural son extremadamente sensibles a la selección del mezclador y al sistema eléctrico del motor, factores estos que no formaron parte de los objetivos de este estudio. Las emisiones contaminantes de CO se reducen en aproximadamente un 90% y las de HC disminuyeron en un 60% en promedio. Las emisiones de NOx se incrementaron en torno a un 33% debido a la mezcla tan pobre de funcionamiento.

Palabras claves: Gas Natural Vehicular, Motores de Encendido Provocado, Conversión, Desempeñomecánico, Desempeño ambiental

Abstract

This paper shows the measurements carried out on a Toyota 4.5 liter, carburated engine mounted in a mobile test bed located at heat engines laboratory at Universidad de Antioquia (Medellín, 1500 over sea level). Conversion was made with a BRC kit. Taking gasoline as baseline and comparing the natural gas performance, it was observed that power was reduced around 20% for maximum power regime and it was worse for this regime upwards. Torque was reduced around 20% in all engine operating range. Experience shows that those results should not be generalized because of the mixer and electric system influence in the conversion process. CO emissions were reduced around 90% and HC emissions diminished 60% average. NOx emissions increased around 33% maybe due to poor gas-air operation.

Key Words: Natural Gas for Vehicles, Spark Ignition Engines, Conversion, Mechanical, performance, Enviromental performance

¹ Ingeniero Mecánico, PhD en Termoenergética e-mail: radian@udea.edu.co

² Ingeniero Mecánico.

³ Ingeniero Mecánico

⁴ Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, calle 67 no. 53-108. Universidad de Antioquia. Departamento de Ingeniería Mecánica

Introducción

Esta investigación fue desarrollada por el grupo de ciencia y tecnología del gas y uso racional de la energía con la cooperación de la empresa GNV MOTOR y el respaldo económico de la universidad de Antioquia. Se constituye en el primero de una serie de trabajos orientados a la evaluación de las prestaciones mecánicas, energéticas y ambientales de motores a gasolina de diferentes tamaños y sistemas de suministro de combustible convertidos a gas natural.

Para lograrlo se instaló un *kit* de conversión mecánico con mezclador en el ducto de aire de admisión a un motor Toyota 4.5 litros de 24 válvulas montado en banco de ensayos dinamométrico. Al motor se le acopló un freno hidráulico que permitió obtener las curvas de torque y potencia a condiciones de plena carga. Se obtuvieron las curvas del motor operando con gasolina sin instalar el *kit*, luego se instaló el *kit* y se levantaron nuevamente las curvas con el ánimo de observar la influencia del mezclador sobre la caída de potencia. Finalmente se registraron las curvas para funcionamiento con gas natural. En los tres casos las pruebas se realizaron siempre con acelerador a fondo (mariposa completamente abierta).

En términos generales se observa una caída de potencia y torque, que por lo regular es más crítica a medida que incrementa el régimen de giro del motor, pero que en las condiciones normales de operación del motor en ciudad no superan el 20%. Este resultado no es generalizable o extrapolable a otros motores ni a otras conversiones. En el artículo se discuten algunos elementos que pueden generar incertidumbre en los resultados obtenidos, no obstante, continuamos orientando nuestras investigaciones en caracterizar los elementos claves del *kit* de conversión de cara a minimizar estas pérdidas. Los resultados arrojados demuestran que para cada tamaño y tecnología de motor debe instalarse el *kit* apropiado que garantice las mejores prestaciones.

Las emisiones contaminantes, especialmente las emisiones de monóxido de carbono (CO) y HC se redujeron drásticamente (en torno a 90% y 60% respectivamente). No obstante, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) incrementaron con el gas

natural durante gran parte del rango de operación del motor, debido a las elevadas concentraciones de oxígeno en la cámara de combustión.

Montaje experimental

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de motores térmicos de la universidad de Antioquia. Se instaló un *kit* de conversión mecánico para gas natural de la casa italiana BRC suministrado por la empresa GNV MOTOR sobre un motor Toyota 4.5 litros (ver tabla 1) montado en un banco de ensayos móvil que tiene 3 grados de libertad, lo que permite adaptar al mismo motores de diversos tamaños. Las mediciones de tipo mecánico como torque, régimen de giro y potencia, las cuales dan cuenta del desempeño del motor, se realizaron mediante el acoplamiento a un freno dinamométrico hidráulico con capacidad hasta 600 hp (figura 1), calibrado según el procedimiento recomendado por el fabricante. Las emisiones contaminantes se determinaron con un analizador de gases portátil especial para fuentes móviles, el cual tiene capacidad de registrar cada 0,7 segundos los 5 gases. Se midieron concentraciones de CO, CO₂, e hidrocarburos con sensor de infrarrojo no dispersivo (NDIR), las de O₂, y NO mediante celda electroquímica. Este equipo también permitió registrar la relación aire-combustible.

Tabla 1. Datos técnicos del motor de ensayos

Cilindrada		4500 cc
No. de cilindros		6 en línea
Sistema de suministro de combustible		Carburador
Sistema de distribución		24 válvulas, doble árbol de levas
Potencia máxima condiciones ISO	a	194 HP a 4600 r.p.m.
Torque máximo condiciones ISO	a	38.1 kg. – m a 3000 r.p.m.

Descripción de los ensayos

Todas las curvas se obtuvieron con el motor operando a plena carga, es decir, con la mariposa completamente abierta (acelerador a fondo), de la siguiente manera:

1. Motor sin *kit* instalado funcionando con gasolina (línea base)

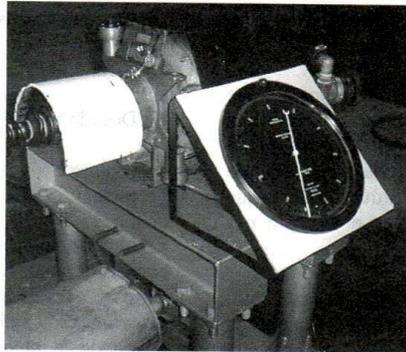


Figura 1 Freno dinamoétrico hidráulico usado en los ensayos

2. Motor con *kit* instalado funcionando con gasolina
3. Motor con *kit* instalado funcionando con gas natural comprimido

El primer ensayo se consideró como la línea base o curva de comparación de los otros dos ensayos. El ensayo 2 se realizó con el fin de verificar el efecto del mezclador sobre la variación de potencia del motor, debido a su influencia directa en la disminución del rendimiento volumétrico. Con el valor de torque suministrado por el freno hidráulico y el régimen de giro se calculó la potencia. En cada punto se midieron emisiones contaminantes. No se logró medir consumo específico de combustible, pero en los ensayos que estamos adelantando actualmente se va a incluir esta variable, de modo que podamos obtener el rendimiento de transformación de combustible en potencia útil en el eje.

Resultados

Desempeño mecánico

La potencia nominal de este motor en condiciones ISO es 194 hp a 4600 r.p.m., no obstante, en nuestros ensayos sólo se llegó hasta 130 hp en las condiciones del ensayo No. 1 (gasolina sin *kit* instalado). En condiciones normales de operación, la pérdida de potencia p - altura para el caso de la ciudad de Medellín no debería sobrepasar el 16%. Vale la pena recordar que el proceso de combustión en el motor se

ve afectado por la falta de oxígeno del aire. A medida que se gana altura sobre el nivel del mar, disminuye la cantidad de oxígeno del aire debido a la combinación de dos efectos: la disminución de presión atmosférica y la diferencia de pesos moleculares en los dos componentes principales del aire. El porcentaje restante se puede explicar desde el punto de vista de la calidad y poder calorífico del combustible empleado en las pruebas, ya que este es diferente al empleado en condiciones ISO. También influye la transferencia de calor al motor, especialmente porque existe una variación en la densidad del aire atmosférico

Las figuras 2 y 3 muestran los resultados de las curvas de potencia y torque a plena carga para los tres ensayos descritos antes. En general se observa una disminución de ambas magnitudes cuando el motor opera con gas natural. Este valor no supera el 20% en potencia para los regímenes de giro más comunes que alcanza el motor en ciudad (en torno a 3200 r.p.m.). En el caso del torque la disminución es aproximadamente constante en todo el rango de operación y no supera el 20% con gas natural.

Este fenómeno puede explicarse por la caída en la presión parcial del aire que genera el gas natural por sí mismo (Heywood, 1988).

También puede llegar a influir la entalpía de vaporización de la gasolina, ya que el gas natural se inyecta gaseoso y la gasolina en estado líquido, el proceso de vaporización de la gasolina es endotérmico lo que revierte en un enfriamiento de la

carga y por lo tanto incrementa la densidad del aire, fenómeno que no ocurre con el gas natural.

Una disminución en la potencia del motor debe interpretarse como un incremento en el tiempo que se requiere para llegar desde un punto fijo a un sitio determinado debido a que la velocidad del vehículo disminuye y una disminución de torque significa que el motor pierde capacidad de carga útil, como por ejemplo el arranque en una cuesta.

En la figura 3 se puede observar que a partir de 3500 r.p.m. existe una separación entre las curvas de potencia con y sin mezclador. Esto nos permite visualizar el efecto del mezclador sobre el rendimiento volumétrico del motor.

La siguiente expresión muestra la dependencia directa de la potencia con éste parámetro:

$$P_u = \frac{\eta_f \cdot N \cdot PCI \cdot \rho_a \cdot \eta_v \cdot V_d \cdot F}{i}$$

Donde:

P_u : Potencia útil.

N : rpm.

PCI : Poder calorífico inferior másico.

ρ_a : Densidad del aire.

η_v : Rendimiento volumétrico.

V_d : Cilindrada.

F : Dosado relativo $(m_f/m_a)_{real}/(m_f/m_a)_{esteq}$.

i : Número de vueltas del cigüeñal por ciclo de potencia.

Es importante destacar que los ensayos se realizaron con el mezclador ubicado en el ducto de aire (entre filtro y carburador), en las pruebas que se están programando actualmente también se incluirá el efecto de la ubicación del mezclador justo encima del carburador.

En la misma figura se observa una caída drástica de la potencia del motor al operar con gas natural por encima de las 3500 r.p.m.. Esto se debe en parte a la restricción que impone el mezclador al flujo de aire y probablemente a la falta de entrega suficiente de gas natural en el regulador, puesto que el instalado cubría rangos de hasta 4500 c.c. según datos del fabricante del *kit*, esto suponía estar trabajando en el límite de entrega del regulador. Actualmente se están programando pruebas en el mismo motor variando el tamaño del regulador y la posición del mezclador como se dijo anteriormente.

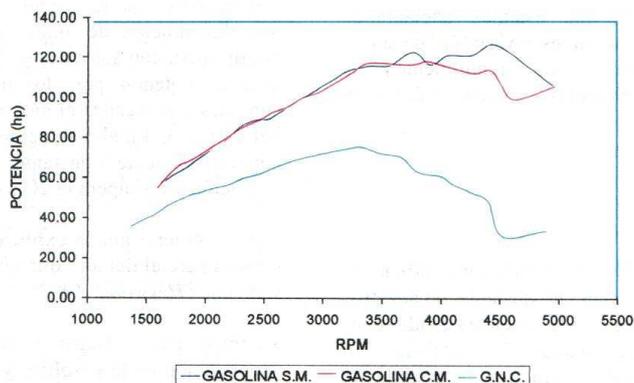


Figura 2 Potencia vs rpm. Motor Toyota 4.5L, carburado. S.M.: sin mezclador, C.M.: Con mezclador, GNC: gas natural comprimido

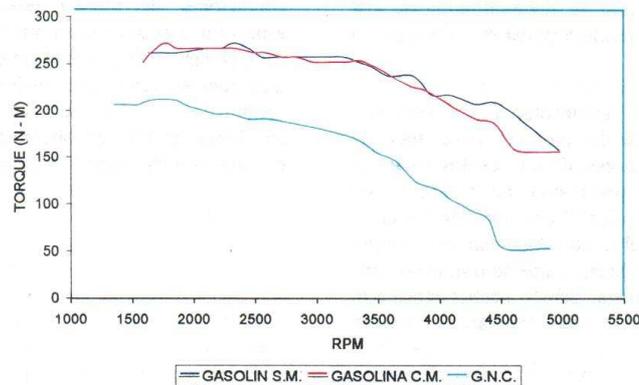


Figura 3 Torque vs rpm. Motor Toyota 4.5L, carburado. S.M.: sin mezclador, C.M.: Con mezclador, G.N.C.: gas natural comprimido

Esta experiencia demuestra que aquellas empresas que emprendan programas agresivos de conversión de vehículos deberían estudiar ya sea en banco de ensayo de motores, o en dinamómetro de chasis el comportamiento del motor con el nuevo combustible con el ánimo de hacer conversiones óptimas.

Emisiones contaminantes

Una de las variables más importantes en la determinación de las emisiones en los motores es la relación aire-combustible (figura 4). Los motores de encendido por chispa funcionan normalmente con mezclas cercanas a la estequiométrica o ligeramente ricas, para lograr su funcionamiento óptimo.

Esta figura nos permitirá explicar las tendencias de los resultados de las emisiones contaminantes de nuestro motor de ensayos.

En condiciones teóricas, las emisiones de CO_2 con gasolina son mayores que con gas natural. No obstante en la figura 6 se observa que durante gran parte del rango de operación del motor éstas fueron prácticamente iguales para el gas natural y la gasolina. Se debe tener en cuenta que la combustión con gas natural es mucho más completa, por lo tanto la mayor parte del carbono que reacciona se convierte en CO_2 , además el gas natural tiene una relación $H/C = 4$, lo que lo convierte en el

hidrocarburo con menores emisiones de CO_2 . Cuando el motor funciona con gasolina gran parte del carbono reacciona con el hidrógeno y el oxígeno monoatómico formando mayores emisiones de CO y HC (figuras 7 y 8), lo que se traduce en una reducción del porcentaje de CO_2 respecto al estequiométrico. La figura 5 muestra las emisiones de CO_2 medidas en el ensayo.

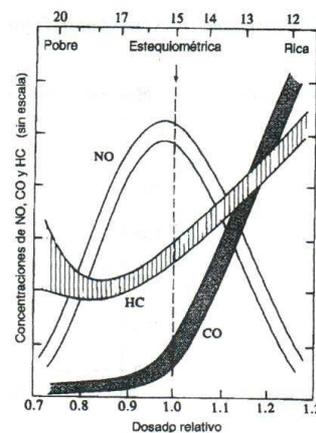


Figura 4. Emisiones contaminantes en función de la relación aire-combustible. (Heywood, 1988)

Si se observa con detalle la figura 5, a partir de 3500 r.p.m. aproximadamente, las emisiones con gas

natural disminuyen; esto se debe al aumento del exceso de aire en la mezcla a partir de este régimen (figura 6).

Las emisiones de CO incrementan fuertemente con el enriquecimiento de la mezcla. Para mezclas pobres, las concentraciones de CO en los gases de escape varían muy poco con la relación aire combustible. Esto explica el comportamiento de la figura 7, puesto que el motor a gas natural siempre trabajó con mezclas pobres, lo que se traduce en una combustión más completa, debido probablemente al tamaño del regulador. No obstante, aún en

condiciones de mezcla estequiométrica, sería de esperar que el gas natural produjera menos emisiones de CO debido a la homogeneidad de la mezcla, lo que representaría una mejora en el proceso de combustión. La reducción promedio de las emisiones de CO en operación con gas natural es cercana al 90% respecto a la gasolina.

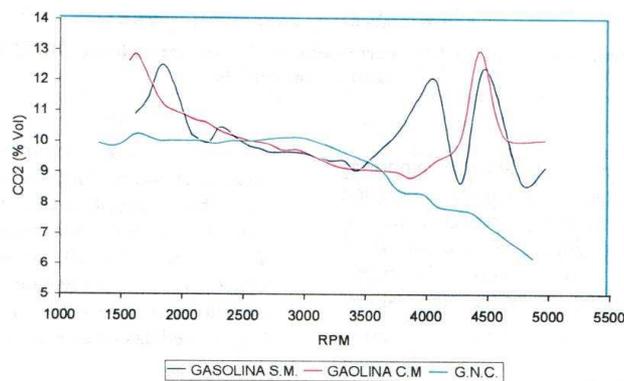


Figura 5. Emisiones de CO_2 . Motor Toyota 4.5L. Mariposa totalmente abierta. S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

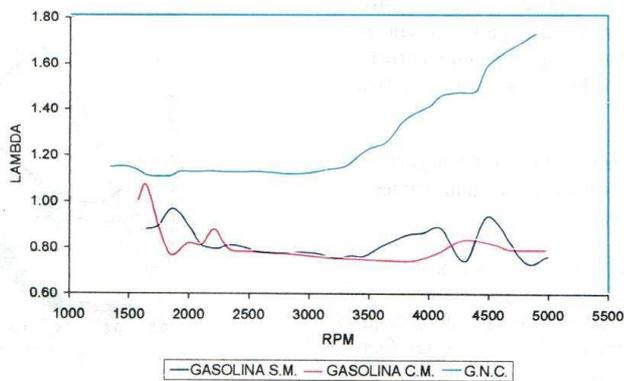


Figura 6. Relación aire-combustible respecto a la estequiométrica (lambda). Motor Toyota 4.5L. Mariposa totalmente abierta. S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

Las emisiones de hidrocarburos (HC) se muestran en la *figura 8*. Éstas son menores cuando el motor opera con gas natural, debido a que su combustión es mucho mejor que con gasolina.

Como muestra la *figura 8* las emisiones de HC crecen rápidamente cuando la mezcla llega a ser sustancialmente rica, incluso en la estequiométrica, debido a que no todo el combustible alcanza a quemarse. En mezclas muy pobres puede llegar a presentarse el apagado de llama, lo que genera igualmente elevadas emisiones de HC. Obsérvese en la *figura 8* que con gas natural éstas aumentan de una manera drástica a altas revoluciones, ya que la

mezcla se empobreció mucho a partir de este punto (corroborar con la *figura 6*).

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) se muestran en la *figura 9*. Con gas natural fueron superiores que las medidas con gasolina, este comportamiento se explica a partir de la *figura 4* puesto que el motor funciona con mezclas pobres al trabajar con gas natural (*figura 6*). Nótese que a partir de las 3500 rpm hay una disminución repentina de las emisiones, esto se explica por el empobrecimiento drástico que sufre la mezcla, lo que provoca un enfriamiento suficiente para reducir las emisiones de NOx cuya principal fuente de formación es la alta temperatura (Degobert, 1995).

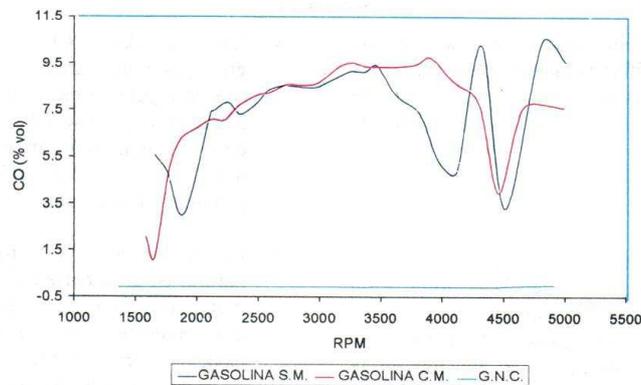


Figura 7. Emisiones de CO. Motor Toyota 4.5L. Mariposa totalmente abierta. S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

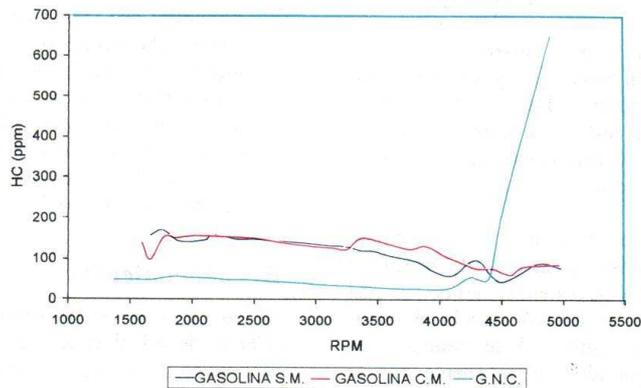


Figura 8. Emisiones de hidrocarburos (HC). Motor Toyota 4.5L. Mariposa totalmente abierta. S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

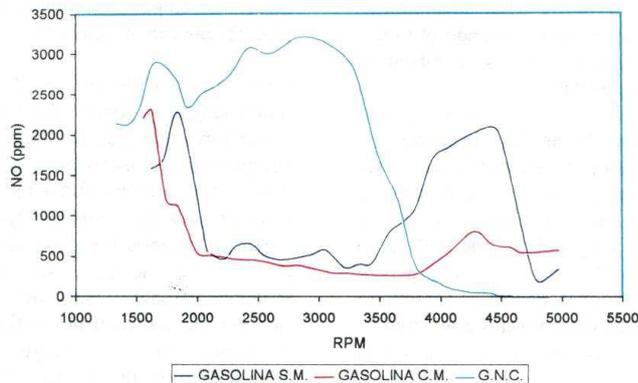


Figura 9. Emisiones de NOx. Motor Toyota 4.5L. Mariposa totalmente abierta. S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

En conclusión, para este ensayo, el uso del gas natural mejoró significativamente las emisiones contaminantes gaseosas del motor. Igualmente se notó una ligera disminución de la intensidad de ruido.

Conclusiones

- Los ensayos realizados mostraron una disminución en torque y potencia en torno a un 20% al funcionar con gas natural en el rango de operación normal del motor. Este valor es susceptible de ser mejorado en función de la elección correcta del reductor de presión de presión y del mezclador. Este resultado coincide bastante bien con la literatura técnica consultada (*Maxwell y Jones, 1994; UPME, 1998*)
- No se apreció gran diferencia en el comportamiento del motor con y sin mezclador hasta las 3500 r.p.m. De este régimen en adelante se aprecia una ligera separación de las curvas debido a la restricción que impone el mezclador al flujo de aire.
- En este ensayo se observaron reducciones drásticas en las emisiones de CO (del orden del 90% en promedio) y de las emisiones de HC (del orden del 60% en promedio) cuando el motor funciona con gas natural. Este resultado es similar a los reportados recientemente por la IANGV. (*Nylund y Lawson, 2000*).

- Las emisiones de CO₂ fueron muy similares en gran parte del rango de operación del motor. Era de esperarse menos formación de CO₂ en el gas natural, pero se debe observar que en el caso de la gasolina, hubo gran parte del combustible que reaccionó formando CO y HC por combustión incompleta.
- Las emisiones de NOx fueron mayores con gas natural en gran parte del rango de operación del motor, debido a la pobreza de la mezcla. Caen drásticamente a medida que la mezcla se hace exageradamente pobre debido al enfriamiento de la mezcla en la cámara de combustión.
- Se debe ser muy cuidadoso en la selección del kit de conversión apropiado. Este trabajo demuestra que para cada tamaño y tecnología de motor debe instalarse un kit que garantice las mejores prestaciones, por consiguiente, es recomendable que las empresas involucradas en la conversión de vehículos estudien el comportamiento del motor con el nuevo combustible ya sea en banco de motor o en dinamómetro de chasis.

Reconocimientos

Al comité para el desarrollo de la investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia por el apoyo económico al proyecto, al grupo de uso racional de la energía y preservación del medio ambiente (UREMA) de la universidad del norte (Barranquilla)

por sus aportes en la discusión de los parámetros claves de este artículo, a la empresa GNV MOTOR por el suministro del *kit* de conversión, a Empresas Públicas de Medellín y a NTS (National Truck Service) por el suministro de gas natural. Nuestro reconocimiento a la empresa PETROQUÍMICOS DE ANTIOQUIA por su apoyo al proyecto.

Referencias

DEGOBERT, P., Automobile and pollution, *Technip*, Paris. 1995

HEYWOOD, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals, *McGraw Hill*, New York. 1988.

MAXWELL, T. AND JONES, J. Alternative Fuels. Emissions, Economics and Performance. *SAE International*, 1994.

NYLUND, NILS-OLOF AND LAWSON, ALEX. Exhaust Emissions from Natural Gas Vehicles. *IANGV Technical Comitee*, 2000.

UPME. Prueba piloto gas natural vehicular –GNV– Bogotá, 1998.