

Influencia de la tecnología de conversión sobre el comportamiento de motores de gasolina convertidos a gas natural

John R. Agudelo Santamaría*, Jaime N. Gutiérrez Ibarra*, Julio César González Romero*, Lesmes Antonio Corredor**

Resumen

Este artículo muestra el comportamiento mecánico y ambiental de un motor Toyota 4.5 litros, 24 válvulas, carburado de segunda generación que ha sido convertido a funcionamiento bicomcombustible gasolina corriente (85 octanos)-gas natural comprimido con un sistema de la casa italiana BRC. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de motores térmicos de la Universidad de Antioquia (Medellín, 1500 m.s.n.m). Los resultados muestran la importancia de la correcta elección del kit de conversión sobre la potencia, el par y las emisiones contaminantes del motor. En condiciones de tráfico urbano, tanto la potencia como el par experimentaron una disminución cercana al 20% cuando el motor funcionaba con gas natural; esta misma tendencia fue más drástica en las emisiones gaseosas, a excepción de los óxidos de nitrógeno (NOx), que mostraron un ligero incremento.

Palabras clave: Motores de combustión interna, gas natural vehicular, sistemas bicomcombustibles, combustibles alternativos.

Abstract

In this paper the authors present the mechanical and environmental performance of a Toyota gasoline carburated engine (4.5 litres, 24 valves) second generation, which has been converted to dual gasoline/natural gas operation with an italian conversion kit BRC. Tests were carried out in engine stationary dynamometer instaled in Universidad de Antioquia (Medellin-Colombia, 1.500 meters above sea level). Results show the influence of righth selection of conversion kit over power, torque and pollutan emissions. In urban traffic conditions power and torque decreased around 20% with natural gas, however, emissions decreased more significantly except nitrogen oxides which increased slightly.

Key words: Internal combustion engines, compressed natural gas, conversion kits, alternative fuels.

Fecha de recepción: 3 de septiembre del 2001

* Grupo Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía de la Universidad de Antioquia.

** Grupo Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente de la Universidad del Norte-UREMA.

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 del Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) 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 de gasolina de diferentes tamaños y sistemas de suministro de combustible convertidos a gas natural.

Con objeto de comprobar la influencia del mezclador sobre el rendimiento volumétrico y, por ende, sobre la potencia y el torque del motor, se realizaron ensayos con y sin éste. Todas las pruebas se llevaron a cabo en condiciones de plena carga (acelerador a fondo) en régimen estacionario.

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 a otros motores ni a otras conversiones. En este artículo se discuten algunos elementos que pueden generar incertidumbre en los resultados obtenidos; no obstante, el grupo continúa orientando sus investigaciones hacia la caracterización de los elementos claves del *kit* de conversión, con objeto de 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 de monóxido de carbono (CO) y HC se redujeron drásticamente (alrededor de 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. Este resultado demuestra que el tamaño del regulador empleado en las pruebas era pequeño para este motor. Según datos de placa, el regulador se podía emplear en motores de hasta 4.500 c.c.. Se cree que hubo deficiencia de gas natural por haber estado en el límite de entrega. En los ensayos que se adelantan actualmente se pretende determinar la influencia del tamaño del regulador en las prestaciones del motor.

Montaje experimental

En la tabla 1 se muestran los datos técnicos del motor empleado para los ensayos. Éste se montó en un banco de ensayos móvil con capacidad para adaptar al mismo

motores de diversos tamaños. Las mediciones de tipo mecánico como torque, régimen de giro y potencia se realizaron mediante el acoplamiento a un freno dinamométrico hidráulico con capacidad de hasta 600 hp, calibrado según el procedimiento recomendado por el fabricante. Las emisiones contaminantes se determinaron con un analizador de gases portátil especial para fuentes móviles, marca *Smart 2000*, el cual tiene capacidad de registrar 5 gases cada 0,7 segundos. 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 relevantes del motor de ensayos

Cilindrada	4500 cc
N° de cilindros	6 en línea
Sistema de suministro de combustible	Carburador
Sistema de distribución	24 válvulas, doble árbol de levas
Potencia máxima a condiciones ISO	194 hp a 4600 r.p.m.
Torque máximo a condiciones ISO	38.1 kgf-m a 3000 r.p.m.

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

1. Motor sin *kit* instalado funcionando con gasolina (línea base)
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 segundo 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 4.600 rpm; no

obstante, durante los ensayos sólo se alcanzó 130 hp en las condiciones N° 1 (gasolina sin *kit* instalado). En condiciones normales de operación, la pérdida de potencia por 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 éste 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 1 y 2 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 3.200 rpm). En el caso del torque, la disminución es aproximadamente constante en todo el rango de operación y no supera el 20% con gas natural.

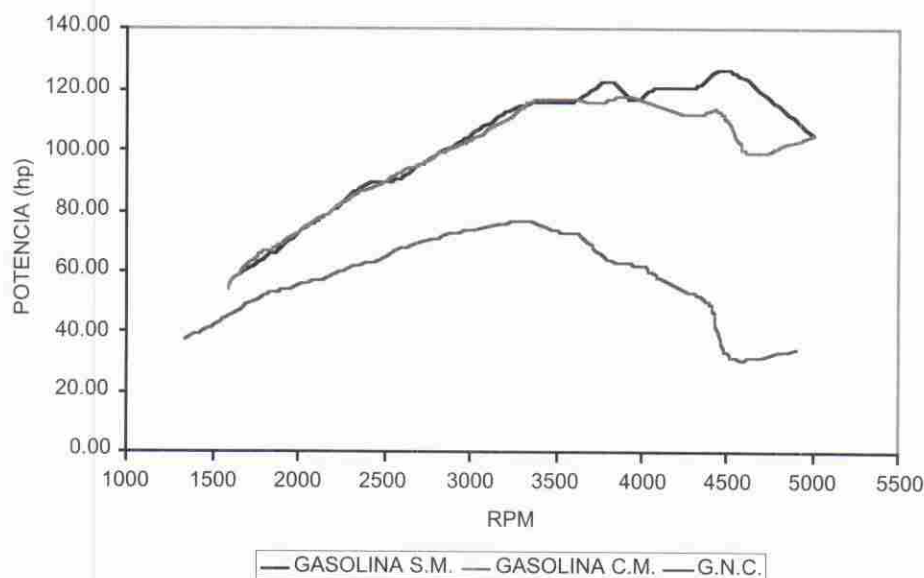


Figura 1. Potencia vs rpm. Motor Toyota 4.5L, carburado.
S.M.: sin mezclador, C.M.: con mezclador, GNC: gas natural comprimido

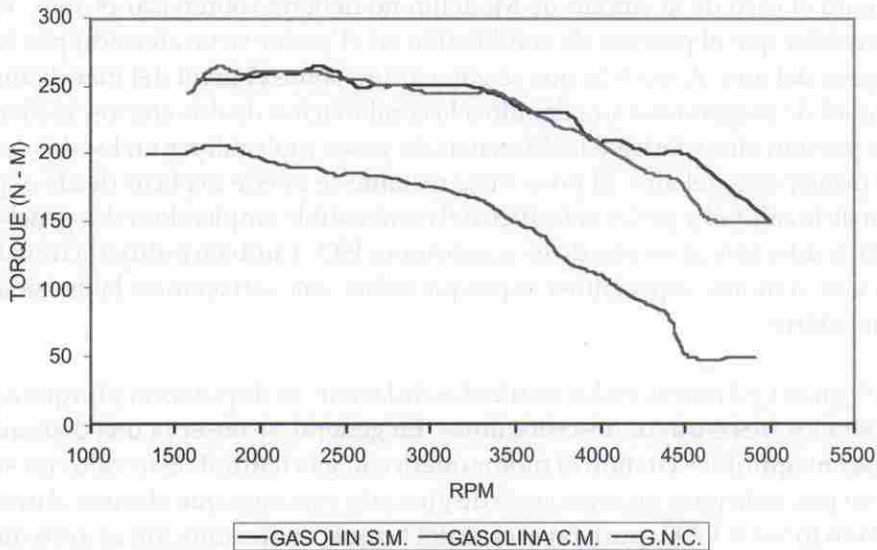


Figura 2. Torque vs rpm. Motor Toyota 4.5L, carburado.
S.M.: sin mezclador, C.M.: con mezclador, G.N.C.: gas natural comprimido

Este fenómeno puede explicarse por la caída en la presión parcial del aire que genera el gas natural por sí mismo (Heywood, 1988). En los motores de encendido por chispa, la presencia del combustible gaseoso (*y vapor de agua*) en el sistema de admisión reduce la presión parcial del aire por debajo de la presión de la mezcla. Para mezclas de aire, vapor de agua y combustible gaseoso, se puede escribir la presión en el colector de admisión como la suma de las presiones parciales de cada componente:

$$P_i = P_{a,i} + P_{f,i} + P_{H_2O,i}$$

donde:

$$P_i = 1 + \frac{P_{f,i}}{P_{a,i}} + \frac{P_{H_2O,i}}{P_{a,i}}$$

para llegar finalmente a:

$$\frac{P_{a,i}}{P_i} = \frac{1}{\left[1 + F_a \frac{M_a}{M_f} + \frac{m_{H_2O} \cdot M_a}{m_a \cdot M_{H_2O}} \right]}$$

P_i es la presión en el múltiple de admisión

$P_{a,i}$ es la presión parcial del aire en la admisión

$P_{f,i}$ es la presión parcial del combustible en la admisión

P_{H_2O} es la presión parcial del vapor de agua en la admisión

F_a es la relación combustible-aire

M_a es el peso molecular del aire seco

M_f es el peso molecular del combustible

En esta última expresión se observa que a medida que disminuye el peso molecular del combustible disminuye la relación de presiones, o lo que es lo mismo, disminuye la densidad del aire en la admisión. 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.

En la figura 1 se observa que a partir de 3.500 rpm 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 y, por ende, sobre la potencia. La siguiente expresión muestra la dependencia directa de la potencia con este parámetro:

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

Donde:

P_u : Potencia útil

N : rpm

$P.C.I$: Poder calorífico inferior másico

ρ_a : Densidad del aire

η_v : Rendimiento volumétrico

V_d : Cilindrada

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

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 3.500 rpm. 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 4.500 c.c. según datos del fabricante del *kit*; esto suponía estar trabajando en el límite de entrega del regulador.

Emisiones contaminantes

Una de las variables más importantes en la determinación de las emisiones en los motores es la relación aire-combustible (figura 3). 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.

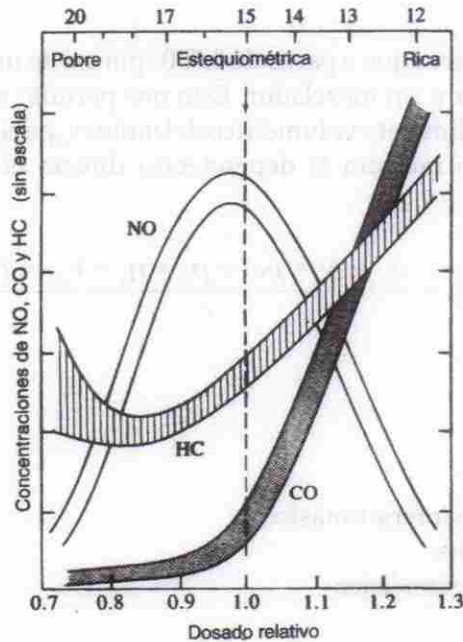


Figura 3. Emisiones contaminantes en función de la relación aire-combustible (Heywood, 1988)

En condiciones teóricas, las emisiones de CO_2 con gasolina son mayores que con gas natural. No obstante, en la figura 4 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 . 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 6 y 7), lo que se traduce en una reducción del porcentaje de CO_2 respecto al estequiométrico. La figura 4 muestra las emisiones de CO_2 medidas en el ensayo.

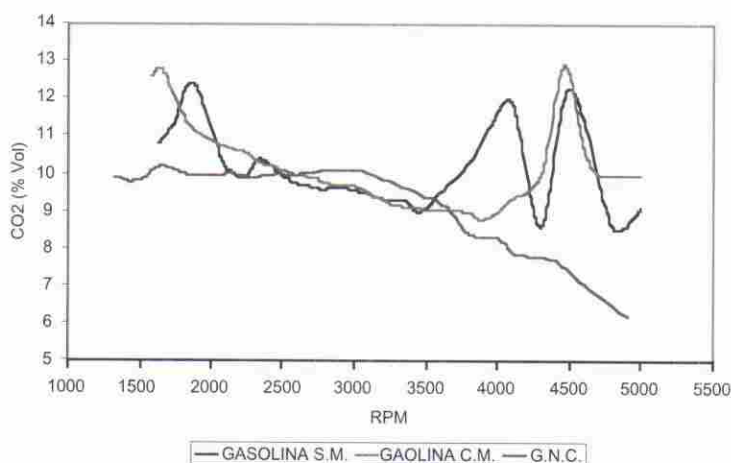


Figura 4. Emisiones de CO_2 . Motor Toyota 4.5L. *Mariposa totalmente abierta.*
S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

Si se observa con detalle la figura 4, a partir de 3.500 rpm 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 5).

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 6, puesto que el motor de gas natural siempre trabajó con mezclas pobres, lo que se traduce en una combustión más completa, debido probablemente al tamaño del regulador. No obstante, aun 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.

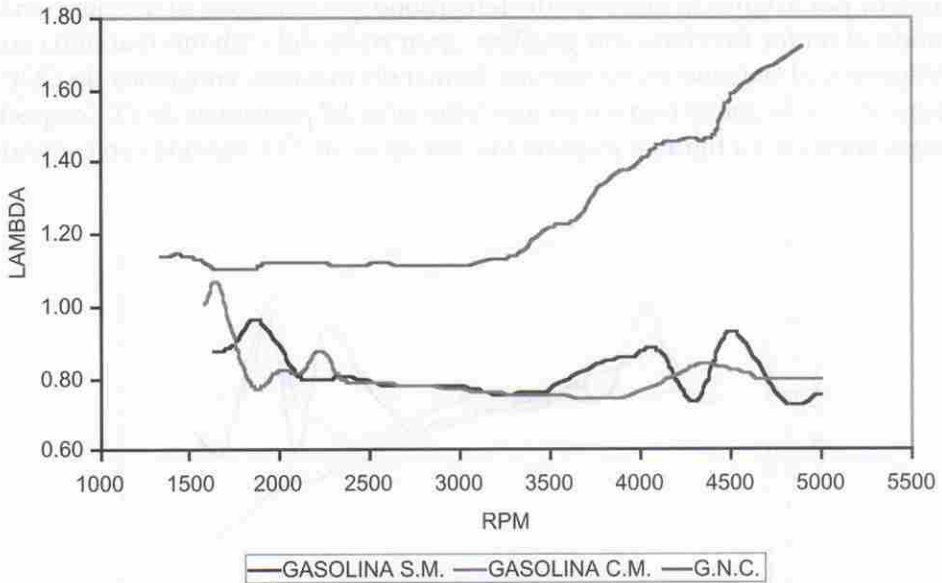


Figura 5. Relación aire-combustible respecto a la estequiométrica (lambda).
Motor Toyota 4.5L. Mariposa totalmente abierta.
S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

Las emisiones de hidrocarburos (HC) se muestran en la figura 7. Éstas son menores cuando el motor opera con gas natural, debido a que su combustión es mucho mejor que con gasolina.

La figura 7 corrobora la tendencia observada en la figura 3 cuando se empobrece fuertemente la relación aire-combustible. 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 completamente. En mezclas muy pobres puede llegar a presentarse el apagado de llama, lo que genera igualmente elevadas emisiones de HC. Obsérvese en la figura 7 que con gas natural éstas aumentan de una manera drástica a altas revoluciones, ya que la mezcla se empobrece mucho a partir de este punto (corroborar con las figuras 3 y 5).

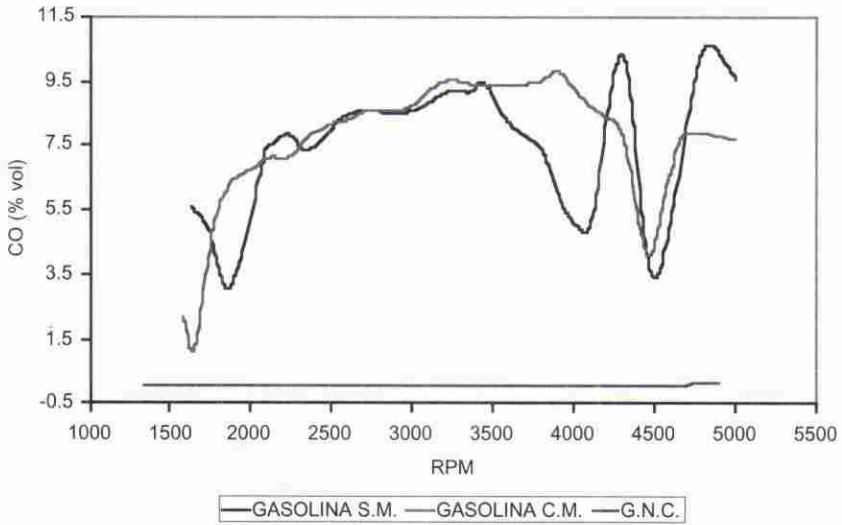


Figura 6. Emisiones de CO. Motor Toyota 4.5L. *Mariposa totalmente abierta.* S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

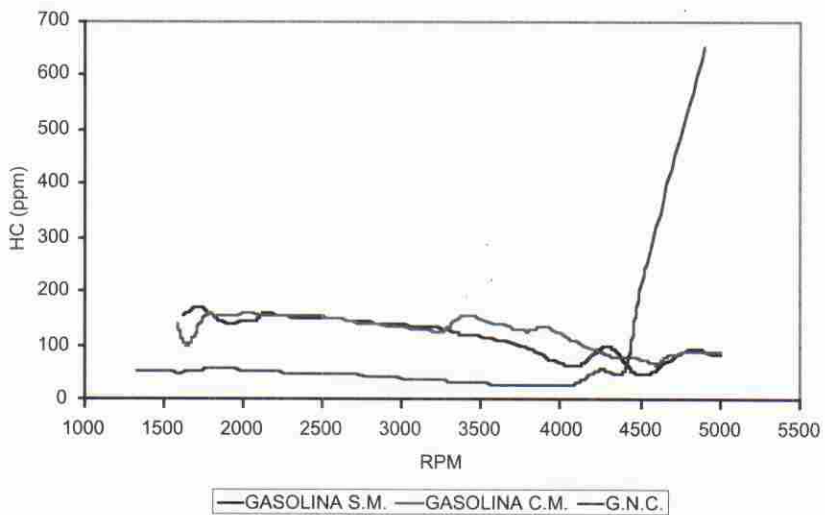


Figura 7. Emisiones de hidrocarburos (HC). Motor Toyota 4.5L. *Mariposa totalmente abierta.* S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) se muestran en la figura 8. Con gas natural fueron superiores que las medidas con gasolina; este comportamiento se explica a partir de la figura 5, puesto que el motor funciona con mezclas pobres al trabajar con gas natural. Nótese que a partir de las 3.500 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). Las figuras 9 y 10 muestran, respectivamente, las curvas de temperatura de aceite y temperatura de gases de escape. Obsérvese que en ambos casos el gas natural presenta menores temperaturas. Esto permite inferir que también en la cámara de combustión las temperaturas con gas natural fueron más bajas para este ensayo, lo cual es lógico debido a la mezcla tan pobre que se presentó por el tamaño inapropiado del regulador. Esto explica que la formación de óxidos de nitrógeno no es de origen térmico sino que es causada por efectos de elevadas concentraciones de oxígeno, que a las temperaturas de la cámara de combustión y por disociación química reacciona con el nitrógeno del aire para formar los NOx.

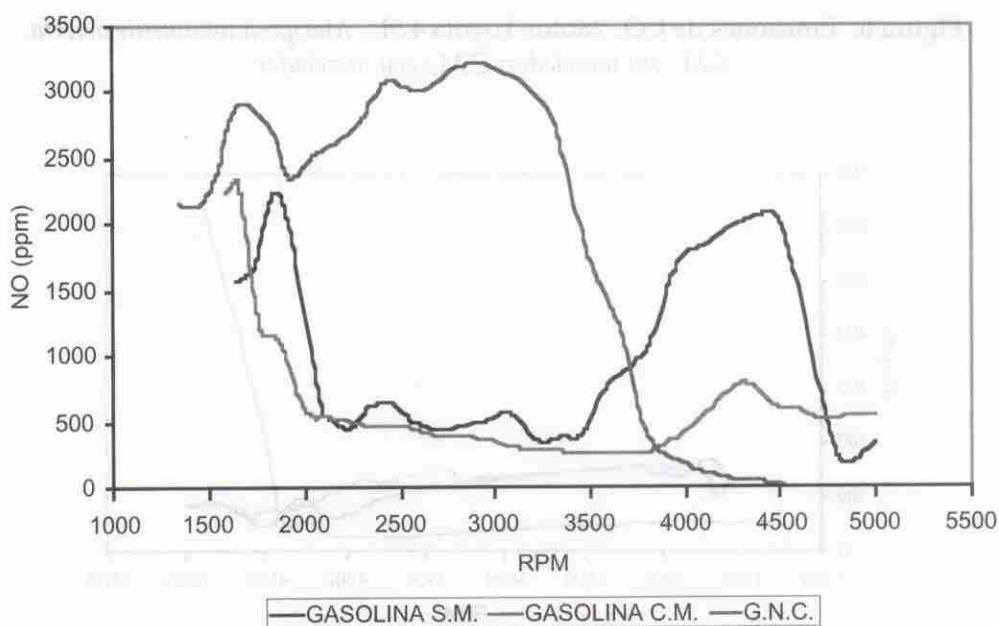


Figura 8. Emisiones de NOx. Motor Toyota 4.5L. Mariposa totalmente abierta. S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

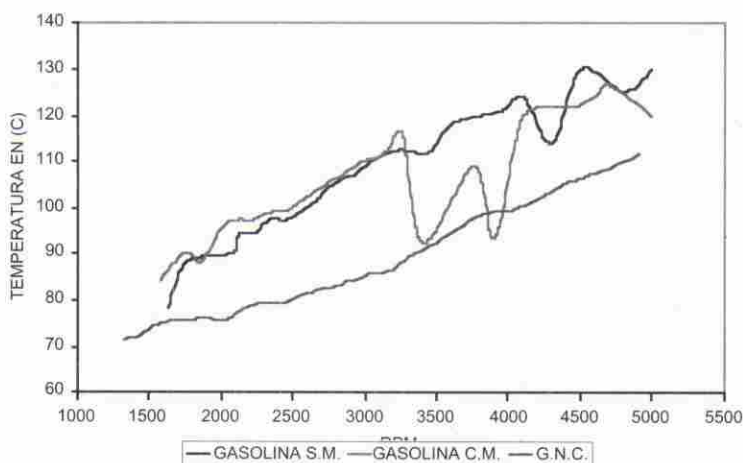


Figura 9. Temperatura de aceite (C). Motor Toyota 4.5L. Mariposa totalmente abierta. S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

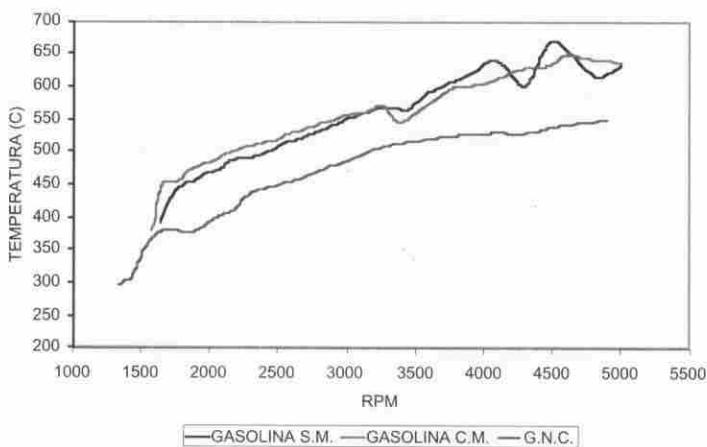


Figura 10. Temperatura de gases de escape (C). Motor Toyota 4.5L. Mariposa totalmente abierta. S.M.: sin mezclador; C.M.: con mezclador

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

- 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.
- 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 mediante de la elección correcta del reductor de presión y del mezclador.
- No se apreció gran diferencia en el comportamiento del motor con y sin mezclador hasta las 3.500 rpm. 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 y a la falta de entrega de combustible en el regulador.
- 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.
- 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 NO_x 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.

TRABAJOS FUTUROS

- Caracterización de diferentes *kits* de conversión en función del tamaño del regulador y ubicación del mezclador sobre motor en banco de ensayos.
- Caracterización de *kits* de conversión en función del tamaño y tecnología del motor bajo condiciones de plena carga, carga parcial y cambios de carga en banco de ensayos.

- Verificación de la influencia del tipo de combustible (gasolina extra, gasolina corriente, gas natural de pozo libre y gas natural de pozo asociado) sobre las prestaciones del motor con la ayuda de cromatografía de gases.
- Determinación de consumos instantáneos de combustibles líquidos y/o gaseosos en diferentes condiciones de operación del motor, con el fin de determinar los rendimientos energéticos del motor. Para esto, el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía está en proceso de adquisición de estos medidores sofisticados.
- Determinar con la ayuda de un banco dinamométrico móvil y una estación meteorológica del grupo del gas, la influencia de la altura sobre el nivel del mar y de las condiciones atmosféricas sobre el desempeño de diferentes motores de gasolina.
- Estudio del impacto de la intercambiabilidad de los diferentes gases naturales colombianos sobre el rendimiento energético de motores convertidos.

Agradecimientos

Al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia por el apoyo económico al proyecto, a la empresa GNV MOTOR por el suministro del *kit* de conversión, a las Empresas Públicas de Medellín y a NTS (National Truck Service) por el suministro de gas natural.

Referencias

- DEGOBERT, P. *Automobile and pollution*. París: Technip, 1995.
- HEYWOOD, John B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Nueva York: McGraw-Hill, 1988.