

# Emisiones de hidrocarburos en los gases de escape de un motor trabajando con gasolina o GNC como combustible

*Analí Machado\*, Neyma García, Józef Przybylski y Vidal Montiel*

*Centro CEDEGAS, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia  
Apartado postal 526, Maracaibo 4001-A, Venezuela*

Recibido: 13-09-99 Aceptado: 02-10-00

## Resumen

Los componentes de los gases de escape controlados legalmente son: monóxido de carbono, hidrocarburos totales, óxidos de nitrógeno y partículas (en vehículos con motores diesel), pero existen muchos otros componentes en los gases de escape de un motor de un vehículo, los cuales no están controlados explícitamente por la ley, y son clasificados como componentes no regulados de los gases de escape. Las concentraciones de estos componentes no regulados pueden representar también un riesgo para la salud. El propósito de este trabajo es cuantificar las emisiones de hidrocarburos alifáticos en los gases de escape de un motor de encendido por chispa cuando se emplea gasolina o GNC (Gas Natural Comprimido) como combustible, lo cual permitirá evaluar la reducción de estos hidrocarburos al utilizar GNC en comparación con la gasolina. Los resultados obtenidos de los ensayos al utilizar los diferentes equipos de conversión de gasolina-GNC, permiten constatar que indiferentemente del equipo de conversión estudiado siempre existe una disminución de los componentes hidrocarburos en comparación con el empleo de gasolina como combustible. De igual manera que el tipo de equipo de conversión influye en los componentes de hidrocarburos alifáticos en los gases de escape.

**Palabras clave:** Combustible alterno; GNC; emisiones de hidrocarburos; motores de combustión interna; equipos de conversión.

## Hydrocarbons emissions in the exhaust of gasoline and CNG vehicles

### Abstract

The legally controlled components in diesel engine vehicles are: carbon monoxide, total hydrocarbons, nitrogen oxides and articulate matter. However, there are many other components in a gas exhaust engine which are not explicitly controlled by law, and are therefore classified as unregulated gas exhaust components. The concentration of these unregulated components can also represent high health risk. The purpose of this paper is to quantify the emissions of unregulated hydrocarbons in the exhaust of gasoline and natural gas engines. The present investigation will attempt to evaluate a reduction in hydrocarbon emission when using CNG instead of gasoline. The results of these measurements showed that the use of any of the three

\* Autor para la correspondencia. E-mail:amachado@luz.ve

conversion kits resulted in a decrease of the level of hydrocarbons components in the exhaust, when compared with those obtained from gasoline. Nevertheless, the type of gasoline-CNG conversion kit used influences the level of hydrocarbons components in the exhaust gases.

**Key words:** Alternative fuel; CNG; hydrocarbons emissions; internal combustion engines; conversion equipment.

## Introducción

Puede afirmarse que los vehículos automotores son responsables de un 10-15% de la contaminación atmosférica, dependiendo del grado de uso del transporte automotor en el país (1). Debido a su marcada influencia sobre la calidad del aire, las emisiones de fuentes móviles han sido objeto de gran énfasis en el control legal, mayor que el de cualquier otra fuente individual de tipo estacionario.

Las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos totales, además de las partículas (material sólido y/o líquido disperso en el gas) en el caso de los motores diesel, están reguladas por ciertos instrumentos legales en numerosos países, en particular, en aquellos que están desarrollados industrialmente. Es así, como los valores límites de las emisiones antes mencionadas, han sido definidas para estos componentes de gases de escape (2). Estos componentes regulados fueron medidos adicionalmente en una investigación llevada a cabo en forma paralela (3). Pero existen otros componentes en los gases de escape de los vehículos, los cuales no son controlados legalmente en forma explícita y por lo cual son catalogados como componentes no regulados de los gases de escape.

En virtud de ello, es posible clasificar las emisiones tóxicas emitidas en los gases de escape de un motor de un vehículo en reglamentadas y no reglamentadas, y considerar que su acción sobre el organismo humano es variada, abarcando desde sensaciones desagradables hasta enfermedades graves, incluyendo el cáncer. Dependiendo el tipo y extensión del daño causado, del tipo y concentraciones de los contaminantes presen-

tes, y del tiempo de exposición (dosis), pueden tener efecto letal (4 y 5).

Por más de 10 años, la legislación en los Estados Unidos (considerado como el país pionero en el área de la legislación de los gases de escape) ha producido sistemas para vehículos que permiten reducir las emisiones controladas de los gases de escape. Sin embargo, estos no deben producir, de acuerdo a lo establecido en el Acta de Aire Limpio y a lo acordado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, un aumento en las concentraciones de los componentes no regulados que se pueden convertir en una amenaza para la salud. Es por ello, que las empresas fabricantes de vehículos deben estudiar cuál y en qué medida el uso de un determinado dispositivo o sistema causa un incremento, reduce o elimina las emisiones de los agentes contaminantes no regulados.

Los componentes tóxicos no normalizados, es decir, no sujetos a estandarización, comprenden: partículas, elementos principales (carbono, hidrógeno, nitrógeno), remanentes de metales, compuestos volátiles, sulfuros, óxidos de azufre, ácido sulfhídrico, cianuros, aromáticos policíclicos (HAP), sustancias aromáticas, así como hidrocarburos individuales.

Los gases de escape contienen más de 200 hidrocarburos diferentes que se dividen en alifáticos (con cadenas abiertas o cerradas) y aromáticos, que contienen un anillo de benceno. Los hidrocarburos como el metano, etano, etileno, benceno, propano, acetileno y otros son sustancias consideradas tóxicas (4).

Se están realizando grandes esfuerzos dirigidos hacia el desarrollo de actividades

no convencionales para la disminución de las contaminantes emitidos por los motores de vehículos. Entre ellos, el uso de combustibles "limpios" alternativos juega un papel importante en las recientes estrategias de control de contaminantes del aire, sobre todo para California y los Estados Unidos (6).

El gas natural tiene un considerable potencial como combustible "limpio" para vehículos automotores, ofreciendo un gran número de ventajas técnicas y económicas. El gas natural comprimido (GNC), representa un excelente combustible alternativo a la gasolina por su bajo costo, abundancia, combustión limpia, menores emisiones contaminantes y la existencia de sistemas de transporte y distribución del mismo (6, 7).

Los motores alimentados con el GNC como combustible, generalmente muestran muy bajas emisiones de hidrocarburos reactivos, monóxido de carbono y partículas. La gran importancia que reviste la reducción de las emisiones de hidrocarburos reactivos y de monóxido de carbono es debido a que estos componentes tienden a incrementar los niveles de ozono. Adicionalmente, un vehículo automotor operando con GNC no solo emite menores cantidades de hidrocarburos reactivos, sino que dichos hidrocarburos son menos reactivos que los emitidos por combustibles convencionales (6).

Los hidrocarburos reactivos se definen como aquellos hidrocarburos especialmente reactivos en la atmósfera para provocar la formación del ozono, y son también llamados hidrocarburos no metanos (NMHC). El metano tiene una *moderada* reactividad, luego es generalmente considerado "no-reactivo" en término de formación de ozono(8, 9); la importancia del metano radica en que el mismo es considerado un gas generador del efecto "invernadero" y por ello debe ser estudiado detalladamente.

Trabajos realizados recientemente han mostrado que las emisiones de NMHC son dependientes del tipo de vehículo y de la composición del GNC, también la tecnología

utilizada para la conversión tiene una influencia significativa en las emisiones reguladas de los gases de escape (9).

El propósito de esta investigación es determinar y cuantificar las emisiones de hidrocarburos alifáticos presentes en los gases de escape de un motor que opera con gasolina o con GNC. Para el análisis con este último combustible se utilizarán tres diferentes equipos de conversión de gasolina a gas natural comprimido. Dentro de los hidrocarburos alifáticos, es importante el determinar el contenido de metano obtenido en las emisiones de los gases de escape para ambos combustibles, debido a que el metano es el componente principal del gas natural y se asume en algunas investigaciones que el contenido de metano aumenta al emplear este combustible alternativo (6, 9 y 10).

Este trabajo se enmarca dentro de los proyectos realizados en el Centro de Combustibles Gaseosos para Vehículos Automotores (CEDEGAS).

## Materiales y Métodos

### Descripción del banco de pruebas

El banco de pruebas está constituido por un conjunto de equipos e instrumentos que se utilizan para la medición experimental, en el laboratorio, de los diferentes parámetros que caracterizan el funcionamiento de un motor, así como los componentes tóxicos de los gases de escape de un motor de encendido por chispa que utiliza gasolina o gas natural como combustible. Los componentes del banco de prueba son los siguientes:

- Un motor FORD 302 (5,0 L), de encendido por chispa, 4 tiempos, de 8 cilindros en V, relación de compresión de 8,4:1, la carrera del pistón es de 76,2 mm y el diámetro de cilindro es de 101,6 mm. La cilindrada corresponde a 4942 cm<sup>3</sup>, mientras que la potencia máxima (nominal) es de 130 hp.

- Un dinamómetro hidráulico CLAYTON, modelo CAM 250 (186 kW), entre 2200 y 8000 rpm. Como elementos de medición se aplicaron tres indicadores digitales, es decir, de velocidad de rotación, potencia y torque.
- Tres equipos de conversión de gasolina a gas: **Equipo 1:** se caracteriza por estar constituido por un conjunto de dos reductores, es decir, un reductor de alta presión y un reductor principal. Este equipo dispone de tres cámaras de reducción; la primera ubicada en el reductor de alta presión y las otras dos cámaras en el reductor principal; en este último se encuentra también una cámara de vacío. El equipo se utiliza con un mezclador aire-gas diseñado y fabricado en el centro de investigaciones CEDEGAS, especialmente para el motor instalado en el banco. **Equipo 2:** está constituido por un conjunto de dos reductores, uno de alta presión y otro formado por la cámara de media y baja presión, el cual representa el reductor principal. Entre el reductor de alta presión y el reductor principal se encuentra una válvula de cierre del flujo de gas controlada por vacío. El gas que sale de la cámara de baja presión hacia el mezclador lo hace a una presión mayor que la atmosférica; este equipo cuenta con un mezclador propio, diseñado por el mismo fabricante. **Equipo 3:** consta de tres cámaras de reducción que se encuentran ubicadas en un solo cuerpo, constituyendo así un reductor integrado. En este equipo también existe una cámara de vacío, la cual se conecta al múltiple de admisión del motor. Para este equipo se utilizó el mezclador diseñado y fabricado en CEDEGAS, ya que no se contaba con el mezclador diseñado por el fabricante para este tipo de motor.
- Cilindro de acero inoxidable de 500 cm<sup>3</sup>, para la captación de la muestra de los gases para el análisis.
- Analizador de motor ALLEN Test Products Digital Work Station: el equipo permite realizar análisis del estado de funcionamiento del motor de una manera manual o de forma automática (ensayo secuencial). También permite medir la temperatura de aceite del motor, la velocidad de rotación del mismo y el valor del coeficiente de exceso de aire en función de la composición de los gases de escape, cuando se utiliza gasolina, metano o propano como combustible.
- Cilindro para la medición del consumo de gasolina por el motor.
- Cilindro de acero de la marca "Dalmine", de 80 dm<sup>3</sup>, para el suministro del GNC al banco de pruebas.
- Cromatógrafo de fase gaseosa equipado con detector de ionización a la llama (FID). Este equipo es de vital importancia debido a la compleja composición de las emisiones (pues pueden aparecer otros compuestos orgánicos como aldehidos, cetonas, fenoles, alcoholes, aminas, hidrocarburos aromáticos, policíclicos). Adicionalmente, las extremadamente bajas concentraciones de los componentes no regulados, hacen necesario el uso de técnicas de detección muy sensibles, contando en este caso con el cromatógrafo de gases del Laboratorio de Cromatografía del Instituto de Investigaciones Petroleras de LUZ (INPELUZ).

### **Especificaciones de los combustibles utilizados**

Las especificaciones de los combustibles utilizados en este trabajo se muestran en las Tablas 1, 2 y 3.

**Combustible líquido (gasolina):** La gasolina que se empleó para la investigación fue de 91 RON, con un contenido de azufre por debajo de 20 ppm. La composición de este combustible fue obtenida empleando

Tabla 1  
Especificaciones de la Gasolina de 91 RON

Composición		
Componentes	Composición (Porcentaje molar)	Contenido líquido
Isopentano	1,42842	0,51984
N-Pentano	7,89610	2,84437
Isohexano	13,78985	5,69210
N-Hexano	19,12686	7,82396
Heptanos	30,76176	14,11335
Octanos	16,79436	8,55069
Nonanos	10,20265	5,71198
Características		
Gravedad Específica	: 3,3902 (Aire = 1.0)	
Peso Molecular	: 98,189 Lb/Lbmol	
Presión Seudocrítica	: 405,85 Lpca	
Temperatura Seudocrítica	: 957,37 R	
Contenido Líquido (GPM)	: 45,256 Gal/1000 Pcn	
Valor Calorífico Neto	: 4998,7 Btu/Pcn	
Valor Calorífico Bruto	: 5394,0 Btu/Pcn	
Viscosidad del Gas	: 0,0045 cP a Py T	
Factor Z del Gas	: 0,8296 a P y T	

un cromatógrafo en el laboratorio de INPE-LUZ y se observa en la Tabla 1.

La importancia del conocimiento de las especificaciones de la gasolina radica en el hecho que se ha determinado que las variaciones en la composición del combustible líquido, pueden causar modificaciones en la composición de los gases de escape (6). Adicionalmente, se ha determinado que el contenido de azufre presente en este combustible tiene un fuerte efecto en las emisiones de los gases de escape; es así como bajos niveles de azufre en la gasolina utilizada en Venezuela resultan en una disminución en las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO e hidrocarburos no metanos (NMHC), en comparación con los valores esperados del promedio de las gasolinas empleada en los Estados Unidos, cuyo contenido de azufre es de aproximadamente unos 340 ppm (9).

**Combustible gaseoso (GNC):** La composición del GNC utilizado en esta investigación, así como el %CH<sub>4</sub>/HC se muestra en las Tablas 2 y 3 y fue obtenida mediante el empleo de un cromatógrafo de gases.

Existen variaciones en la composición del gas natural entre proveedores y más aún dicha variación tiene lugar en el transcurso del tiempo para el mismo proveedor.

Se ha determinado que variaciones en el Número de Wobbe con composiciones diferentes del gas natural afectan en los motores la relación aire-combustible, lo cual puede afectar significativamente las emisiones. Además, los hidrocarburos no-metanos (NMHC) presentes en el combustible gaseoso tienen un efecto significativo en las emisiones; es así como gran parte de las emisiones de los NMHC en un motor que opera con

Tabla 2  
Especificaciones del GNC utilizado en los Equipos 1 y 2

Componentes	Composición	
	Composición (Porcentaje molar)	Contenido líquido (Porcentaje molar)
CO <sub>2</sub>	3,55914	0,00000
Nitrógeno	0,48963	0,00000
Metano	84,14716	0,00000
Etano	8,53290	0,00000
Propano	2,38492	0,65363
Isobutano	0,26270	0,08548
N-Butano	0,26997	0,08466
Isopentano	0,12406	0,04515
N-Pentano	0,14810	0,05335
Isohexano	0,02598	0,01073
N-Hexano	0,02892	0,01183
Heptanos	0,01666	0,00764
Octanos	0,00987	0,00502
Características		
Gravedad Específica	: 0,6699 (Aire = 1.0)	
Peso Molecular	: 19,402 Lb/Lbmol	
Presión Seudocrítica	: 671,15 Lpca	
Temperatura Seudocrítica	: 373,98 R	
Contenido Líquido (GPM)	: 0,957 Gal/1000 Pcn	
Valor Calorífico Neto	: 988,5 Btu/Pcn	
Valor Calorífico Bruto	: 1093,3 Btu/Pcn	
Viscosidad del Gas	: 0,0106 Centipoise a P y T	
Factor Z del Gas	: 0,9946 a P y T	
%CH <sub>4</sub> /HC	: 87,698	

gas natural es aparentemente derivada directamente de los hidrocarburos no-metanos presentes en el combustible. Es por ello, que grandes variaciones en el contenido de hidrocarburos no metanos (NMHC) en el combustible podrían producir grandes cambios en los resultados de las emisiones (6, 11). Adicionalmente, los estudios de Matthews (10), muestran que la propiedad

más importante del GNC (desde la perspectiva de emisiones) es el %CH<sub>4</sub> /HC puesto que las emisiones de hidrocarburos no metanos tienen una correlación fuerte con el %CH<sub>4</sub>/HC presente en el GNC.

En la presente investigación se utilizó el GNC especificado en la Tabla 2 para los dos primeros equipos de conversión, mientras que para el último equipo se utilizó el

Tabla 3  
Especificaciones del GNC utilizado en el Equipo 3

Composición		
Componentes	Composición (Porcentaje molar)	Contenido líquido
CO <sub>2</sub>	3,51531	0,00000
Nitrógeno	0,47686	0,00000
Metano	85,39742	0,00000
Etano	7,99435	0,00000
Propano	1,86209	0,65363
Isobutano	0,21298	0,08548
N-Butano	0,34771	0,08466
Isopentano	0,05471	0,04515
N-Pentano	0,09123	0,05335
Isohexano	0,02318	0,01073
N-Hexano	0,02416	0,01183
Características		
Gravedad Específica	: 0,6587 (Aire = 1.0)	
Peso Molecular	: 19,078 Lb/Lbmol	
Presión Seudocrítica	: 671,34 Lpca	
Temperatura Seudocrítica	: 370,46 R	
Contenido Líquido (GPM)	: 0,761 Gal/1000 Pcn	
Valor Calorífico Neto	: 973,5 Btu/Pcn	
Valor Calorífico Bruto	: 1077,2 Btu/Pcn	
Viscosidad del Gas	: 0,0106 Centipoise a P y T	
Factor Z del Gas	: 0,9973 a P y T	
%CH <sub>4</sub> /HC	: 88,948	

GNC con las especificaciones mostradas en la Tabla 3. Es de hacer notar que en ambos casos el proveedor del GNC fue el mismo.

#### Pruebas preliminares

**Cilindro al vacío:** A los cilindros empleados en el muestreo se les aplicó previamente un vacío, para así garantizar el llenado de la muestra por succión, desde el punto de muestreo seleccionado en el tubo de escape del banco de pruebas hacia el interior de éstos, mediante la apertura de una de las

dos válvulas de las cuales constan dichos cilindros.

Los cilindros que se utilizaron para acumular la muestra fueron de 500 cm<sup>3</sup>, y representaban los de mayor volumen con el cual se contaba para dicho fin, con la finalidad de obtener una muestra lo más representativa posible de los contaminantes gaseosos.

El buen estado de los cilindros fue verificado previamente, para así garantizar la buena recolección de las muestras.

**Pruebas en el banco:** Se verificó detenidamente el estado técnico y los índices de ajuste del motor. Antes de la medición de los parámetros que caracterizan el funcionamiento del motor y los componentes tóxicos de los gases de escape, para cada uno de los combustibles empleados se realizó un diagnóstico para garantizar el buen funcionamiento del motor, y para ello se empleó el analizador de motor de la marca ALLEN, trabajando mediante una prueba secuencial.

Posteriormente, se procedió a determinar el valor del coeficiente de exceso de aire ( $\lambda$ ) para cada combustible, empleando el módulo analizador de gases OTC, el cual permite determinar el coeficiente para tres tipos de combustibles: gasolina, metano y propano. En este caso el equipo fue utilizado para determinar  $\lambda$  para la gasolina y para el GNC utilizando los valores obtenidos para los componentes ( $\text{CO}_2$ , CO y HC). El valor del coeficiente se calculó empleando ecuaciones apropiadas para el GNC.

Los valores del coeficiente de exceso de aire utilizados en los ensayos tenían los valores  $\lambda_{\text{gasol}} = 1,07$  y  $\lambda_{\text{gas}} = 1,4$ . Debe destacarse que el coeficiente de exceso de aire define la composición de la mezcla y es conocida la considerable influencia de ésta en la formación de los componentes tóxicos de los productos de combustión. Por lo antes expuesto,

esta variable es fijada previamente a la realización del ensayo para cada combustible.

### Procedimiento de muestreo

Para la realización del ensayo se siguió la metodología propuesta en la norma GOST 17.2.2.03-87, para efectuar mediciones de las composiciones en los gases de escape de los vehículos con motores a gasolina, tanto nuevos como usados (9).

Las diferencia existente en el presente ensayo con la norma antes mencionada estriba en que se realizan la medición no solo para dos velocidades de rotación del motor, es decir, en ralentí mínimo y ralentí alto (de 2000 a 0.8 velocidad de rotación nominal), sino que se incorpora la medición a 1500 rpm.

Se efectuaron tres ensayos para cada uno de los combustibles utilizados y equipos de conversión. Los resultados promedios de estos ensayos se muestran en la Tabla 4.

### Resultados y Discusión

A continuación se muestran los resultados de las concentraciones de los componentes hidrocarburos de los gases de escape para las diferentes velocidades de rotación del motor, y para los diferentes combustibles. Es importante destacar que los niveles de hidrocarburos presentes en las emisio-

Tabla 4

Concentraciones promedio de hidrocarburos en % molar, obtenidas en las diferentes velocidades de rotación, empleando gasolina o gas natural comprimido como combustible

C o m p. (%M)	Velocidad de Rotación del Motor (r.p.m.)											
	Gasolina			Gas Natural Comprimido								
	Vacío	2000	2500	Equipo 1			Equipo 2			Equipo 3		
	Vacío	1500	2500	Vacío	1500	2500	Vacío	1500	2500	Vacío	1500	2500
C1	3,161	0,683	0,086	0,066	0,061	0,051	0,071	0,060	0,057	0,071	0,061	0,028
C2	1,944	0,177	0,018	0,042	0,040	0,018	0,043	0,049	0,035	0,014	0,007	0,004
C3	0,386	0,051	-	0,008	-	-	0,010	-	-	-	-	-
i-C4	0,061	0,008	-	0,002	-	-	0,001	-	-	-	-	-
n-C4	0,073	0,013	-	0,003	-	-	0,003	-	-	-	-	-



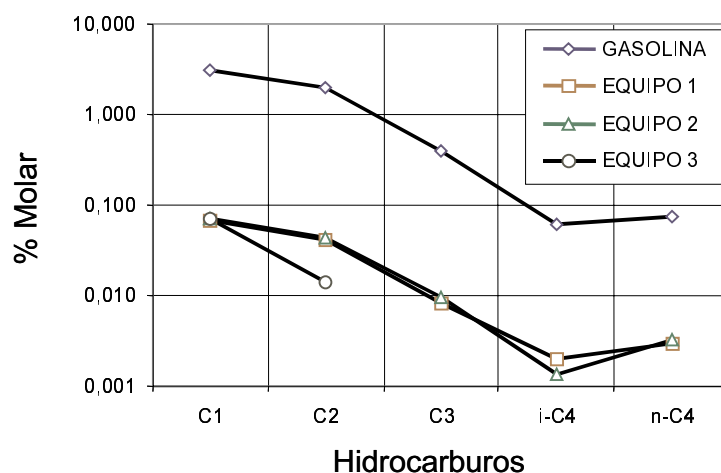


Figura 1. Concentraciones de hidrocarburos obtenidas en vacío, empleando gasolina o gas natural comprimido como combustible.

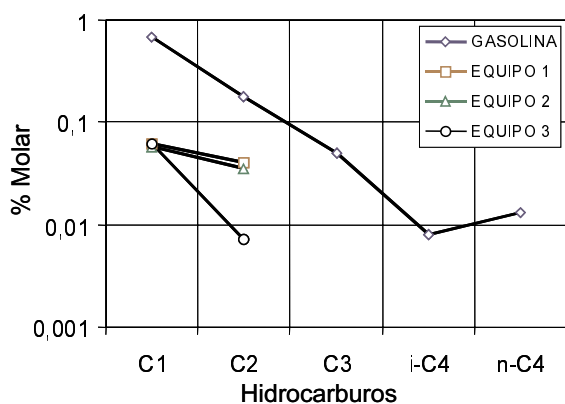


Figura 2. Concentraciones de hidrocarburos obtenidas a 1500 rpm, empleando gasolina o gas natural comprimido como combustible.

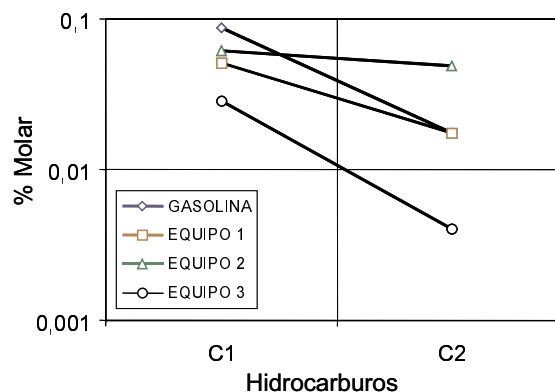


Figura 3. Concentraciones de hidrocarburos obtenidas a 2500 rpm, empleando gasolina o gas natural comprimido como combustible.

nes de los gases de escape son el resultado de elementos presentes en la mezcla aire-combustible que no han logrado completar su combustión, para el tiempo en el cual la válvula de escape permanece abierta. Con la finalidad de analizar estos resultados se realizaron comparaciones entre los diferentes equipos de conversión utilizados y la gasolina; esta comparación se realizó para cada componente hidrocarburo y velocidad de rotación. Los valores considerados para el análisis comparativo con la gasolina, son

aquellos que corresponden al motor antes de ser convertido.

En la Tabla 4 se observan las concentraciones promedio de hidrocarburos en porcentaje molar, obtenidas de los gases de escape para gasolina y gas natural, en las diferentes velocidades de rotación. Así mismo, en las Figuras 1, 2 y 3 se muestran detalladamente las concentraciones promedio de hidrocarburos para cada una de las velocidades de rotación del motor. Es importante destacar que no existe diferencia significati-

va entre las concentraciones para cada una de las velocidades de rotación, entre los diferentes ensayos (para un  $\alpha = 0.05$ ).

En general, puede apreciarse que existe variación tanto cualitativa como cuantitativa entre los componentes, hidrocarburos que aparecen durante las diferentes velocidades de rotación del motor. Se observa que a mayor velocidad de rotación menor es la aparición cuantitativa y cualitativa de los componentes hidrocarbonados.

Tal como se observa en la Tabla 4 y en las Figuras 1, 2 y 3 los mayores valores de emisiones de hidrocarburos se encuentran cuando se utiliza gasolina como combustible, independientemente de la velocidad de rotación del motor y del equipo de conversión empleado. Así mismo, es posible apreciar que para todos los casos las emisiones de metano empleando GNC como combustible son menores comparadas con las obtenidas al utilizar la gasolina. Resultado este que difiere de la afirmación de Weaver (6), en la que señala que "las emisiones totales de HC (incluyendo metano) de un GNC optimizado puede probablemente ser mayor que para los vehículos a gasolina por las relativamente altas emisiones de metano del GNC", así como en los trabajos de Mattheus *et al.* (10) y Wang *et al.* (11) en los que se supone que las emisiones de metano para GNC son mucho mayores que en los vehículos a gasolina.

Los valores de emisiones de hidrocarburos totales (THC) y de los hidrocarburos no metanos (NMHC) muestran la misma tendencia cuando se utilizan los diferentes equipos de conversión, es decir, disminuye su porcentaje a medida que aumenta la velocidad de rotación del motor. Puede observarse, sin embargo, que aunque presentan la misma tendencia, existe una influencia en la composición de las emisiones hidrocarburos dependiendo del tipo de equipo de conversión empleado, ya que existen variaciones en las concentraciones de hidrocarburos presentes en las emisiones, aún cuando los ensayos fueron realizados siguiendo estrictamente la metodología señalada anteriormente. Esta afirmación es válida para los tres tipos de equipos de conversión empleados, aunque debe hacerse notar que en el caso de las emisiones obtenidas para el equipo 3, estas pueden también estar influenciadas por la relativamente diferente composición del GNC empleado, lo cual redundará en un  $\%CH_4/HC$  diferente. El equipo 3 presenta un mejor comportamiento en términos de reducción de las emisiones, pero que presentaba mayor caída de potencia, tal como se reportó en una investigación realizada posteriores (12).

En la Tabla 5 puede observarse el porcentaje promedio de reducción de la concentración de hidrocarburos al emplear GNC como combustible, en comparación con la

Tabla 5  
Porcentaje de disminución de HC de los equipos de conversión comparado con gasolina

C o m p.	% Disminución HC para cada velocidad de rotación								
	Vacío			1500 rpm			2500 rpm		
	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3
C1	97,912	97,754	97,754	91,069	91,215	91,069	40,698	33,721	67,442
C2	97,840	97,788	99,280	77,401	72,316	96,045	0	-94,444	77,778
C3	97,924	97,409	100	100	100	100	100	100	100
i-C4	96,721	98,361	100	100	100	100	100	100	100
n-C4	95,890	95,890	100	100	100	100	100	100	100

gasolina, para diferentes velocidades de rotación y equipos distintos de conversión.

Al analizar la Tabla 5 se puede confirmar la disminución del metano al emplear GNC en comparación con la gasolina, obteniéndose un porcentaje promedio de aproximadamente 97,8% cuando el motor funciona en vacío, de 91,1% a 1500 rpm y de 47,3% a 2500 rpm.

Si se analiza el porcentaje promedio de reducción de las emisiones de NMHC para cada equipo de conversión, comparado con la gasolina, es posible observar que para el equipo 1 este representa aproximadamente un 58,17%, para el equipo 2 es de aproximadamente un 25,08% y para el equipo 3 es de aproximadamente 91,03%.

Adicionalmente, tanto en la Tabla 5 como en la Figura 3 puede apreciarse que el porcentaje de disminución de las emisiones de NMHC para una velocidad de rotación del motor de 2500 rpm es negativo, ya que solo fue detectado el etano y con una concentración de aproximadamente el doble de la exhibida por la gasolina. Debe destacarse que el equipo 2 es el que presenta un beneficio menor, en cuanto a disminución de las emisiones, pero es el equipo que presenta una reducción de potencia menor, ya que funciona con una alimentación rica. Sin embargo, los valores generales de emisiones presentados por este equipo son ventajosos para la disminución de contaminación ambiental.

### Conclusiones

1. El uso del GNC como combustible alternativo hace posible una reducción significativa en las emisiones comparados con la gasolina, demostrando así beneficios sustanciales en el proceso de minimización de la contaminación atmosférica.

2. La concentración de los hidrocarburos totales e hidrocarburos no metanos de vehículos operando con GNC son mucho más bajas en comparación con dichas emisiones si se trabaja con gasolina como combustible.

3. La concentración de metano en las emisiones de los gases de escape para vehículos a GNC resultan menores, para todos los equipos de conversión estudiados y para todas las velocidades de rotación del motor, en comparación con las concentraciones obtenidas al utilizar gasolina. Discrepando de esta manera con las suposiciones teóricas encontradas.

4. La mayor concentración de hidrocarburos se encuentra en vacío y a medida que aumenta la velocidad de rotación del motor estas concentraciones disminuyen, así como la aparición de menor número de hidrocarburos en las emisiones. Al mismo tiempo se aprecia que la concentración del metano, aunque baja, alcanza su valor máximo en vacío.

6. El Equipo 3 presenta los mayores beneficios, en términos de reducción de emisiones hidrocarburos, seguido por el Equipo 1 y por último el Equipo 2.

### Agradecimiento

Agradecemos el apoyo del Laboratorio de Cromatografía de Gases del Instituto de Investigaciones Petroleras de La Universidad del Zulia (INPELUZ).

### Referencias Bibliográficas

1. MUÑOZ M., PAYRI F. *Motores de combustión interna alternativos*, Tercera edición, Sección de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales, Fundación general-U.P.M., Madrid (España), 1995.
2. SCHUERMAN D., LIES K., KLINGENBERG H. *Unregulated Motor Vehicle Exhaust Gas Components*, Publicación de SAE, N° 902116, 1990.
3. MACHADO A., GARCIA N., PRZYBYLSKI J., MONTIEL V. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería* 22(2): 128-138, 1999.
4. PATRAKHALTSEU N., GORBUNOV V. *Toxicidad de los motores de combustión interna*, Segunda edición, Escuela Profesio-

- nal de Ingeniería Mecánica Eléctrica-UNAS, Arequipa (Perú), 1994.
5. WESTERHOLM R., CHRISTENSEN A., ROSEN A. **Atmospheric Environment** 30(20): 3529-3536, 1996.
  6. WEAVER C. **Journal of Fuels and Lubricants**. Section 4, Volume 98. Publicación No. 892133, p. 1190-1210, 1989.
  7. GANDHIDASAN P., ERTAS A., ANDERSON E.J. **Energy Resour Technol Trans ASME** 113(2): 101-107, 1991.
  8. FRITZ S., EGBUONU R. **Emissions from Heavy-Duty Trucks Converted to Compressed Natural Gas**, Publicación SAE, No. 932950, 1993.
  9. MATTHEUS R., CHIO J., ZHENG J., WU D., DARDALIS D., SHEN K., ROBERTS C., HALL M., ELLZEY L. **The Texas Project: Part 1 - Emission and Fuel Economy of Aftermarket CNG and LPG Conversions of Light-Duty Vehicles**. N° 962098, (Topic in Alternative Fuels and Their Emissions). Publicación de SAE, 1996.
  10. MATTHEUS R., CHIU J., HIDDEN D. **CNG Compositions in Texas and the Effects of Composition on Emissions, Fuel Economy, and Driveability of NGVs**. N° 962097, (Topics in Alternative Fuels and Their Emissions). Publicación SAE, 1996.
  11. WANG W., GAUTAM M., SUN X. **Emissions Comparisons of Twenty-Six Heavy-Duty Vehicles Operated on Conventional and Alternative Fuels**. N° 932952 (Truck Alternative Fuels and Exhaust Gas Emissions). Publication SAE, 1993.
  12. MACHADO A., GARCIA N., PRZYBYLSKI J., MONTIEL V. Resultados no publicados.