

## **Influence of conversion system on the exhaust gases emissions from vehicles fueled with gasoline or CNG**

**Anali Machado, Neyma García, Józef Przybylski y Vidal Montiel**

Centro CEDEGAS, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Apartado postal 526  
Maracaibo 4001-A, Venezuela. E-mail: amachado@luz.ve

### **Abstract**

Natural gas is considered an excellent alternative fuel when compare to gasoline. To convert internal combustion engines from gasoline to natural gas, a fuel supply system with a gas pressure reducer-regulator is required. Manufacturers have designed and built this equipment with different characteristics.

The goal of this research work is to find out how the exhaust emissions from natural gas fueled engines are affected by the conversion system. Besides, the emissions levels are measured to be compared against regulations. The toxic components studied are HC, CO, CO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub>.

The results show that the conversion equipment has a remarkable influence on the levels of toxicity. It is also showed that using GNC instead of gasoline ever reduces the exhaust of emissions no matter the conversion unit tested.

**Key words:** Toxicity, CNG, internal combustion engines, conversion equipment, engine exhaust.

## **Influencia del equipo de conversión en las emisiones tóxicas de los gases de escape de los vehículos automotores que utilizan gasolina o GNC como combustible**

### **Resumen**

El gas natural es considerado un excelente combustible alternativo a la gasolina. Para la conversión de los motores de combustión interna, de gasolina a gas natural se emplea un sistema de alimentación, el cual presenta como equipo principal un reductor-regulador de la presión del gas. Estos equipos son contruidos con características que los hacen diferentes entre sí.

El objetivo de esta investigación es determinar la influencia del equipo de conversión en las emisiones tóxicas de los gases de escape de los vehículos alimentados con GNC, comparando así los componentes tóxicos con los niveles permitidos por los reglamentos o normativas existentes. Los componentes tóxicos a estudiar son aquellos, reglamentados a nivel mundial, es decir, HC, CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

Los resultados obtenidos permiten constatar como el tipo de equipo de conversión influye en los componentes tóxicos de los gases de escape. Así mismo, es importante destacar que indiferentemente del equipo de conversión estudiado siempre existe una disminución de los componentes tóxicos en comparación con el empleo de gasolina como combustible.

**Palabras clave:** Toxicidad, GNC, motores de combustión interna, equipos de conversión, emisiones del motor.

## Introducción

Desde su aparición a finales del siglo pasado, el motor térmico de combustión interna alternativo, ha tenido que superar una serie de problemas y nuevas exigencias, que con el paso del tiempo se han presentado. Una de los condicionantes más importantes actualmente es sin duda la emisión de contaminantes.

Aunque la evaluación cuantitativa de cada una de las fuentes de emisión de componentes contaminantes es muy difícil y los datos resultan contradictorios, puede afirmarse en principio, que los vehículos automotores son responsables de un 10-15% de la contaminación atmosférica [1], dependiendo siempre del grado de motorización del país, ya que en las zonas por las que circulan cientos de miles de vehículos por día se dan situaciones de contaminación de aire que alcanzan valores críticos para la salud humana y el ambiente. Es importante puntualizar que los vehículos automotores representan la mayor fuente individual de emisiones poluentes y por consiguiente su grado de contribución a la contaminación atmosférica se considera relevante.

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 en numerosos países, mayor que el de cualquier otra fuente individual de tipo estacionario. Es así como en los países industrializados las inversiones en la protección del medio ambiente se evalúan en cerca del 5% del producto bruto interno. Estos países cuentan con regulaciones estrictas para los componentes de los gases de escape.

El estado de desarrollo tecnológico alcanzado en equipos para el control de emisiones para fuentes móviles utilizando gasolina con o sin plomo no es del todo satisfactorio. Debido a ello los grandes esfuerzos realizados hacia el desarrollo de actividades no convencionales para la disminución de la contaminación, como lo son la reformulación de gasolina, el prediseño de elementos del motor de combustión interna, la utilización de catalizadores y/o sonda lambda y sobretodo el empleo de combustibles alternos.

El gas natural comprimido (GNC), representa un excelente combustible alternativo a la gaso-

lina por sus recursos abundantes, bajo costo, combustión limpia, la existencia de sistemas de transporte y distribución del gas natural y más bajas emisiones contaminantes [2].

En Venezuela, los sistemas de conversión de gasolina a gas natural juegan un papel muy importante dentro de la economía del país, proporcionando ingresos adicionales de divisas a la nación producto de la exportación de volúmenes de gasolina liberados o no consumidos en el mercado interno. Esta sustitución de combustible es factible debido a las grandes reservas de gas natural que posee el país, difícilmente exportable en su condición natural y fácilmente distribuido en el mercado interno a través de redes de tuberías hasta las estaciones de servicio en las principales ciudades y zonas industriales. En relación a la contaminación el transporte urbano en el área metropolitana produce una injerencia negativa por la utilización de combustible con alto nivel de toxicidad en sus emisiones. Luego, por lo antes expuesto, se puede concluir que el GNC como combustible alternativo a la gasolina representa una alternativa para nuestro país.

Para el empleo del GNC como combustible en los vehículos automotores, uno de los elementos fundamentales es el reductor-regulador de presión que forma parte principal del equipo de conversión. Diferentes fabricantes se han dado a la tarea de diseñar y construir equipos de conversión para motores, en los cuales los diseños y particularidades del reductor-regulador de presión como elemento fundamental de dichos equipos, conllevan a exhibir claras diferencias entre sí.

El propósito de esta investigación es determinar la influencia del tipo de equipo de conversión en las emisiones tóxicas de los gases de escape de los vehículos alimentados con gasolina o con gas natural comprimido. Los componentes de los gases de escape a estudiar son aquellos que se encuentran reglamentados por las normativas internacionales [3], es decir, monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (HC), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

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

## Metodología

### Descripción del banco de pruebas

El banco de pruebas está constituido por un conjunto de equipos e instrumentos que se utilizan para la medición o evaluación experimental, en 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 equipos 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, carrera del pistón de 76.2 mm, y diámetro de cilindro de 101.6 mm, cilindrada 4942 cm<sup>3</sup>, potencia máxima (nominal) de 130 hp;
- un dinamómetro hidráulico CLAYTON, modelo CAM 250 (186 kW), entre 2200 y 8000 rpm; velocidad máxima de rotación de 8000 rpm; posee indicadores digitales 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 esta última también existe 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, que representa el reductor principal o secundario. 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 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;

- 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). Este equipo cuenta además con un módulo de análisis de los gases de escape OTC, el cual permite determinar, las concentraciones de CO, HC, CO<sub>2</sub>, NOx y O<sub>2</sub> presentes en el mismo. El CO, CO<sub>2</sub> y el HC se miden mediante un analizador infrarrojo no dispersivo (NDIR), mientras que tanto para el O<sub>2</sub> como los NOx se emplea un análisis que hace uso de una reacción electroquímica en electrodos selectivos adecuados al poluyente específicos. En el caso del O<sub>2</sub> se emplean celdas R-22A. El equipo permite también 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. La gasolina que se empleó para la investigación es de 91 ROM, contenido de sulfuro por debajo de 20ppm y su composición se observa en la Tabla 1. La importancia de la composición de la gasolina (principalmente en la cantidad de sulfuro), para la composición de los gases de escape es puesta de manifiesto en las investigaciones de Mattheus [4].
- Cilindro de acero de la marca "Dalmine", de 80 dm<sup>3</sup>, para el suministro del GNC al banco de pruebas. La composición del GNC utilizado en las ensayos se muestran en las Tablas 2 y 3; y su importancia radica en la influencia que tiene en los componentes de los gases de escape [5, 6].

Tabla 1  
Especificaciones de la Gasolina de 91 Octanos

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	

### Pruebas preliminares

Primeramente, se somete el motor a funcionamiento, de acuerdo con las indicaciones de la fábrica para el buen funcionamiento en el banco de prueba de motor. Se verifican detenidamente el estado técnico y los índices de ajuste del motor. Antes de la medición de los parámetros que caracterizan al motor y los componentes tóxicos de los gases de escape, para cada uno de los combustibles empleados debe realizarse un diagnóstico que garantice el buen estado del motor, y para ello se emplea el analizador de motor ALLEN, trabajando mediante una prueba secuencial.

Posteriormente, se procede a fijar 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. El equipo fue utilizado para determinar  $\lambda$  para la gasolina y para el GNC con

los valores obtenidos de los componentes ( $\text{CO}_2$ , CO y HC), se calculo el valor del coeficiente, empleando ecuaciones apropiadas para el GNC.

Los valores del coeficiente de exceso de aire utilizados en los ensayos fueron  $\lambda_{\text{gasol}} = 1.07$  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 con el analizador OTC

Para la realización del ensayo se sigue la norma GOST 17.2.2.03-87, para efectuar mediciones de las composiciones en los gases de escape de los automóviles con motores a gasolina, tanto nuevos como usados [7]. Los contenidos límites admisibles de CO y HC se determinan en

Tabla 2  
Especificaciones del GNC

Composición		
Componentes	Composición (Porcentaje Molar)	Contenido líquido
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 Pen
Valor Calorífico Neto	: 988.5 Btu/Pen
Valor Calorífico Bruto	: 1093.3 Btu/Pen
Viscosidad del Gas	: 0.0106 Centipoise a Py T
Factor Z del Gas	0.9946 a P y T
%CH <sub>4</sub> /HC	87.698

esta norma con el motor funcionando en vacío, para dos valores de la frecuencia de rotación del cigüeñal; ralenti mínimo y ralenti alto (de 2000 a 0.8 velocidad de rotación nominal). Las diferencias existentes en el ensayo con el método antes mencionado son la incorporación adicional de tres velocidades de rotación del cigüeñal del motor para la medición de los contaminantes: 1000, 1500, y 2000 rpm; la otra diferencia radica en la medición no sólo de CO y HC, sino también de NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>.

Los experimentos se efectuaron siguiendo un Diseño de Experimento con un Solo Factor, específicamente el modelo de Efectos Fijos [8].

## Resultados

A continuación se muestran los resultados de las concentraciones de los componentes regulados de los gases de escape para las diferentes velocidades de rotación del motor, y para los diferentes combustibles. A fin de analizar estos resultados se realizaron comparaciones entre los diferentes equipos de conversión utilizados y la

Tabla 3  
Especificaciones del GNC

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 Py T	
%CH <sub>4</sub> /HC	88.948	
Factor Z del Gas	0.9973 a P y T	

gasolina para cada componente tóxico y velocidad de rotación. Los valores de los componentes tóxicos considerados para la gasolina, son aquellos que corresponden al motor antes de ser convertido, es decir, sin la instalación del mezclador aire-gas, ya que aunque los valores de componentes tóxicos varían cuando se incorpora el mezclador, no existe diferencia significativa (para un  $\alpha = 0.05$ ) entre los resultados de contaminantes con y sin el mezclador aire-gas.

#### Concentración de monóxido de carbono (CO)

En la Tabla 4 se presentan las concentraciones promedio obtenidas por el CO a diferentes

velocidades de rotación del motor, para cada uno de los equipos de conversión empleados trabajando con GNC como cuando se utiliza gasolina como combustible. Se muestra la importante reducción de emisiones (expresada en tanto por ciento), que se experimenta al emplear un combustible limpio representado por el GNC en comparación con la gasolina.

Puede observarse que independientemente del tipo de equipo de conversión empleado y de la presencia o no del mezclador aire-gas, los niveles de CO cuando se utiliza gasolina resultan más elevados. Adicionalmente, puede apreciarse que la concentración de CO alcanza un máximo durante la marcha en vacío.

Tabla 4  
Porcentaje de disminución de CO de los equipos de conversión comparado con gasolina

Velocidad de rotación (r.p.m)	Concentración promedio de CO (%v)				% Disminución CO			% promedio de reducción por velocidad
	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Gasolina	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	
Vacio	0.04	0.37	0.18	0.15	73.33	-146.67	-20	-31.11
1000	0.03	0.18	0.055	0.155	80.65	-66.13	64.52	26.35
1500	0.03	0.085	0.05	0.145	79.31	41.38	65.52	62.07
2000	0.035	0.065	0.08	0.14	75	53.57	42.86	57.14
2500	0.035	0.06	0.08	0.13	73.08	53.85	38.46	55.13
% reducción por Equipo			-		<b>76.27</b>	<b>-12.8</b>	<b>38.27</b>	-
% Total			-			-		<b>33.92</b>

Al considerar la actuación individual de cada equipo de conversión son notables los siguientes resultados:

1. El equipo 2 exhibe una mayor concentración de CO para la casi totalidad de las condiciones de trabajo; comportamiento explicable sobre la base de que opera con una regulación rica a fin de obtener una menor disminución de la potencia del motor en comparación con la gasolina.
2. En todas las condiciones de trabajo, el equipo 1 exhibió los niveles más bajos de CO y el rango de reducción de concentraciones más constante y con menor variabilidad (entre un 73.08 y 80.65%).

Realizando un análisis estadístico entre los diferentes equipos de conversión de gasolina a GNC se obtiene que existe una diferencia significativa a 2000 y 2500 rpm (para un  $\alpha = 0.05$ ).

El CO juega un importante papel en la destrucción de los radicales  $\text{OH}^\cdot$  en la atmósfera; así, una reducción en las emisiones de CO debido al uso de GNC incrementaría los iones de este radical y ayudaría a: (1) incrementar la tasa global de descomposición del metano, lo cual podría compensar el pequeño incremento en emisiones directas de  $\text{CH}_4$  provenientes del uso de GNC [9]; (2) reducir la tasa de conversión de  $\text{SO}_2$  a ácido sulfúrico, puesto que el proceso primario de conversión del  $\text{SO}_2$  requiere peróxido de Hidrógeno y el CO juega un gran papel en la producción de este en la atmósfera [9].

### Concentración de hidrocarburos totales (HC)

En la Tabla 5 se muestran las concentraciones promedio de HC para cada uno de los equipos de conversión empleados, bajo diferentes velocidades de rotación, así como también cuando se emplea gasolina como combustible. Así mismo, puede observarse el porcentaje de reducción de la concentración de hidrocarburos totales (HC) al emplear GNC como combustible, en comparación con la gasolina, igualmente se muestra el porcentaje de reducción que se obtiene con cada uno de los equipos de conversión, y en cada una de las velocidades de rotación del motor.

Puede observarse que independientemente del tipo de equipo de conversión empleado los niveles de HC cuando se utiliza gasolina resultan más elevados en el 100% del rango de velocidad de rotación considerado.

Se aprecia en los valores de las concentraciones promedio de HC alcanzan un máximo a bajas velocidades de rotación del motor. Este resultado era de esperarse, ya que se sabe que la proporción de hidrocarburos en los gases de escape aumenta con la estrangulación en la admisión, o cuando el motor funciona en vacío. En estos casos empeora la turbulencia de la carga, disminuye la velocidad de la combustión, se dificulta la inflamación y, por lo tanto, se observa mayores emisiones de hidrocarburos.

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

Velocidad de rotación (r.p.m)	Concentración promedio de HC (%v)				% Disminución HC			% promedio de reducción por velocidad
	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Gasolina	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	
Vacío	48.5	54	59.5	240.5	79.83	77.55	75.26	77.55
1000	44	39	54	176	75	77.84	69.32	74.05
1500	41.5	29.5	45	82	49.39	64.02	45.12	52.84
2000	41	31.5	45	78.5	47.77	59.87	42.68	50.11
2500	34.5	29.5	44.5	76	54.61	61.18	41.45	52.41
% reducción por Equipo			-		<b>61.32</b>	<b>68.09</b>	<b>54.77</b>	-
% Total			-					<b>61.39</b>

Tabla 6  
Porcentaje de disminución de CO<sub>2</sub> de los equipos de conversión comparado con gasolina

Velocidad de rotación (r.p.m)	Concentración promedio de CO <sub>2</sub> (%v)				% Disminución CO <sub>2</sub>			% promedio de reducción por velocidad
	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Gasolina	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	
Vacío	9.15	10.10	8.15	10.40	12.02	2.88	21.63	12.18
1000	8.40	10.00	8.65	9.75	13.85	-2.56	11.28	7.53
1500	8.15	10.00	9.25	10.60	23.11	5.66	12.74	13.84
2000	8.30	9.75	10.35	10.95	24.20	10.96	5.48	13.55
2500	8.45	9.55	10.05	11.85	28.69	19.41	15.19	21.10
% Equipo			-		<b>20.35</b>	<b>7.27</b>	<b>13.26</b>	-
% Total			-					<b>13.64</b>

Del análisis estadístico entre los diferentes equipos de conversión de gasolina a GNC se obtiene que existe diferencia significativa (con  $\alpha = 0.05$ ) entre las concentraciones de hidrocarburos totales para las velocidades de rotación del motor de 2000 y 2500 rpm.

### Concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

En la Tabla 6 se observan las concentraciones promedio de dióxido de carbono para cada uno de los equipos de conversión empleados, para diferentes velocidades de rotación y cuando se emplea gasolina como combustible. Adicionalmente, se muestra el porcentaje de reducción de la concentración de CO<sub>2</sub> al emplear GNC como combustible en comparación con la gasolina, así

mismo el porcentaje promedio de reducción para cada uno de los equipos de conversión y para cada velocidad de rotación del motor estudiada.

Para cada uno de los equipos estudiados, el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> derivados del empleo de GNC resultó menor (aunque en grado moderado) a aquel obtenido por la gasolina a las diferentes velocidades de rotación del motor; comportamiento esperado en virtud de que el gas natural contiene menos carbono que cualquier otro combustible fósil.

Por otra parte, el equipo 1 exhibió el mayor porcentaje de reducción promedio en las concentraciones del poluyente y una aparente correlación directa entre el porcentaje removido y la velocidad de rotación, a diferencia de los ocurrido con los otros dos equipos en los cuales se obtu-

Tabla 7  
Porcentaje de disminución de NOx de los equipos de conversión comparado con gasolina

Velocidad de rotación (r.p.m)	Concentración promedio de Nox (%v)				% Disminución Nox			% promedio de reducción por velocidad
	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	Gasolina	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3	
Vacío	33.50	46.00	35.50	120.00	72.08	61.67	70.42	68.06
1000	31.50	60.00	35.50	81.00	61.11	25.93	56.17	47.74
1500	37.00	51.50	87.50	97.00	61.85	46.91	9.79	39.52
2000	83.00	104.00	167.00	95.50	13.09	-8.90	-74.87	-23.56
2500	246.00	139.00	189.50	170.00	-44.71	18.24	-11.47	-12.65
% reducción por Equipo					<b>32.68</b>	<b>28.77</b>	<b>10.01</b>	
% Total								<b>23.82</b>

vieron menores reducciones promedios y con un patrón desordenado para las diferentes condiciones de trabajo.

Numerosos autores han expresado reservas concernientes al uso del gas natural para vehículos referido a su potencial para acelerar el calentamiento global, debido a la gran influencia del CH<sub>4</sub> como gas "invernadero"; así puede afirmarse que la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> cuando se emplea gas natural puesta de manifiesto en este estudio, contribuye al balance o compensación del CH<sub>4</sub> indudablemente emitido cuando se trabaja con gas natural cuyo componente principal es el metano.

Del análisis estadístico se desprende que existe diferencia significativa sólo en vacío con  $\alpha = 0.05$  entre los diferentes equipos de conversión de gasolina a GNC.

### Concentración de óxidos de nitrógeno (NOx)

En la Tabla 7 se pueden observar las concentraciones de NOx para cada uno de los equipos de conversión empleados, bajo diferentes velocidades de rotación del motor, así como también cuando se emplea gasolina como combustible. Adicionalmente, se observa el porcentaje de reducción de la concentración de NOx al emplear GNC como combustible en comparación con la gasolina, así como para cada equipo de conversión y velocidad de rotación del motor estudiada.

Los gases de óxidos de nitrógeno en el motor son formados durante la combustión a altas temperaturas y presión por la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno del aire de entrada y por la oxidación de derivados de nitrógeno contenido en los componentes del combustible. Las altas temperaturas tienen una gran influencia en la formación de óxidos de nitrógeno; pero en un motor de encendido por chispa el valor máximo de la concentración de NOx no se encuentra para un coeficiente de exceso de aire con máxima temperatura de combustión, sino que se halla en la zona de mezclas pobres, ya que en la formación de NOx se requiere tanto de una temperatura elevada como de una concentración suficiente de oxígeno. Luego, puede afirmarse que la velocidad de formación de los NOx es una función del oxígeno disponible y es exponencialmente dependiente de la temperatura de llama y el tiempo de permanencia a esa temperatura, y por consiguiente dichos factores tienen gran significado en la determinación de las emisiones de este contaminante [9].

En el caso que nos ocupa, se trabajó con una mezcla "pobre", es decir, con un  $\lambda > 1$  (exceso de aire que diluye los reactantes), lo cual reduce tanto la velocidad de propagación como la temperatura de la llama, lo que conlleva a una inadecuada variabilidad en la combustión [9] (mayor de lo esperado), efecto que podría explicar la variabilidad en los valores obtenidos; así como la alta influencia que tiene la temperatura en la medida que se aumenta la velocidad de rotación del motor, es decir, cuanto más intensa es la acelera-

ción y la temperatura en el mismo se incrementa, la concentración de NOx presente en las emisiones de los gases de escape se eleva. Esta tendencia o patrón puede más o menos apreciarse en los resultados obtenidos.

La utilización del GNC como combustible automotor no reduce en todos los casos estudiados las emisiones de NOx en comparación con la gasolina, de hecho en varias pruebas supero significativamente el valor obtenido cuando se emplea la gasolina, resultado que concuerda con los obtenidos por Fritz [10].

Del análisis estadístico se obtiene que existe diferencia significativa (con  $\alpha = 0.05$ ) entre las concentraciones de óxidos de nitrógenos para las velocidades de rotación del motor de 2000 y 2500 rpm.

### Conclusiones

Al observar la composición final de los gases de escape para los diferentes equipos de conversión a gas natural estudiados, es indudable la contribución de los vehículos automotores empleando GNC a los problemas de emisión de poluentes en atmósfera urbanas, ya que su emisión es sensiblemente menor que aquella derivada del uso de la gasolina.

A pesar de que las concentraciones resultantes para cada uno de los contaminantes regulados y expresados como Volumen de soluto o poluente / Volumen de solución o gas total de escape, resultaron muy por debajo de los valores límites de emisión permisibles en normativas internacionales, no hay que olvidar el hecho de que el automóvil constituye la fuente simple de emisiones atmosféricas más numerosa y con una creciente demanda a nivel mundial. Por lo antes expuesto, la carga de polución total (medida en masa de los diferentes poluentes/ unidad de tiempo o distancia), eventualmente puede llegar a ser significativa. Por lo que es conveniente realizar las comparaciones trabajando de tal forma que los indicadores de las emisiones tomen en cuenta la carga poluente.

La concentración de CO es 33.92% menor al utilizar GNC, comparada con la gasolina. Los valores de la concentración de CO no exceden en ningún caso los reglamentados.

El Equipo 2 presenta mayor concentración de CO que los demás equipos de conversión estudiados. Esto se debe a que tiene una regulación rica, para obtener una menor reducción de la potencia en comparación con la gasolina.

Los porcentajes de reducción de la concentración de CO comparado con la gasolina varían significativamente dependiendo del tipo de equipo de conversión utilizado, siendo el este porcentaje mayor para el equipo 1 y desfavorable para el equipo 2, debido a su alta concentración en vacío y a 1000 rpm.

La concentraciones de los hidrocarburos totales cuando se opera con GNC son mucho más bajas en comparación con dichas emisiones si se trabaja con gasolina como combustible. La reducción en los hidrocarburos es de un 61.39%. El rango de reducción promedio de los componentes tóxicos dependiendo del equipo de conversión se encuentra entre 54.77 y 68.09%. Adicionalmente se observa que a medida que la temperatura y la velocidad de rotación del motor aumentan, las concentraciones de HC se incrementan paulatinamente.

Las concentraciones en las emisiones obtenidas con el equipo 3 no son solo influenciadas por las características propias del equipo, sino debe considerarse que para el mismo se utilizó un GNC de composición diferente (Tabla 3) a la utilizada para los otros, teniendo un %CH<sub>4</sub> / HC de 88.95 y teniendo pequeños cambios en este porcentaje una influencia en las emisiones de los hidrocarburos.

La concentración de CO<sub>2</sub> es de un 13.64% menor al utilizar GNC como combustible que cuando se emplea gasolina, y esta reducción varía en un rango del 7.27 al 20.37%.

A medida que se aumenta la velocidad de rotación del motor, cuanto más intensa es la aceleración y la temperatura en el mismo se incrementa, por lo que la concentración de NOx presente en las emisiones de los gases de escape se eleva. Este patrón se observa, aunque no muy claramente en los resultados obtenidos. Esto puede deberse a la gran influencia que tiene la temperatura en la formación de dicho componente tóxico.

### Agradecimiento

Agradecemos el apoyo al Instituto de Investigaciones Petroleras de LUZ (INPELUZ).

### Referencias Bibliográficas

1. MUÑOZ, M. Y 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. 1995.
2. GANDHIDASAN, P.; ERTAS, A. y ANDERSON, E.: "Review of Methanol and Compressed Natural Gas (CNG) as Alternative for Transportation Fuels", J. Energy Resour, Technol. Trans. ASME v. 113 n.2, 1991, p. 101-107.
3. SCHUERMANN, D; LIES, K.H. y KLINGENBERG, H. "Unregulated Motor Vehicle Exhaust Gas Components". Publicación de SAE, N° 902116, 1990.
4. MATTHEUS, R; CHIO, J.; ZHENG, J. y colaboradores: "The Texas Project: Part 1. Emissions 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.
5. MATTHEUS, Ron; CHIU, James y HIDDEN, Daven: "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.
6. WANG, Wenguang; GAUTAM, Mridul; SUN, Xiaobo y colaboradores: "Emissions Comparisons of Twenty-Six Heavy-Duty Vehicles Operated on Conventional and Alternative Fuels". N° 932952 (Truck Alternative Fuels and Exhaust Gas Emissions). Publicación SAE. 1993.
7. PATRAKHALTSEU, Nicolai y GORBUNOV, Victor: "Toxicidad de los motores de combustión interna". Segunda edición, Escuela Profesional de Ingeniería mecánica Eléctrica UNAS, Arequipa, Perú. 1994.
8. MONTGOMERY, Douglas: "Diseño y Análisis de Experimentos". Grupo Editorial Iberoamérica, Estados Unidos, 1991.
9. WEAVER, Christopher S.: "Natural Gas Vehicles. A Review of the State of the Art. N° 932952" (Truck Alternative Fuels and Exhaust Gas Emissions), N° 892133. Publicación SAE. 1989.
10. FRITZ Steven G. y EGBUONU Ralph I.: "Emissions from Heavy-Duty Trucks Converted to compressed Natural Gas". N° 932950. Publicación SAE. 1993.

Recibido el 15 de Diciembre de 1998

En forma revisada el 23 de Mayo de 1999