

# Análisis comparativo de motores convencionales y convertidos a gas utilizados en transporte público funcionando a grandes alturas

Lesme A. Corredor\*, J.R. Agudelo\*\*, Jaime E. Torres\*\*\*

## Resumen

Este artículo, continuación de otro publicado en el «Segundo Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente», realizado en abril de 1999 en Cienfuegos (Cuba), presenta la metodología seguida y los resultados obtenidos durante los ensayos de una serie de vehículos con motor de encendido por chispa, utilizando combustible convencional, GLP y GNC, los cuales tenían como objeto la evaluación del desempeño mecánico y ambiental de los mismos en la capital colombiana (Santafé de Bogotá, 2600 msnm). El Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), organismo gubernamental encargado de la gestión ambiental en Santafé de Bogotá, ha promovido el desarrollo de este estudio como una búsqueda de opciones válidas para disminuir la contaminación atmosférica del distrito capital a través de la sustitución de gasolina en el transporte automotor, apostando especialmente por el uso de combustibles gaseosos. Los resultados muestran que el sustituto más limpio para la gasolina motor es el GLP. El GNC para ser usado en motores reconvertidos del tipo dual demostró ser una buena alternativa desde el punto de vista ambiental, pero a costa de desmejorar considerablemente la respuesta mecánica del motor, a causa de la falta de oxígeno por efectos de altura y humedad relativa elevados. Ambos sustitutos, no obstante, demostraron ser tremendamente dependientes de la tecnología empleada.

**Palabras claves:** Emisiones, combustibles alternativos, gas natural, gas licuado de petróleo, motores de encendido por chispa, transporte público, fuentes móviles.

## Abstract

This paper is a continuation of other that has been published in the «Segundo Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente», celebrated in Cienfuegos, Cuba. It shows the methodology and results obtained in some tests with spark ignition car engines at high altitude using different fuels as gasoline, LPG and CNG. This study was sponsored by DAMA, a governmental institute from Santafé de Bogota, Colombia. The aim of this study is to determine the influence of those fuels in the mechanical and environmental performance of public transportation vehicles, and to address the importance of the substitution of gasoline with LPG and CNG

Fecha de recepción: 10 de octubre del 2000

\* Grupo de Investigación en Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente de la Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia). (e-mail: lcorredo@uninorte.edu.co; radian@udea.edu.co)

\*\* Grupo C&T del Gas y Uso Racional de la Energía de la Universidad de Antioquia.

\*\*\* Consultor, Estrategias y métodos. Bogotá (Colombia).

*gaseous fuels. Results show that LPG is the best gaseous fuel substitute. CNG was more environmental friendly, but instead it produces substantially power problems in the engine. Both gaseous substitute fuels were very sensible to the technology employed.*

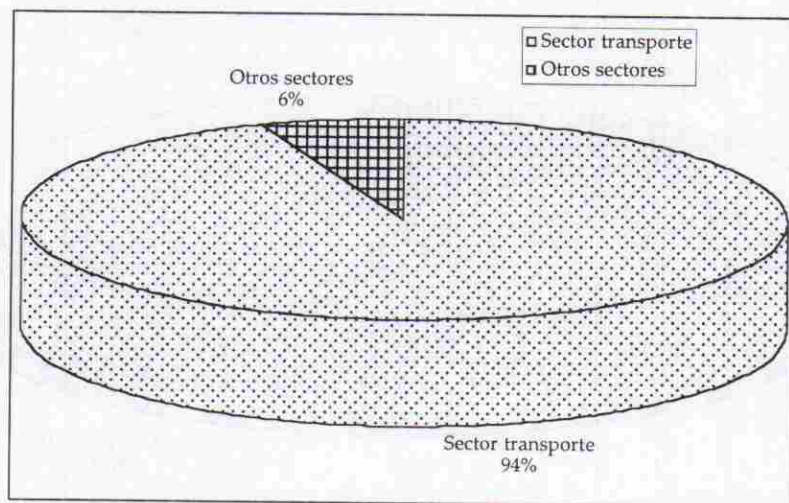
**Key words:** Alternative fuels, natural gas, liquified petroleum gas, public transport buses, mobil sources, otto engines.

## Introducción

La creciente preocupación por la contaminación del aire proveniente de la combustión de fuentes móviles en particular, ha conducido a la creación de reglamentos y normas que tienen como objetivo limitar los niveles o valores máximos permitidos de emisiones producidas por los vehículos. Esto, sumado a la reducción del consumo energético en aras de prolongar la supervivencia de los combustibles convencionales, ha motivado a fabricantes y a organismos gubernamentales a preocuparse por el consumo energético y la contaminación ambiental generadas por el sector

transporte, que para el caso colombiano ha sido desde la década de los ochenta el mayor consumidor de energía, con cerca de una tercera parte del total [1], como se muestra en las figuras 1 y 2 [2].

En Colombia, la penetración de otras formas de movilización masiva tanto de carga como de pasajeros ha sido muy tímida, salvo algunos ejemplos aislados como el Metro de la ciudad de Medellín. Este hecho, sumado a la apertura económica puesta en marcha a comienzos de los años noventa, han sido las causas principales del exagerado crecimiento del parque automotor a escala nacional, y en particular en Santa



**Figura 1.** Venta nacional de gasolina en estaciones de servicio – 1996 [2]



Fe de Bogotá, donde actualmente circulan más de 600.000 vehículos.

Durante los últimos años, la contaminación del aire de la ciudad ha alcanzado niveles que han influido para que la frecuencia de enfermedades pulmonares en los ciudadanos se haya disparado apreciablemente. Por este motivo, la Administración Distrital, y en particular el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), han emprendido acciones tendientes a disminuir las emisiones de contaminantes arrojados a la atmósfera, implementando estrategias para mejorar el flujo vehicular y para promover el uso doméstico e industrial de energéticos más «limpios» como los gases licuados del petróleo (GLP) y el gas natural comprimido (GNC). Esta iniciativa se justifica en gran medida porque en Colom-

bia cerca del 60% de la contaminación del aire es producida por el sector automotor y más de la mitad de los vehículos en circulación tiene más de 14 años de uso [3]. Según un estudio reciente realizado por el Departamento del Medio Ambiente de la Contraloría General de Medellín, en esta ciudad durante los últimos diez años se ha venido presentando gran diferencia entre las emisiones contaminantes producidas por el sector transportista y la producida por el sector industrial, situación que se tornó crítica en 1990, año en el que este último aportó cerca de un 96% de las emisiones contaminantes arrojadas a la atmósfera frente a un 3.6% proveniente de la industria [4]; para 1996 esta diferencia se habría disminuido; sin embargo, continuaba siendo cerca de 5 veces mayor el impacto ambiental del primer sector frente al industrial. Bajo esta pre-

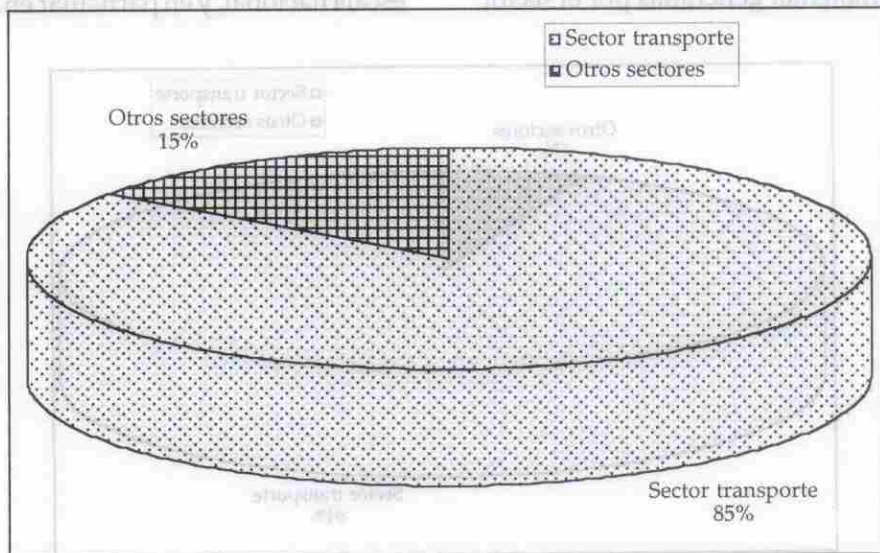


Figura 2. Venta nacional de ACPM en estaciones de servicio – 1996 [2]

misa, las entidades medioambientales regionales, en particular el DAMA en Santafé de Bogotá, inician la búsqueda de opciones válidas para disminuir la contaminación atmosférica del distrito capital a través de la sustitución de gasolina en el transporte automotor, especialmente se apuesta por el uso de combustibles gaseosos.

Este artículo, continuación de otro presentado recientemente en el «Segundo Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente», realizado en abril del presente año en Cienfuegos (Cuba), presenta la metodología seguida y los resultados obtenidos durante los ensayos de una serie de vehículos de transporte público con motor de gasolina, utilizando *Gasolina motor*, *GLP* y *GNC*, los cuales tenían como objeto la evaluación del desempeño mecánico y ambiental de los mismos en la ciudad de Santa Fe de Bogotá.

### Antecedentes

A pesar de contar con muchas experiencias relativas al uso de combustibles gaseosos (*GLP*, *GNC*) en motores de combustión interna (*Otto*, *Diesel*) para automotores en el mundo entero, sólo en contados casos se tiene una valoración comparativa de las emisiones, tanto en unidades porcentuales como en absolutas ( $\text{g/km}$  o  $\text{g/kW-h}$ ), de los principales contaminantes ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HC}$ , *partículas* y *ruido*) arrojados a la atmósfera por las fuentes móviles.

A partir de la revisión de la literatu-

ra internacional disponible sobre el tipo de pruebas realizadas y el tipo de resultados arrojados<sup>1</sup>, es fácil llegar a tres conclusiones de fondo:

- Prácticamente todas las evaluaciones revisadas sistemáticamente muestran disminuciones en los niveles de emisiones de contaminantes con relación a la gasolina y el Diesel (*ACPM*) cuando se emplean *GLP* o *GNC*. De manera que estos combustibles alternativos sí pueden contribuir a mejorar la calidad de vida de los grandes centros metropolitanos.
- Sin embargo, es evidente que el comportamiento mecánico y las emisiones comparativas entre la gasolina motor, el *ACPM*, el *GLP* y el *GNC* son sensibles a:
  1. La cosecha tecnológica del motor y en general a los componentes y el estado mecánico de los vehículos probados.
  2. El tipo de kit empleado, no sólo en cuanto al uso o no de circuitos cerrados con sensor de oxígeno sino a la

<sup>1</sup> Véase las reseñas de ensayos y pruebas de emisiones en buses *Cummins* y *Chevrolet Lumina* en Estados Unidos, vehículos en Holanda por TNO, vehículos en España e Irán y vehículos evaluados por la Comisión Europea en la referencia [3] previamente citada. Pruebas adicionales en México, Francia, Chile, Estados Unidos, Holanda, Italia y otros países fueron copiadas y analizadas a lo largo de esta investigación, y mencionadas en diferentes apartes del informe final.



marca y configuración del equipo utilizado para la conversión.

3. La composición del combustible (e.g., porcentaje de propano en el GLP o de metano en el GNC).

4. Las condiciones ambientales locales (calidad de aire, tráfico, altura, humedad relativa).

- Las tecnologías para el GNC automotor son más exigentes en términos del control de los factores arriba mencionados que las empleadas para GLP automotor, cuyo desempeño es más parecido a la gasolina.

Por las características fisico-químicas cambiantes del GLP<sup>2</sup> y la composición del GNC distribuidos en la capital, las pautas de conducción, la topografía, el estado del parque automotor y las condiciones ambientales de la misma (altura sobre el nivel del mar y humedad relativa), la literatura internacional y nacional no permiten calcular indirectamente estas emisiones en motores de funcionamiento mixto o dual (gasolina/GLP o gasolina/GNC). Por tanto, este estudio se fundamenta en la realización de pruebas dinámicas, que permiten

cuantificar en forma absoluta los contaminantes mencionados (*masa de contaminante por unidad de distancia recorrida o por kilogramo de combustible consumido*), así como evaluar el funcionamiento mecánico de los vehículos bajo uno u otro de estos combustibles.

Los siguientes elementos se tuvieron en cuenta para el diseño de la metodología de medición e interpretación:

- Las normas sobre emisiones admisibles de gases y partículas contaminantes tanto en Colombia como en el ámbito internacional.
- Las técnicas y pruebas estándar («ciclos de conducción») corrientemente aplicadas para evaluación de emisiones en ralentí (*vehículo estacionado en neutro o punto muerto*) versus evaluaciones dinámicas o en movimiento (*generalmente obtenidas en un dinamómetro de chasis en un laboratorio*).
- La disponibilidad de equipos de medición, kits de conversión y tipos de vehículos a probar representativos del parque de la ciudad.

### ***Normas vigentes sobre emisiones vehiculares en Colombia***

Con el fin de contribuir al control de emisiones por fuentes móviles, los ministerios del Medio Ambiente y de Transporte, mediante Resolución conjunta N° 005 del 9 de enero de 1996 [5], establecieron los límites permisibles de

<sup>2</sup> El GLP producido en Colombia no cumple especificaciones estables; es una mezcla variable de propano, butano y otros derivados (insaturados o más pesados) cuya composición depende básicamente del tipo de crudo cargado a refinería y de la mezcla de gasolina, Diesel y otros derivados de especificaciones estables que requiera el mercado. Las emisiones, especialmente de CO<sub>2</sub>, fluctúan según la proporción de propano/butano en la mezcla de GLP.

emisiones, como se puede ver en las tablas 1 y 2.

decir, hay más tiempo para que la energía liberada por el combustible se disi-

Tabla 1

Normas colombianas de emisión permisible para fuentes móviles con motor a gasolina en condición de ralentí (*Marcha Mínima*)

Año-Modelo	%CO	%CO a	ppm HC	ppm Hc
	a 0-1500 msnm	1501-3000 msnm	a 0-1500 msnm	1501-3000 msnm
2001 +	1.0	1.0	200	200
2000 - 1998	2.5	2.5	300	300
1997 - 1996	3.0	3.5	400	450
1995 -1991	3.5	4.5	650	750
1990 -1981	4.5	5.5	750	900
1980-1975	5.5	6.5	900	1000
<= 1974	6.5	7.5	1000	1200

Fuente: Ministerios del Medio Ambiente y de Transporte, Res. 005/96, Art. 8 [5]

Nótese que en la tabla 1 sólo se establecen límites permisibles para CO y HC en condiciones de marcha mínima o «ralentí» (motor encendido y en neutro a unas 900 rpm), en las cuales se considera que es más desfavorable el proceso de combustión, principalmente porque cobra mayor importancia la transferencia de calor a las paredes, es

pe al entorno en forma de calor, y se produce un enfriamiento del frente de llama en las cercanías de las paredes del cilindro. Estas emisiones tienden a disminuir a medida que el régimen de giro aumenta. Sin embargo, el principal deterioro de la combustión ocurre durante el funcionamiento dinámico del motor (*cambio de marcha, aceleración, decele-*

Tabla 2

Normas de emisión de fuentes móviles a partir del año modelo 1997

Vehículos a gasolina

AÑO-MODELO	CATEGORÍA DE VEHÍCULO	EMISIONES PERMISIBLES (g/l/km)		
		CO	HC	NO <sub>x</sub>
1997	Vehículo liviano	2.1	0.25	0.62
	Vehículo mediano	11.2	1.05	1.43
	Vehículo pesado*	25.0	10.00**	

\* Emisión en gramos/caballo de fuerza-hora (g/hp-h)

\*\* Emisión correspondiente a NO<sub>x</sub> + HC; estos niveles no se corresponden con los últimos avances en tecnología automotriz de los países desarrollados. Coinciden con sus niveles de emisiones de 1986

Fuente: Ministerios del Medio Ambiente y de Transporte, Res. 005/96, Art. 10 [5].



ración, variación de la carga, etc.); en estas condiciones ocurre un enriquecimiento súbito de la mezcla aire/combustible que eleva las emisiones de CO y HC muy por encima de lo que lo haría el ralenti [6].

Las normas de la tabla 2 se establecen para certificación por parte de ensambladoras o importadores de vehículos, ya que en el país no se cuenta con los laboratorios especializados requeridos para su homologación. Dicha certificación deberá contar con aprobación de la autoridad ambiental competente en el país de origen de su diseño con base en el ciclo FTP/75 a nivel del mar para vehículos livianos y medianos, con la prueba USA-13 para vehículos pesados o con otros procedimientos de evaluación reconocidos por la EPA o por la Unión Europea que sean homologados por el Ministerio del Medio Ambiente. Los puntos más importantes de estas normas son:

- Las normas en cuestión se establecen para fuentes móviles de más de tres ruedas (*no incluye motocicletas*).
- Aquellas fuentes móviles que utilicen como combustible gas natural, gas licuado del petróleo, alcoholes o electricidad, estarán exentas de cumplir los requerimientos contenidos en la presente Resolución.
- Se exceptúan del cumplimiento de las disposiciones aquí nombradas aquellas fuentes móviles terrestres que se desplacen sobre rieles, equi-

po para construcción (palas hidráulicas, grúas, compactadoras, retroexcavadoras, montacargas, tractores orugas, motoniveladoras y equipos de perforación), equipo para explotación minera fuera de carretera, equipo agrícola (tractores, sembradoras, cosechadoras, empacadoras) y las declaradas por la autoridad de tránsito como vehículos antiguos o clásicos.

### **Pruebas dinámicas y estimación de emisiones en unidades absolutas (g/km)**

Para determinar con mayor precisión si un determinado modelo de vehículo cumple las normas ambientales vigentes, generalmente es sometido a una serie de pruebas dinámicas acordes con los ciclos de conducción urbana exigidos por las legislaciones de cada país; éstas se llevan a cabo en costosos equipos de laboratorio, los cuales se encuentran generalmente en países desarrollados. Las pruebas en ralenti o en vacío no sirven para estimar la masa total de contaminantes arrojados por los motores de combustión interna durante su funcionamiento normal, ya que no tienen en cuenta las variaciones de carga en los distintos momentos de operación de los vehículos en tráfico urbano o interurbano.

Por el contrario, una prueba dinámica sirve para simular las condiciones reales de tráfico urbano (*aceleraciones y deceleraciones, arranques súbitos, paradas súbitas*), en los cuales los valores por-

centuales presentan cambios muy marcados durante los eventos señalados. Por esta razón, en este tipo de pruebas se cuantifican las emisiones de los diferentes gases de manera absoluta (*en g/km o g/kg de combustible consumido*).

El flujo másico de gases de escape que arroja un motor a la atmósfera depende de su tamaño; así pues, a mayor cilindrada mayor será el flujo de gases de escape a la atmósfera. Cuando una medición se realiza en porcentaje, se está despreciando el flujo másico de gases contaminantes emitido, es decir, no tiene en consideración el tamaño del motor. Para vehículos pequeños se emplean las unidades de g/km, ya que sus emisiones contaminantes se miden con la técnica de muestreo a volumen constante (CVS) bajo un ciclo de conducción preestablecido [7] en banco de rodillos. Para camiones y autobuses, por razones de tamaño, se suele desmontar el motor del vehículo y probarlo en banco de ensayos; allí se le somete a una serie de condiciones de funcionamiento diferentes que tratan de cubrir el rango de operación normal del motor. Midiendo el consumo específico de combustible (*masa de combustible que consume el motor para generar una unidad de energía*), entonces las unidades que se emplean para este tipo de vehículos independiente del combustible es de g/kW-h (*masa de contaminantes que emite el motor por unidad de energía generada por éste*).

Ante la falta de los dinamómetros de chasis y sofisticados equipos de laboratorio, se diseñaron pruebas de ruta con

el fin de registrar los distintos eventos de la marcha normal de cualquier vehículo. Como eventos se han considerado: arranques, aceleraciones, velocidad crucero, deceleraciones y paradas, tanto en terreno plano como en pendiente. De esta manera se intenta reproducir las condiciones de tráfico de la ciudad combinando estos eventos registrados a distintas horas de funcionamiento.

Los «protocolos de conducción» que se diseñan para pruebas dinámicas básicamente buscan de manera repetitiva obtener reacciones del vehículo y emisiones en los estados indicados en el párrafo anterior: vehículo detenido, en ralentí, en velocidad crucero, acelerando, decelerando y variando la pendiente.

### Justificación

En virtud de todo lo expuesto, se diseñaron dos protocolos para pruebas en plano y pendiente para ser aplicadas en las vías de la ciudad y no en laboratorio. Estos protocolos contemplan los estados estables (*ralentí frío o caliente, velocidades de crucero*) y transitorios (*aceleraciones, desaceleraciones, arranques en frío y en caliente*) de los motores. Para el ensayo dinámico también se consideraron las velocidades máximas que alcanzarían los automotores de carga y de pasajeros en condiciones reales<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Como punto de referencia y ajuste de cálculos, se está intentando obtener el protocolo diseñado para la ciudad de Nueva York, que en el libro de Degobert [7] se comenta sin detalle, pero parece bien ajustado al tráfico de Bogotá (con una veloci-



No obstante, la realidad de nuestro parque automotor, especialmente el de transporte masivo de pasajeros y de carga potencialmente objeto de un programa de reconversión y sustitución de combustibles, difiere sensiblemente de los vehículos reseñados por las siguientes razones:

- Antigüedad
- Periodicidad y calidad de mantenimiento
- Calidad del combustible utilizado
- Pauta de conducción

Todo ello, sumado al regular estado de las vías por donde circulan y de los talleres de mantenimiento, condujo a establecer una prueba que, entre otras, permitiese ver las siguientes respuestas:

### Prueba en Terreno Plano (figura 3)

- **Aceleración:** Aquí se definieron tres estados completamente diferentes:
- **Arranque:** Con éste se hace referencia fundamentalmente a la salida del reposo absoluto ( $V=0$ ). El coeficiente de fricción es más alto cuando el vehículo está parado que cuando está en movimiento<sup>4</sup>. Lo anterior explica el

grado medio de alrededor de 11 km/h en vez de 34.3 km/h en Los Angeles utilizados para el ciclo FTP-75 o los 18.7 km/h en París empleados en el ciclo ECE-13; los protocolos de estas últimas ciudades incluyen velocidades máximas difícilmente alcanzables en nuestras calles durante horas ordinarias de tráfico).

<sup>4</sup> Para efectos prácticos,  $f_{est} = 2f_{din}$ , donde  $f_{est}$  es el coeficiente estático de fricción y  $f_{din}$  es el coeficiente cinético de fricción.

porqué durante el arranque *en caliente* las emisiones suelen ser más altas y el consumo de combustible mayor.

- **40 km/h:** Una vez revisada la literatura internacional relacionada con el control de emisiones para tráfico urbano, se pudo concluir que éste era el rango más apropiado y el más representativo al momento de evaluar de forma absoluta los contaminantes emitidos a la atmósfera ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ). Cuando un vehículo se acelera en este rango de velocidades, se pueden establecer las siguientes hipótesis:

Las únicas fuerzas restrictivas son las de fricción de carretera y las inerciales. Las primeras sólo se verán influenciadas por el peso del vehículo y por el estado de la vía, y las últimas por la aceleración promedio, tipo y masa del vehículo. En otras palabras, se puede asumir, sin incurrir en grandes errores, que la *aceleración promedio* entre los distintos valores es la misma (por ejemplo, desde que deja el reposo hasta 20 km/h es igual que de 20 a 40 km/h). Esta simplificación nos permite estimar muy rápidamente tanto el consumo de combustible como las emisiones.

- **40 a 80 km/h:** A pesar de que en condiciones normales de tráfico capitalino predomina muy poco este rango, se decidió incluirlo por dos razones poderosas: (1) en vehículos ligeros y medianos (*taxis*, *colectivos*, *buses*) sí se alcanzan con facilidad velocidades cercanas o superiores a

80 km/h, lo que implica que los vehículos convertidos deberán responder en forma similar a como lo hacen con gasolina; (2) La resistencia del aire comienza a ser significativa a partir de 40 km/h en vehículos grandes y 50 km/h en pequeños; esto significa que la exigencia de potencia al motor es más elevada que cuando se mueve a baja velocidad (35-60% por encima, dependiendo de la forma y del tamaño del vehículo). Por este motivo, consideramos que era una prueba inevitable y que debía ser llevada a cabo con los tres tipos de combustibles.

- *Ralentí*

- *Frío*: De todos es sabido que cuando más contamina un motor *porcentualmente* es cuando está *frío*. Por esta razón decidimos incluir este estado en nuestro experimento, a pesar de que no contamos en la capital con

una estimación del número de arranques «fríos» que hacen los automotores por categoría.

- *Caliente*: Nuestro estudio se centra en los vehículos de transporte público, los cuales se caracterizan por hacer largos recorridos con pocas paradas prolongadas y más bien muchas paradas cortas. Esto hace que este estado sea supremamente importante para nuestros cálculos, ya que en condiciones reales de tráfico capitalino es tal vez el que más predomina.
- *Deceleraciones*. Al igual que en ralentí y en el arranque en frío, éste es otro de los estados en el que más emisiones desprenden los automotores, especialmente los carburados, las cuales son ocasionadas por los cambios bruscos de presión en el colector de admisión.

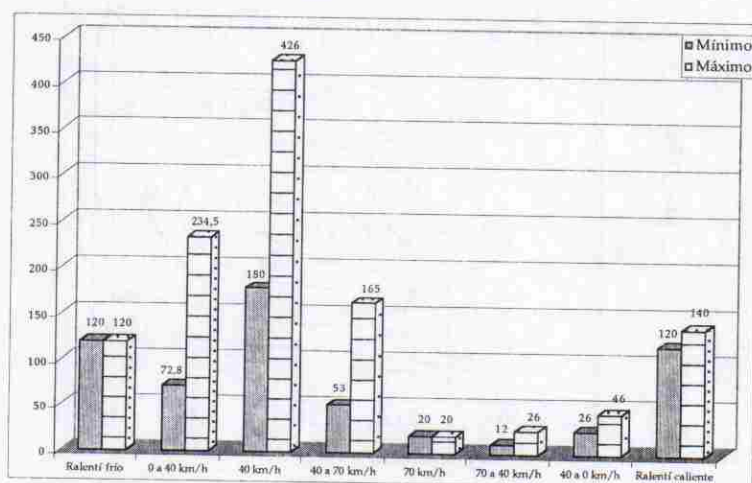


Figura 3. Protocolo de prueba dinámica en plano para la ciudad de Santa Fe de Bogotá [8]



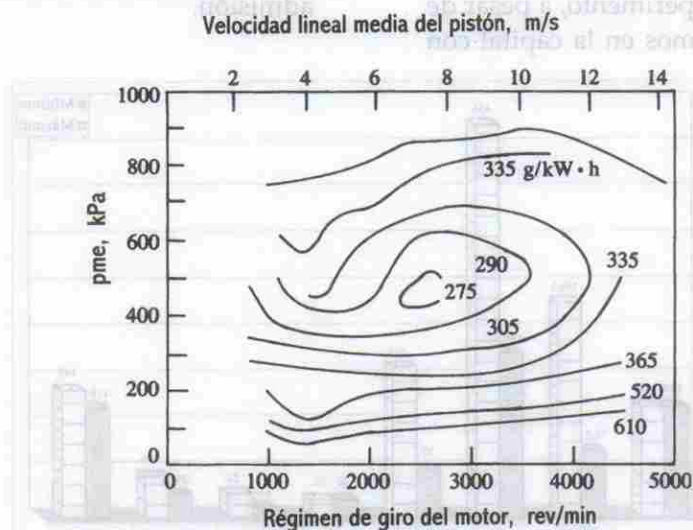
### Pruebas en Pendiente

A diferencia de la prueba en plano, en la cual se buscaba evaluar la potencia desarrollada por el vehículo, en ésta se persigue cuantificar la diferencia presentada en el par motor con ambos combustibles (GLP, GNC), tomando como referencia la gasolina, y de esta manera comparar el desempeño mecánico de los diferentes combustibles. Al igual que la prueba de terreno plano, ese protocolo se justifica por las siguientes razones:

- Un gran porcentaje de las rutas de buses, colectivos, busetas y periféricos de la ciudad se hacen en pendientes. Según el estudio de JICA [9], la ciudad tenía en 1995 5.995.000 habitantes, distribuidos en 19 zonas, de las cuales se han destacado al menos las siguientes cuatro que tie-

nen rutas en pendientes: San Cristóbal (población, 405.833), Usme (212.080), Suba (544.637) y Ciudad Bolívar (362.424). Aunque las estadísticas no son precisas, es evidente que los vehículos de transporte público que atienden al menos a este 25.4% de la población urbana están obligados a subir pendientes con pasajeros.

- En la figura 4 se muestran las curvas características de un motor corriente de encendido por chispa. Las líneas de contorno corresponden con el consumo específico de combustible ( $\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ). Se observa cómo varía el par motor (*expresado en términos de presión media efectiva, kPa*) en función del consumo de combustible, lo que implica una gran influencia del par motor en las emisiones contaminantes.



**Figura 4.** Curvas características de un motor de encendido por chispa de 4 cilindros y 2 litros de cilindrada [10]

El ralentí frío no se ve afectado por la pendiente. El ralentí caliente se caracteriza por las altas concentraciones de  $\text{NO}_x$  debidas al incremento de temperatura del motor, que es directamente proporcional al grado de carga, en este caso representados por la pendiente y el peso del vehículo.

- *Deceleraciones.* Se caracterizan por no ocasionar sobrepresiones en el colector de admisión; por tanto, es de esperarse que las emisiones se reduzcan con respecto al recorrido plano.

## Metodología

Con el fin de hacer un análisis comparativo de las emisiones para los diferentes eventos mencionados con cada tipo de combustible, se instaló en cada vehículo probado un equipo portátil analizador de gases de escape con capacidad de almacenamiento de datos y una impresora para registrar las lecturas de emisiones y la relación Aire/Combustible (A/C). El procedimiento empleado para la determinación de las emisiones absolutas en cada caso fue el siguiente:

1. Recopilación de las curvas de potencia, par motor, régimen de giro del motor (rpm) y consumo específico de combustible bajo distintas condiciones de carga.
2. Recopilación de las características físicas de los vehículos para ensayar, tales como modelo, tipo de vehículo, dimensiones, peso, caja de cambios y transmisión.

3. Datos meteorológicos: temperatura de bulbo seco, humedad relativa y presión ambiente.
4. Trazado de las rutas (plana y pendiente), con base en la cartografía del Instituto Colombiano Agustín Codazzi a escala 1:2000, y estimación de gradientes en pendientes.
5. Una vez recopilada toda la información técnica anterior, se procedió a calcular el consumo de combustible en cada uno de los tramos del protocolo diseñado, para lo cual se tuvo en cuenta que, en general, la combustión completa de cualquier combustible viene expresada de la siguiente forma:

$$C_a H_b + \lambda \left( a + \frac{b}{4} \right) \left( O_2 + 3.773 N_2 \right) \Rightarrow a CO_2 + \frac{b}{2} H_2 O + 3.773 \lambda \left( a + \frac{b}{4} \right) N_2$$

Ecuación 1,

donde  $\lambda$  es el exceso de aire.

En la realidad, la combustión perfecta no se presenta, y este hecho da origen a los hidrocarburos sin quemar (HC), al monóxido de carbono (CO) y, adicionalmente, a los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), que son los contaminantes de mayor influencia en los motores de encendido por chispa.

## *Desempeño mecánico del motor funcionando con Gasolina motor, GLP y GNC*

Se consideró despreciable el efecto de la variación instantánea de las condiciones ambientales (*temperatura de bulbo*



*seco, humedad relativa y presión*) durante la realización de cada prueba. Igualmente se despreciaron los efectos de la variación del coeficiente de rozamiento de la carretera, la presión de inflado de las llantas y la velocidad del viento.

Para la determinación del consumo específico de combustible en cada evento del protocolo de conducción, se ha considerado la influencia de las condiciones ambientales, de altitud y el diseño del motor. El principal efecto sobre el comportamiento mecánico del motor se refleja en la variación de la densidad del aire en el colector de admisión, como se demuestra a continuación:

La potencia de un motor de combustión interna se puede expresar en los siguientes términos [10]:

$$N = \frac{\eta_f \cdot \eta_v \cdot V_d \cdot \rho_{a,i} \cdot F \cdot H_c \cdot n}{i} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde: N es la potencia del motor,

$\eta_f = \frac{\text{Potencia}_{\text{obtenida}}}{\text{Potencia}_{\text{suministrada}}} = \frac{N}{\dot{m}_f \cdot H_c}$  es el rendimiento de transformación de combustible del motor

$\eta_v = \frac{i \cdot \dot{m}_a}{\rho_{a,i} \cdot V_d \cdot n}$  es el

rendimiento volumétrico del motor

Ecuación 3

$V_d$  = Cilindrada del motor [ $m^3$ ],

$i$  = Número de revoluciones por cada ciclo de potencia (2 para un motor de cuatro tiempos),

$\rho_{a,i}$  = Densidad del aire en el colector de admisión [ $kg/m^3$ ],

$F$  = Relación Combustible/Aire,

$H_c$  = Poder calorífico inferior del combustible [ $kJ/kg$ ],

$n$  = Régimen de giro del motor [ $rpm$ ].

$\dot{m}_f$  = Masa de combustible suministrada al motor

$\dot{m}_a$  = Masa de aire teórica que entra al motor

Como se puede observar en la Ecuación 1, el oxígeno del aire es el que verdaderamente actúa como agente reductor en el proceso de combustión, así pues, debido a que con la altura se pierde masa de oxígeno (210 g de  $O_2$  en Bogotá, 234 g de  $O_2$  en Medellín y 275 g de  $O_2$  en Barranquilla por cada metro cúbico de aire), lo que implica una reducción de la densidad del aire en el colector de admisión, se cae entonces la potencia (Ecuación 2).

En la Ecuación 3 se observa que el rendimiento volumétrico es directamente proporcional al gasto másico de aire que entra al cilindro, y éste, a su vez, es función de la presión en el colector de admisión ( $p_i$ ). Esto significa que una disminución en la primera (Ecuación 4) provoca una caída en el rendimiento volumétrico (Ecuación 3) y, por tanto, en la potencia del motor (Ecuación 2). Si consideramos la presión en el colector de admisión compuesta de las siguientes presiones parciales, tenemos:

$$p_i = p_{a,i} + p_{\text{comb},i} + p_{H_2O,i} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde  $p_{a,i}$  es la presión parcial del aire,

$p_{comb,i}$  es la presión parcial del combustible y  $p_{H_2O,i}$  es la presión parcial del vapor de agua en la admisión.

Dividiendo la Ecuación 4 entre  $p_{a,i}$  se tiene:

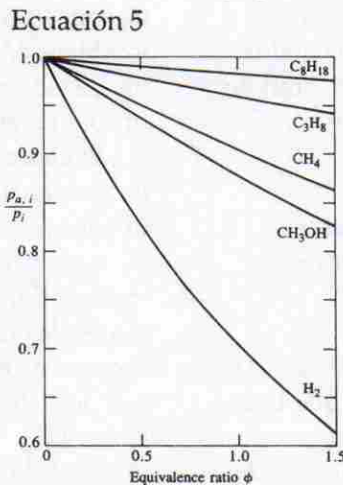
$$\frac{p_i}{p_{a,i}} = 1 + \frac{p_{f,i}}{p_{a,i}} + \frac{p_{H_2O,i}}{p_{a,i}}, \text{ de donde}$$

$$\frac{p_{a,i}}{p_i} = \frac{1}{1 + \frac{\frac{m_f}{M_f}}{\frac{m_a}{M_a}} + \frac{\frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}}}{\frac{m_a}{M_a}}}$$

Finalmente,

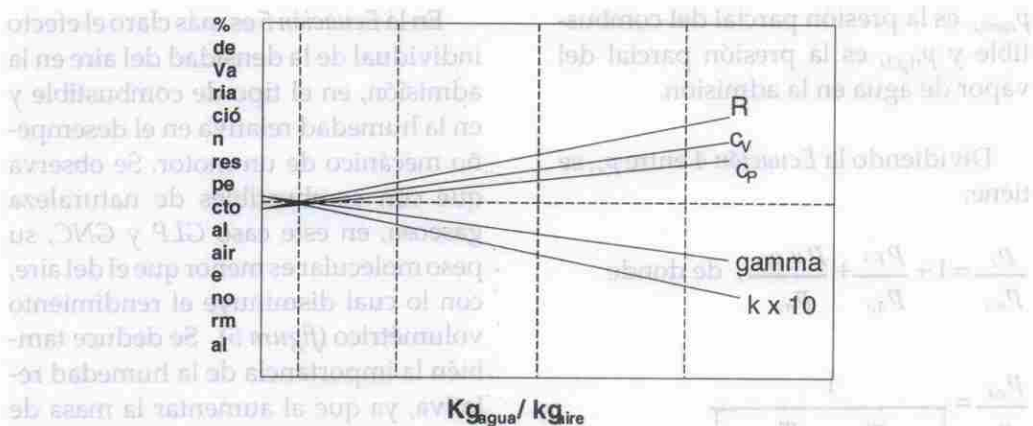
$$\frac{p_{a,i}}{p_i} = \frac{1}{1 + F_a \frac{M_a}{M_f} + \frac{m_{H_2O}}{m_a} \frac{M_a}{M_{H_2O}}}$$

En la Ecuación 5 es más claro el efecto individual de la densidad del aire en la admisión, en el tipo de combustible y en la humedad relativa en el desempeño mecánico de un motor. Se observa que con combustibles de naturaleza gaseosa, en este caso GLP y GNC, su peso molecular es menor que el del aire, con lo cual disminuye el rendimiento volumétrico (figura 5). Se deduce también la importancia de la humedad relativa, ya que al aumentar la masa de agua en el ambiente disminuye igualmente, la potencia del motor. Generalmente en los países donde se fabrican los motores se desprecia este efecto, y le atribuyen una influencia inferior al 0,03% en el comportamiento global del motor. En nuestras ciudades, sin embargo, no se puede despreciar este efecto debido a sus elevadas humedades promedio. En la figura 6 se puede ver el efecto de la humedad específica en la variación de las propiedades del aire [10].



**Figura 5.** Efecto del tipo de combustible gaseoso sobre la presión en la admisión en función de la relación combustible/aire relativa [10]





**Figura 6.** Efecto de la humedad en las propiedades del aire.  $R$  es la constante del aire,  $C_v$  y  $C_p$  son los calores específicos a volumen y presión constante, respectivamente;  $\gamma$  es la relación entre calores específicos, y  $k$  es la conductividad térmica del aire [10]

En cuanto al sistema de alimentación de combustible, se estableció una clara diferenciación entre los vehículos de carburador y los de inyección electrónica, porque este último sistema –que es obligatorio en el parque automotor colombiano a partir de 1998– se traduce en un mejor rendimiento de la combustión, lo cual disminuye el consumo de combustible y, por lo tanto, las emisiones contaminantes globales.

### Desempeño ambiental del motor funcionando con Gasolina motor, GLP y GNC

Al igual que en el análisis del desempeño mecánico de los motores que usan Gasolina motor, GLP y GNC en grandes alturas, el desempeño ambiental del motor se ve afectado por estas mismas variables, que de alguna manera influ-

yen en el consumo específico de combustible. No obstante, cabe mencionar también que la calidad del combustible es un factor determinante en este tópico, y por lo demás no es controlable por el usuario. Desde el punto de vista de la Gasolina motor, la Norma Técnica Colombiana 1380 [11] establece unos límites de exigencia bajos en cuanto a sus propiedades antidetonantes, tanto para la gasolina extra como para la corriente. La tendencia a la autoinflamación de una gasolina se evalúa por su número de octano (ON). Este representa una medida del grado de oxidación de las moléculas del combustible durante el proceso de compresión en los volúmenes del cilindro a los que no llega la llama [12]. Cuanto mayor es el ON, mayor es la resistencia de la gasolina a autoinflamarse o a provocar el fenómeno nocivo de la autodetonación.

## Resultados

Haciendo uso de la ficha técnica de los vehículos, se estimó la carga máxima en kg que debía soportar el automotor. Definida la misma, se procedió a cargar los vehículos con sacos de arena de 40 kg cada uno hasta alcanzar su capacidad de diseño. La máxima carga fue de 5 toneladas para buses y camiones.

Una vez verificado el buen estado de los vehículos empleados para las pruebas, se procedió a instalarles el Kit de

conversión para GLP, acorde con la normativa técnica vigente que reglamenta las características de las mangueras, las tuberías de suministro, los depósitos de almacenamiento de GLP, los reguladores y los vaporizadores, los sellos, etc. [13]. Finalmente, se instaló en el tubo de escape la sonda que permitió medir los gases de escape en condiciones móviles, información que se registra de manera instantánea en el analizador portátil. El protocolo para pruebas dinámicas en rutas planas fue diseñado para evaluar 12 vehículos re-

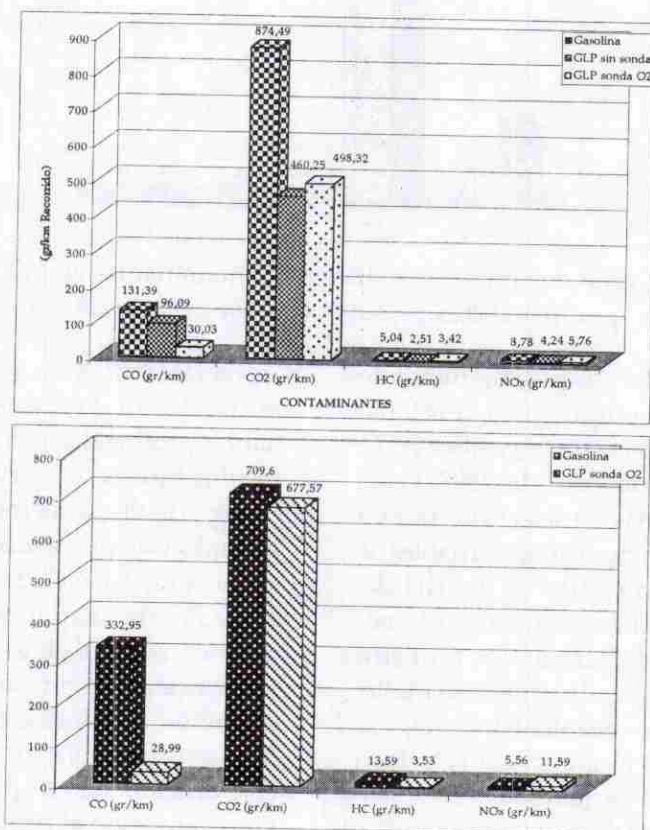
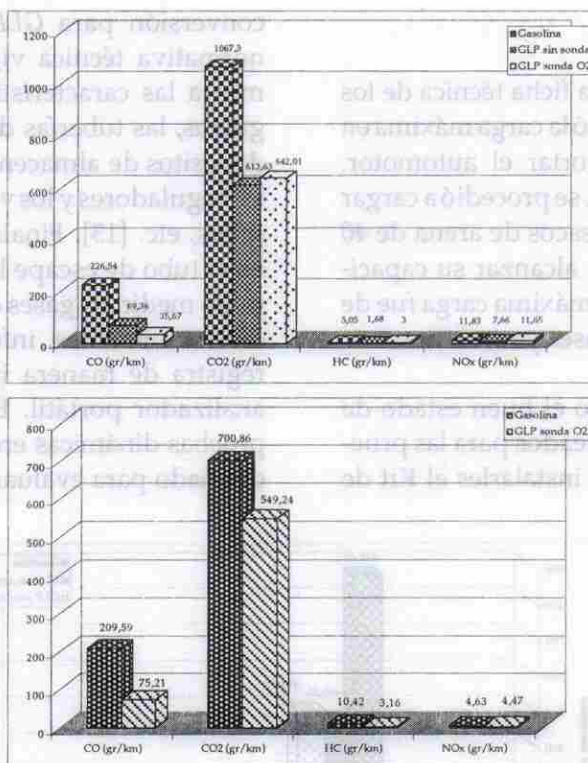


Figura 7. Comparación de las emisiones contaminantes en g/km emitidas por un autobús con carburador

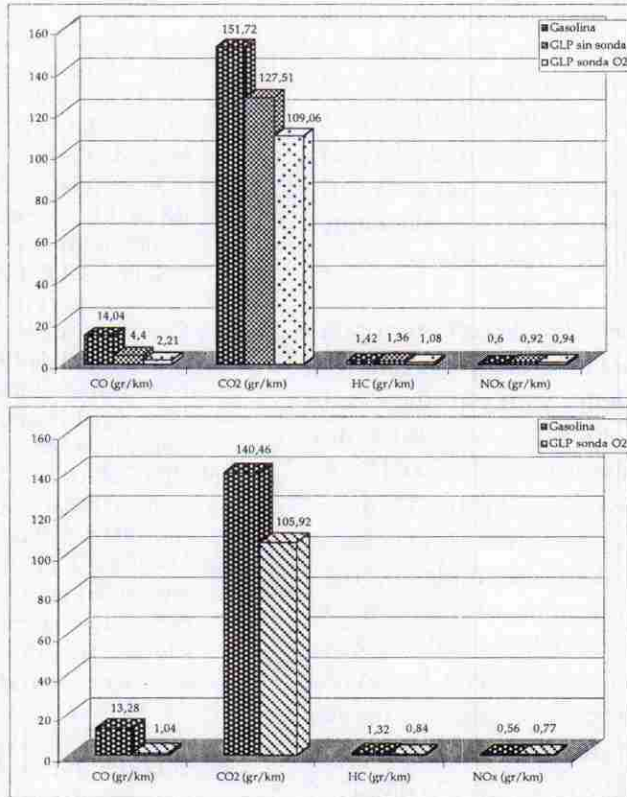




**Figura 8.** Comparación de las emisiones contaminantes en g/km emitidas por un autobús con sistema de inyección monopunto

representativos del parque automotor de la ciudad convertidos para funcionamiento dual gasolina/GLP o gasolina/GNC, en el último trimestre de 1997. Cada vehículo recorría un trayecto de 12.4 km por prueba, con duraciones variables de tiempo en cada estado de marcha dependiendo de sus características tecnológicas propias. Durante los primeros 120 segundos, en cada prueba se midieron las emisiones en ralentí frío, luego se aceleraba hasta alcanzar una velocidad crucero de 40 km/h (tardando 72.8 segundos en el vehículo más rápido probado y 234.5 segundos en el más pesado y lento), y así hasta terminar el protocolo.

En las figuras 7 a 9 se presentan los resultados de las emisiones contaminantes producidas por tres tipos de vehículos típicos del servicio público de transporte de pasajeros en Bogotá empleando Gasolina motor, GLP con y sin sonda de O<sub>2</sub> y GNC. Se probaron otros vehículos de diferentes marcas con los mismos combustibles, los resultados individuales se presentan detalladamente en el informe correspondiente [8], pero para efectos ilustrativos, en este artículo sólo se presentan tres de ellos siguiendo el protocolo de prueba dinámica en plano.



**Figura 9.** Comparación de las emisiones contaminantes en g/km emitidas por un *taxi con carburador*

## CONCLUSIONES

- Los motores de combustión interna son máquinas de flujo volumétrico, por tanto su funcionamiento mecánico y ambiental con combustibles gaseosos se ve fuertemente afectado. Aunque los combustibles gaseosos ensayados tienen mayor poder calorífico por unidad de masa, presentan el problema del llenado ineficiente del cilindro y, por lo tanto, esto se traduce en una pérdida sustancial de potencia. En las pruebas en plano,

los motores funcionaron bien. En las pruebas de pendiente con el GNC se observó inestabilidad en la combustión y gran dificultad para arrancar, lo que ocasionó un atraso de más de 50% en el tiempo de recorrido con respecto a la Gasolina motor.

- Tanto para el sistema de carburación como para el sistema de inyección electrónica, los combustibles gaseosos han mostrado ser buenos candidatos en relación con la disminución de los contaminantes fotoquímicos



(especialmente el HC y los  $\text{No}_x$ , en los que sólo se superan los 6 g/km en el autobús con carburador quemando GNC y en el autobús con inyección monopunto quemando GLP con sonda lambda). Pero, por otro lado, son grandes productores de  $\text{CO}_2$ , gas que más contribuye al efecto invernadero.

- Cuando los vehículos están en operación pasan más tiempo en marcha que en ralentí, y en esos momentos suelen dispararse las emisiones. Véanse las emisiones de CO y HC. En general, los vehículos probados muestran niveles altos pero admisibles de % CO en ralentí, según las normas, aunque ninguno cumplió con los parámetros de exigibilidad dados por el DAMA. Comparado con la mayoría de los demás eventos, los niveles medidos son relativamente altos. Pero las conclusiones cambian cuando se consideran los tiempos de marcha y las emisiones absolutas arrojadas durante las pruebas. Es evidente, especialmente en el caso de los buses probados, que las emisiones absolutas son mucho mayores en los demás momentos de operación. Pero no es evidente que estas emisiones dependen de la edad del vehículo ni se relacionan directamente con los porcentajes arrojados en ralentí, como sugieren tanto las normas nacionales como las distritales vigentes.

### Referencias

[1] MINISTERIO de Minas y Energía. *Memoorias del Congreso Nacional 1994-1995*, Anexo A.

[2] TORRES, J.E. & Asociados. «Determinación y seguimiento continuo del mercado de combustibles en el transporte automotor de Colombia». UPME-Ministerio de Minas y Energía, Santa Fe de Bogotá, febrero de 1997.

[3] CORREDOR, L.A.; AGUDELO, J.R.; TORRES, J.E. «Desempeño mecánico y ambiental a grandes alturas de motores de gasolina/GLP/GNC utilizados en buses de transporte público». *II Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos (Cuba), abril de 1999.

[4] INFORME del estado de los recursos naturales y del medio ambiente. Contraloría General de Medellín. Medellín, 1998.

[5] MINISTERIO del Medio Ambiente. Resolución 005 del 9 de enero de 1996, Aclaración 009 del 20 de agosto de 1996.

[6] AGUDELO, J.R. «Análisis teórico-experimental de motores de encendido por compresión turboalimentados en régimen transitorio». Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (España), 1998.

[7] DEGOBERT, P. *Automobiles and Pollution*. París, Éditions Technip, 1995.

[8] TORRES, J.E. & Asociados. «Estudio de factibilidad para la reconversión de vehículos a gas licuado de petróleo -GLP- en Santa Fe de Bogotá D.C.- Fase I». DAMA-PNUD, Dic. 1997.

[9] THE STUDY on the Master Plan for Urban Transport of Santa Fe de Bogotá in Republic of Colombia - Interim Report. JICA, June, 1996; cap. 2.

[10] HEYWOOD, J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Nueva York, McGraw-Hill, 1988.

[11] ICONTEC, Norma Técnica Colombiana NTC 1380, «Gasolina para Motores de Combustión Interna», 1992.

[12] LAPUERTA, M., HERNÁNDEZ, J.J. *Tecnologías de la Combustión*. Colección Ciencia y Técnica, Universidad de Castilla-La Mancha (España), 1998.

[13] ICONTEC, Normas Técnicas Colombianas NTC 3768, 3769 y 3770 del 29 de noviembre de 1995.