



**Principales consideraciones técnicas a tener  
en cuenta cuando se pretende usar buses  
a gas natural comprimido en ciudades  
en vía de desarrollo**

**Uriel González**  
**Especialista en combustibles y tecnologías**

Mayo 2013

## PRINCIPALES CONSIDERACIONES TÉCNICAS A TENER EN CUENTA CUANDO SE PRETENDE USAR BUSES A GAS NATURAL COMPRIMIDO EN CIUDADES EN VÍA DE DESARROLLO

### EDICIÓN:

Clean Air Institute  
EE.UU., Washington D.C. ,  
Mayo 31, 2013

### COMITÉ EDITORIAL:

Sergio Sanchez  
Director Ejecutivo  
Juliana Klakamp  
Especialista en Calidad de Aire y Cambio Climático

### Consultor

Uriel González

### Reconocimientos

Esta edición incorpora las valiosas contribuciones de Monica Espinosa, investigador asociado del Clean Air Institute, como parte del comité de revisión del documento.

El Clean Air Institute agradece al Fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), al Fondo Español para América Latina y el Caribe y al Banco Mundial por su generoso apoyo financiero para la realización de este trabajo así como para las actividades relacionadas con su concepción y preparación.

El Clean Air Institute agradece también las contribuciones de todas aquellas organizaciones e individuos que participan en el Programa de Transporte Sustentable y Calidad del Aire. En particular, quisiéramos dar las gracias a todos aquellos que han aportado información relevante para este documento, tanto en eventos como la Conferencia de Transporte y Calidad del Aire llevada a cabo en Rosario, Argentina como en múltiples oportunidades formales e informales.

*Los hallazgos, interpretaciones y conclusiones expresadas en este documento están basados en información recopilada por el Clean Air Institute (CAI) y sus consultores, socios y otros participantes a partir de las fuentes indicadas.*

*Disponible en línea a través de: <http://www.cleanairinstitute.org/cops>*

*Para mayor información:*

*[Info@cleanairinstitute.org](mailto:Info@cleanairinstitute.org)*

*The Clean Air Institute*

*1100 H Street N.W. Suite 800*

*Washington D.C. 20005, USA*

# Contenido:

## 1.- INTRODUCCIÓN.

## 2.- ESTADO ACTUAL DEL USO DE GNC EN LATINOAMÉRICA Y OTROS PAÍSES.

## 3.- CONSIDERACIONES DE POLÍTICA Y REGULACIÓN.

3.1. Recomendaciones de aspectos de seguridad en autobuses y estaciones de abasto.

3.2. Normativas medioambientales.

3.3. Recomendaciones para la implementación exitosa de autobuses a GNC.

## 4.- CONSIDERACIONES TÉCNICAS.

4.1. Propiedades del gas natural comprimido (GNC).

4.2. Estaciones de llenado de GNC.

4.3. Tecnología de los autobuses a gas natural.

## 5.- OTRAS CONSIDERACIONES IMPORTANTES.

5.1. Necesidades adicionales para la implantación de autobuses a GNC.

5.2. Seguimiento de los programas de autobuses a GNC.

## ANEXOS.

A. **Análisis de programas de GNC.**

B. **Análisis comparativo entre motores a Diesel y a gas natural.**

## REFERENCIAS

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el ánimo de ofrecer una asistencia a tomadores de decisión, políticos, académicos y cualquier interesado en el impulso del Gas Natural Comprimido (GNC) como combustible del transporte público masivo, el Clean Air Institute ha preparado esta guía que incluye consideraciones principales sobre la implementación de políticas de uso del GNC.

El uso de sistemas de autotransporte público a GNC encuentra su principal motivación en los beneficios ambientales que brinda respecto a los combustibles tradicionales como el Diesel y la gasolina, principalmente en lo que respecta a las emisiones de material particulado y óxidos de nitrógeno. Los autobuses a gas natural lograron obtener los niveles de partículas exigibles por la EPA para los vehículos a Diesel en el año 2007 desde el año 2002, (Department of Transportation, 2009). Adicionalmente, factores como la disponibilidad del gas natural e infraestructura para su suministro y consumo ha jugado un papel decisivo en la implantación de programas de autobuses a gas natural exitosos.

La reducción de importaciones de combustibles como el Diesel, aunado a una alta disponibilidad doméstica del gas natural y abundantes reservas probadas como en el caso de Pakistán (Hilail, 2006) y algunos países latinoamericanos, han permitido un crecimiento continuo de esta industria durante más de 30 años (Yeh, 2007). El uso de GNC como combustible tiene sus orígenes en Italia durante los años treinta y ha tenido un auge sostenido en este país, sin embargo, en diversos lugares que se han emprendido programas de autobuses a GNC, el éxito ha sido marginal y en diversas ocasiones los programas han terminado en el abandono.

En el presente trabajo, se realiza un análisis de los factores de éxito y fracaso de los programas de aplicación del gas natural en los sistemas de transporte, desde los países que han tenido un crecimiento sostenido en la aplicación del gas natural en vehículos ligeros como Argentina y Brasil, hasta países donde los programas han colapsado como Nueva Zelanda, pasando por países con programas de vehículos a gas natural recientes, como China e India. Se hace un análisis de las consideraciones de política y regulación para algunos países que resultan de interés particular.

La tecnología actual para el empleo de GNC es madura, y requiere de pocos componentes tecnológicos de vanguardia para producir niveles de emisiones inferiores a los estándares más estrictos a nivel mundial. En contraparte, los motores a Diesel actuales, requieren complejos sistemas de inyección y de control de emisiones, así como de convertidores catalíticos de nuevas formulaciones que han venido reduciendo la fiabilidad de estos motores, aumentando a su vez las necesidades de mantenimiento y su costo (González, 2012, Calgary Transit Fleet, 2011).

A pesar de las ventajas comparativas mencionadas, para obtener los mejores beneficios en el empleo del GNC, es necesario garantizar el cumplimiento de los estándares en cuanto a seguridad se refiere. Asimismo, es indispensable el cumplimiento de los programas de mantenimiento y sustitución de piezas al final de su vida útil, pues de no hacerse de esta manera, los beneficios ambientales y energéticos mencionados no compensarían el riesgo asociado al manejo de gas a alta presión en condiciones inseguras.

Los programas para el uso de GNC dependen en gran medida del desarrollo de un marco regulatorio adecuado y del apoyo de las instancias gubernamentales adecuadas para garantizar su robustez y permanencia en el tiempo. En el caso del uso de GNC en automóviles ligeros -comúnmente particulares- el éxito de los programas está condicionado al establecimiento de estructuras de precios de los combustibles que permitan la rápida amortización de la inversión requerida en los automóviles a través de los ahorros obtenidos al utilizar el gas natural en sustitución de la gasolina y el Diesel.

A pesar de que ambos tipos de programa (automóviles y autobuses) comparten la infraestructura necesaria (suministro de gas, estaciones de abasto y marco regulatorio), sus motivaciones son muy diferentes y es por esto que la mayoría de los programas emprendidos en autobuses han tenido un éxito discreto mientras que en muchos de los casos se observa una clara tendencia al empleo de este combustible en vehículos ligeros.

La aplicación del GNC en autobuses es más atractiva que en los vehículos ligeros por los siguientes motivos:

- Por los altos recorridos diarios de los autobuses urbanos (especialmente en el caso de los sistemas BRT) es posible obtener mayores beneficios ambientales y ventajas por diversificación energética.
- Es deseable el control centralizado de los vehículos que consumen GNC.
- Los consumos de combustible son más predecibles en las flotillas de autobuses que en los autos particulares, lo que permite diseñar de una manera más eficiente los sistemas de compresión y suministro.
- Cuando el servicio tiene características deseables como rapidez, eficiencia, precio competitivo accesibilidad y ciertas amenidades como en el caso de los sistemas BRT, el GNC contribuye a la buena imagen del sistema de transporte colectivo coadyuvando a desincentivar el uso del automóvil particular, con el consecuente impacto benéfico en las emisiones de contaminantes por persona transportada.

El documento se divide en cuatro secciones:

- Estado actual del uso de GNC en Latinoamérica y otros países.
- Consideraciones de política y regulación.
- Consideraciones técnicas.
- Otras consideraciones importantes.

Finalmente, a manera de anexos se presenta la descripción de los sistemas de GNC empleados en algunos países que resultan de interés particular, información comparativa de aspectos técnicos de los motores a Diesel y gas natural y el análisis de costos de autobuses a GNC. En caso de requerir profundizar más en alguno de los puntos se recomienda al lector remitirse a las referencias relacionadas.

## 2. ESTADO ACTUAL DEL USO DE GNC EN LATINOAMÉRICA Y OTROS PAÍSES.

A continuación se presenta un cuadro con la información referente al número de unidades que utilizan gas natural como combustible en los países latinoamericanos y algunos otros países que resultan de interés:

**Tabla 1.- Estado actual del uso de GNC en Latinoamérica y países seleccionados.**

	Vehículos ligeros	Autobuses medianos y pesados	Estaciones públicas	Estaciones privadas	Penetración GNC mercado nacional (%)	Penetración GNC mercado mundial (%)	Reservas probadas de Gas Natural	% reservas probadas mundiales
ARGENTINA	2,044,000	0	1,890	0	16.59	13.09	378,800	0.18
BOLIVIA	140,400	100	161	0	15.51	0.87	281,500	0.14
BRASIL	1,703,000	1	1,729	0	4.90	10.60	416,900	0.20
CHILE	8,055	109	52	7	0.35	0.05	97,970	0.05
COLOMBIA	325,000	30	651	0	13.17	2.37	134,100	0.06
REP. DOMINICANA	2,800	0	7	0	0.23	0.02	0	0.00
MÉXICO	4,860	60	14	0	0.02	0.03	490,300	0.24
PERÚ	120,000	120	170	0	9.09	0.84	352,800	0.17
VENEZUELA	105,000	0	166	0	2.12	0.65	5,524,000	2.65
<b>TOTAL</b>	<b>4,453,115</b>	<b>420</b>	<b>4,840</b>	<b>7</b>			<b>7,676,370</b>	
<b>%MUNDIAL</b>	<b>32%</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>0%</b>		<b>28.5</b>	<b>3.68</b>	
CHINA	370,000	150,000	2,300	200	1.15	7.40	3,200,000	1.54
ESPAÑA	3,217	1,503	14	43	0.01	0.02	2,548	0.00
ESTADOS UNIDOS	96,500	13,000	1,000	0	0.05	0.69	7,716,000	3.70
INDIA	1,069,000	26,376	405	319	3.53	9.25	1,154,000	0.55
COREA	3,049	26,412	190	185	0.20	0.20	5,748	0.00
<b>MUNDIAL</b>	<b>13,777,000</b>	<b>321,575</b>	<b>19,044</b>	<b>1,475</b>				

Fuentes: NGVA Europe, 2012, <https://www.cia.gov/>

A pesar de que los países latinoamericanos incluidos en el cuadro representan el 32% de universo de vehículos ligeros a Gas Natural, poseen menos del 4% de las reservas mundiales probadas de gas natural. La mayoría de los vehículos a gas natural en Latinoamérica son automóviles de pasajeros, careciendo de representación en el sector de autobuses medianos y pesados.

Países como Argentina y Brasil conjuntamente constituyen el 27% de los vehículos ligeros, sin embargo, en ambos países el empleo de autobuses a gas natural es prácticamente inexistente y solo poseen el 0.3% de las reservas mundiales de gas natural. Al analizar el número de vehículos por estación, se observa que para ambos países latinoamericanos con importante participación en el mercado mundial del GNC resulta ser del orden de 1,000 unidades/estación, mientras que en el caso de los Estados Unidos, sobresale el

limitado número de vehículos por estación, que es del orden de 100 unidades. Países como China, Corea e India, se distinguen por su participación en autobuses a gas natural que representa el 63% del total a nivel mundial y disponen en su conjunto del 2% de las reservas de gas natural. Cabe hacer mención de que en estos casos, la principal motivación para el empleo del GNC en autobuses es de carácter ambiental (Anumita, 2010; Anil, 2011; Hossain, 2007; Rong, 2010; Yao, 2011).

En base a la información contenida en el cuadro anterior, es evidente que no existe correlación entre las reservas probadas de gas natural por país y el grado de masificación del uso de GNC.

En el caso de China, el sector transporte ha sido el de más rápido crecimiento en términos de energía consumida, demanda de combustibles y emisión de gases de efecto invernadero (Ou, 2010), destaca el hecho de que a pesar de que el número total de vehículos ha crecido en 60%, las emisiones de contaminantes del sector transporte no han crecido en la misma proporción, como consecuencia de la introducción de la flota de buses y taxis a GNC (Park, 2012; Wu, 2011).

La presente guía se elaboró tomando en consideración los estudios relacionados con el uso de GNC en los países mencionados en la Tabla 1, pues esta información permite valorar en forma comparativa la efectividad de los programas emprendidos e identificar las causas de éxito y fracaso de ellos. En el anexo se presenta información del desarrollo de los programas de GNC para Argentina, Brasil, Corea, España e India.

### **3. CONSIDERACIONES DE POLÍTICA Y REGULACIÓN**

Una vez que se dispone del abasto del combustible, el diseño, implantación y permanencia de los programas para el uso de GNC está condicionado al establecimiento de políticas adecuadas para el control del precio del combustible. En general, se observa que el éxito de los programas requiere de precios para el GNC del orden de 40% inferior al precio de los combustibles tradicionales Diesel y gasolina. Lo anterior en virtud de que este diferencial es el que permite la amortización del sobre costo de los autobuses a GNC respecto a autobuses a Diesel (que puede llegar a ser del orden de 60 mil dólares) por su parte, la amortización de las estaciones de carga de GNC puede tener un costo de alrededor de 1 millón de dólares (FTA, 2009).

En lugar del subsidio directo, es deseable el establecimiento de una política fiscal favorable para el gas natural. Programas como el de Nueva Zelanda, han colapsado por la desregulación del precio de los combustibles. La sustentabilidad a largo plazo de los programas medioambientales basados en uso del GNC solo es posible con estructuras



tarifarias de impuestos que establezcan un diferencial entre el precio de la gasolina y el Diesel y el del gas natural, como en el caso Argentino (Collantes, 2011).

El éxito de los programas de autobuses a gas natural depende en gran medida del compromiso gubernamental, que incluye la promoción del combustible alternativo y la permanencia de este compromiso en el tiempo. Los inversores deberán recibir señales claras y soportadas en códigos y reglamentos que permitan un horizonte de planeación de al menos 10 años. Generar la certidumbre necesaria y garantizar la continuidad de las políticas de promoción del combustible en el tiempo a pesar de los cambios de gobierno, se convierte en el principal reto a vencer para el empleo del GNC en países emergentes.

Se deberá establecer una política de precio vinculada al precio del Diesel. Mientras que el subsidio directo puede ser una alternativa para el inicio de programas a GNC, este mecanismo no garantiza la continuidad de los programas, ya que el otorgamiento y permanencia de estos subsidios está condicionado a la voluntad política del gobierno en el poder, por lo que estos programas difícilmente permanecerán inalterables a los cambios políticos.

Una política de promoción adecuada debería incluir incentivos fiscales para la importación de equipos de compresión y vehículos a gas natural para así favorecer el inicio de la implantación del GNC. Esto, acompañado de un marco regulatorio adecuado que claramente establezca prerrogativas a los autobuses de GNC y no a otros combustibles. La promoción simultánea de incentivos para la importación de autobuses que utilizan Diesel como combustible ocasiona que el inversor tenga que tomar decisiones de mayor riesgo cuando opta por vehículos a GNC. En este sentido, es evidente que el inversor optará por los combustibles tradicionales, como una manera de mitigar el riesgo asociado a la adopción de una tecnología que desconoce. Asimismo, ocasionará que los programas de implantación de GNC tengan una importante dependencia y sensibilidad al diferencial de precios entre el Diesel y el gas natural.

En algunos países existen incentivos fiscales para el consumo de Diesel que resultan inadecuados para las políticas de promoción del GNC, tal es el caso de Argentina, siendo esta la razón del fracaso en la adopción del gas como combustible en autobuses (Collantes, 2011).

Las políticas de promoción, deberán estar enfocadas principalmente al empleo de GNC en proyectos nuevos de sistemas de autobuses, asimismo, deberán considerar el reemplazo progresivo y gradual de autobuses a Diesel por autobuses nuevos a GNC y en menor grado, deberán promover de la conversión de autobuses para el uso de GNC. Lo anterior

obedece tanto a razones económicas como técnicas que serán expuestas en la sección 4 (Consideraciones Técnicas).

### **3.1. Recomendaciones de aspectos de seguridad en autobuses y estaciones de abasto.**

La normatividad en cuanto a aspectos de seguridad ha venido cambiando y requiere de un seguimiento estricto con el fin de evitar accidentes asociados a instalaciones deficientes o término de la vida útil de los componentes. Asimismo, es indispensable el cumplimiento de los códigos locales y resulta recomendable (y en ocasiones es mandatorio) el cumplimiento de estrictos estándares internacionales. La norma NFPA 52 de los Estados Unidos de Norteamérica contiene los requisitos necesarios aplicables al diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas para el suministro y consumo de gas natural, tanto para las estaciones de recarga como para los autobuses.

Adicionalmente y basándose en las mejores prácticas ingenieriles (Dursbeck, 2001; CNGVA, 2010; Trudgeon, 2005; APTA, 2000; Adams, 2010; NREL, 2006, Phani, 1996; California Energy Commission, 2009 ) y con el fin de mantener los más altos estándares en cuanto a seguridad, es recomendable que los autobuses que empleen gas natural como combustible incluyan en su diseño los aspectos generales que se mencionan a continuación y que no se encuentran explícitamente contemplados en la normatividad internacional:

1. Manejo y direccionamiento de flujos de calor en el motor y sistema de escape. El diseño del autobús debe evitar la acumulación de calor en el área del motor, con especial énfasis en la zona del turbo. Es importante mencionar que la acumulación de calor en el compartimiento del motor es mayor en los vehículos que utilizan GNC como combustible que en el caso de autobuses equipados con motores a Diesel y el fabricante del autobús deberá proveer los medios necesarios para disiparlo.
2. Instalación de un sistema de detección y extinción de fuego en el área del motor. Se recomienda que este sistema alerte al conductor, apague el motor, interrumpa en flujo de combustible y descargue el agente extintor en forma automática. Las boquillas de extinción deben ser orientadas a zonas de alto riesgo de incendio como el tubo de escape y el turbo. El sistema deberá extinguir el fuego en el compartimiento del motor en un tiempo máximo de 15 segundos y los detectores de fuego deben ser “normalmente abiertos”.
3. Ubicación del punto de transferencia (llenado de GNC) del autobús. Se recomienda ubicarlo lateralmente en el área del compartimiento del motor,

deberá disponer de un sensor que alerte al conductor en caso de apertura de la puerta de acceso y de un tapón de protección para el conector.

4. Uso de sistemas redundantes con el fin de garantizar el buen funcionamiento del sistema de suministro de gas. (Dobles sistemas de regulación de alta presión, por ejemplo).
5. Emplazamiento de manómetros y otros instrumentos en lugares adecuados para su uso durante labores de mantenimiento.
6. Ubicación óptima de válvulas solenoides para aislamiento cuando el autobús no está en uso o en caso de una fuga mayor. Cada cilindro deberá disponer de una válvula independiente con el fin de minimizar el volumen de gas descargado a la atmósfera en caso de fuga o actuación de un PRD (dispositivo de relevo de presión).
7. Instalación de un interruptor de desconexión de la batería en el compartimiento del motor, lo más cerca posible a la batería.
8. Para minimizar la posibilidad de impacto de objetos contundentes contra los cilindros de almacenamiento de gas, se recomienda la Instalación de estos en el techo del autobús. Los cilindros deberán disponer de una caja protectora para evitar los efectos del intemperismo, radiación solar, etc. Esta caja tendrá al menos la misma vida útil que el autobús. En caso de una fuga de gas procedente de un PRD, el diseño de la caja debe permitir la evacuación inmediata del gas por la parte superior. El emplazamiento de los cilindros de gas en el techo, permite a su vez el empleo de autobuses de piso bajo.
9. Se recomienda que los cilindros de almacenamiento de gas sean de tipo 3 y 4, es decir, recubiertos en su totalidad con fibras lineales. A pesar de que esta sugerencia representa un impacto en el costo de cada vehículo, constituye también una importante reducción en su peso y por ende en el desempeño general del vehículo (Trudgeon, 2005).
10. Establecer una vida útil de los cilindros de 20 o 25 años con el fin de que la vida útil del vehículo no exceda la de los cilindros. Lo anterior con el fin de evitar el impacto en el costo de sustituir los cilindros con el fin de mantener los autobuses en circulación. Esta recomendación es particularmente importante en aplicaciones en países en vías de desarrollo, donde los automotores suelen tener vidas útiles más largas que en los países desarrollados. Es importante señalar que no existe un mecanismo para alargar la vida útil de los cilindros y es necesario exigir que tengan una fecha de manufactura no anterior a 6 meses respecto a la fecha en la que se finque el pedido de los autobuses.
11. Para maximizar la autonomía de los autobuses, se recomienda la exigencia de sistemas de carga a 3,600 psi en lugar de las 3,000 psi usados en algunos

países. Además, los cilindros deberán de ser compatibles con los sistemas de carga con compensación de temperatura. Adicionalmente, se recomienda instalar la mayor capacidad de almacenamiento posible, de acuerdo con el diseño de las unidades. Estas medidas en su conjunto, reducen al mínimo la posibilidad de que las unidades interrumpan su ruta por causa de falta de combustible, a su vez, flexibiliza el sistema de suministro de gas en las estaciones, permitiendo cubrir una mayor demanda en horas pico, con el consecuente impacto benéfico en las capacidades de las estaciones para suministrar gas al público en general.

12. Instalación de un múltiple para descarga de cilindros desde los PRD de los cilindros. La descarga final del múltiple deberá conducirse a la parte superior del autobús libre de restricciones y el orificio de salida deberá estar protegido de la intemperie.
13. El diseño del autobús debe proporcionar protección de componentes críticos del sistema de suministro de combustible contra objetos del camino, herramientas mal manipuladas, actos de vandalismo, etc.
14. El radiador y el inter-enfriador del aire de admisión (en su caso) deberán estar situados uno al lado del otro, en ningún caso se permite ubicarlos en forma apilada. El sistema de refrigeración deberá de ser de un tamaño tal que evite el sobrecalentamiento del motor y de los fluidos de la transmisión aún en las condiciones más severas posibles. El sistema de control de los ventiladores deberá detectar en forma independiente la temperatura del aire de admisión y de los fluidos (refrigerante y aceite) y poner en marcha los ventiladores en cuanto la temperatura de cualquier fluido sea superior a la zona de seguridad. El sistema debe de ser a prueba de fallos, es decir, en caso de descompostura deberá mantener los ventiladores encendidos. Esta recomendación es particularmente importante en zonas tropicales.

En cuanto a las estaciones de abasto, adicionalmente a los requisitos establecidos en la NFPA 52, con el fin de incrementar los niveles de seguridad se recomienda lo siguiente (California Energy Commission, 1999, NREL, 2006):

1. La instrumentación de los sistemas de compresión y suministro de gas, esta deberá de ser de la mejor calidad y confiabilidad probada en estaciones de abasto de gas natural comprimido, es deseable el empleo de componentes análogos como termopares y transductores en lugar de interruptores mecánicos, ya que carecen de piezas móviles y posibilitan la automatización y monitoreo remoto de las estaciones.

2. Se deberá considerar un lote de componentes de uso común en la estación como termopares, transductores, interruptores, fusibles, válvulas de alivio, actuadores, cartuchos de filtros, etc. de acuerdo con la recomendación del fabricante del equipo.
3. Para las estaciones de abasto a autobuses, las válvulas de exceso de flujo contempladas en la NFPA 52 pueden resultar imprácticas, dado el alto caudal necesario para suministrar el gas a los vehículos en el tiempo requerido. En este caso, el dispensador deberá estar equipado con un sistema de paro de emergencia electrónico por exceso de flujo y deberá estar ajustado para en ningún caso suministrar un volumen de gas superior al requerido por el autobús de mayor capacidad considerado en el proyecto. Este sistema de paro, deberá desactivar todos los dispensadores en la isla de suministro y a los compresores, así como activar una alarma remota.
4. Adicional a los requisitos de seguridad establecidos, se recomienda que las mangueras de suministro de gas tengan las siguientes características:
  - ✓ Ser conductoras de la electricidad en su totalidad y que posean una malla de acero inoxidable.
  - ✓ Haber sido diseñadas y certificadas específicamente para el uso de gas natural comprimido.
  - ✓ Cuenten con una etiqueta permanente con el número de serie y con la fecha y presión a la que fueron probadas.
  - ✓ Sean sustituidas cada 12 meses o inmediatamente después de haber sufrido algún abuso. Se recomienda destruir las mangueras desechadas con el fin de impedir su reutilización.
  - ✓ Dispongan de un sistema de retracción o contrapesos para garantizar que no se arrastren en el piso ni golpeen elementos de la estación.
  - ✓ Impedir su conexión cuando exista alta presión en el conector del autobús, por calzado de la válvula anti-retorno, por ejemplo.
5. De igual manera, se recomienda que los surtidores posean las siguientes características:
  - ✓ Por razones medioambientales y de seguridad, la boquilla del dispensador deberá estar concebida para minimizar el volumen muerto entre el conector de llenado y el receptáculo del vehículo (Jenks, 1998), lo anterior con el fin de reducir al mínimo el volumen de gas que debe ser despresurizado al final de la carga de gas a cada autobús.
  - ✓ Que su diseño evite el venteo sistemático del gas a alta presión contenido en el volumen muerto del conector al desconectar la manguera al término de la carga del autobús. Para este fin, se sugiere instalar un sistema de

recirculación del gas hacia el secador o cualquier otro punto de baja presión en la estación.

- ✓ Por razones de seguridad y con el fin de maximizar la autonomía de los autobuses, es recomendable incorporar un sistema de carga con compensación por temperatura debidamente diseñado y certificado para optimizar el volumen de gas transferido a los autobuses evitando a su vez el sobrellenado de los cilindros.
  - ✓ Instalar al menos un filtro coalescente de drenado manual en cada surtidor. Estos filtros deben contar con protección contra una rápida despresurización y contemplar en su diseño la disposición final adecuada de condensados.
  - ✓ Cada manguera deberá suministrar gas desde el sistema de almacenamiento en forma independiente a cada autobús, aún cuando los llenados se realicen en forma simultánea a dos o más autobuses.
6. Previsiones para el vaciado de cilindros. Bajo ciertas circunstancias es necesario el vaciado del gas de un autobús (labores de mantenimiento, reparación de fugas, etc.). Para este fin, las estaciones de abasto deben disponer de medios adecuados para la reintroducción de gas desde el autobús hacia la succión del compresor a través de una o dos etapas de regulación para su recompresión y posterior reenvío al área de dispensadores. Este procedimiento permitirá despresurizar los cilindros hasta una presión ligeramente mayor a la de succión. Cabe hacer mención que el sistema de vaciado de cilindros deberá contar con válvulas de relevo para evitar que la presión aguas arriba del compresor exceda el valor máximo admisible. Los autobuses deben contar con una conexión de vaciado de gas y el diseño de las estaciones debe contemplar los detalles de compatibilidad entre conectores. Durante ciertas condiciones adversas y emergencias, puede ser necesario el vaciado de los cilindros de gas a alta presión directamente al venteo de la estación, sin realizar el vaciado de cilindros a la succión del compresor. Este tipo de emergencias, se refieren a la detección de una fuga en el cuerpo de un cilindro presurizado, por ejemplo.

### **3.2. Normativas medioambientales**

No solo resulta importante el cumplimiento de los estándares ambientales aplicables sino la permanencia de bajos niveles de emisiones en el tiempo. El incumplimiento de las normas medioambientales pone en riesgo el éxito de los programas de GNC, ya que elimina la principal motivación para su desarrollo.

Es importante mencionar que el convertidor catalítico de tres vías empleado como dispositivo de reducción de emisiones en los autobuses a GNC actuales, ha sido usado

desde hace más de 20 años en países desarrollados. Este dispositivo permite obtener niveles de emisiones empleando gas natural en vehículos pesados equiparables a los obtenidos empleando motores Diesel equipados con los últimos adelantos tecnológicos que incluyen complejos sistemas de control, sistemas de inyección de alta tecnología, convertidores catalíticos de última generación, trampas de partículas con sistemas regenerativos, etcétera (EPA, 2012); adicionalmente, los autobuses a Diesel actuales requieren del uso de Diesel de ultra bajo azufre (contenidos de azufre inferiores a 15 partes por millón, (Dunn, 2003)). Sin embargo, el Diesel de ultra bajo azufre normalmente no se encuentra disponible localmente en países en vías de desarrollo (UNEP, 2011), pues su producción requiere de tecnología de vanguardia e infraestructura, a diferencia del gas natural que se encuentra disponible en diversos países de América Latina. Utilizar gas natural como combustible para el transporte en Latinoamérica puede coadyuvar a la balanza energética de esta región del mundo, pues a través del consumo de un combustible localmente disponible, es posible liberar destilados de alto valor agregado como la gasolina y el Diesel con el consecuente impacto positivo en la economía.

Para obtener los niveles de emisiones estipulados en la normatividad EPA 2010 o en la EURO VI empleando Diesel, tal y como se mencionó, supone un nivel de sofisticación tecnológica mayor que empleando gas natural, lo cual afecta negativamente la fiabilidad de los vehículos y puede tener un impacto en los costos de operación de las flotillas. Por ello, el empleo de gas natural se presenta como una alternativa técnicamente viable y que resulta costo efectiva cuando la disponibilidad del combustible está garantizada de manera local.

En cuanto a los autobuses en circulación, si bien la conversión a GNC puede resultar atractiva por razones económicas, no permite obtener todos los beneficios que se obtienen con autobuses nuevos a GNC, pues los motores que de origen consumen Diesel o gasolina no son los adecuados para el uso de gas natural principalmente por lo que a su relación de compresión de refiere (Bradley, 2003; Malenshek, 2009). Asimismo, la instalación de los cilindros de almacenamiento de gas y la incorporación de dispositivos anticontaminantes como convertidores catalíticos no permiten obtener el mismo nivel de eficiencia que en un vehículo nuevo, tanto desde el punto de vista medioambiental y energético como de seguridad de la población en general (Taylor, 2008).

A pesar de que los principales fabricantes de autobuses a nivel mundial ofrecen trenes motrices de estratos tecnológicos que permiten obtener diferentes niveles de emisiones de acuerdo con las previsiones de la normatividad vigente en materia de emisiones contaminantes (EURO VI, 2009), es deseable que los autobuses a ser utilizados en los sistemas de transporte BRT sean vehículos nuevos con emisiones a la atmósfera iguales o

menores a las establecidas en la norma EPA 2010 o Euro VI, independientemente del país en el que se pretendan implantarse. Estos límites máximos permisibles se muestran a continuación:

**Tabla 2.- Límites máximos permisibles según EPA 2010 y Euro VI**

Ciclo de Prueba	Estándar de Emisión	CO (mg/kW*hr)	HCNM (mg/kW*hr)	CH4 (mg/kW*hr)	NOx (mg/kW*hr)	NH3 (mg/kW*hr)	PM (mg/kW*hr)	Vida útil
FTP Heavy Duty Transient Test (HDTT)	EPA 2010	20,800	190		270		13	700,000 km ó 10 años
European Transient Cycle (ETC)	Euro VI	4,000	160	500	400	10	10	700,000 km ó 7 años
World Harmonized Transient Cycle (WHTC)	Euro VI	4,000	160	500	460	10	10	700,000 km ó 7 años

Fuente: DELPHI, 2011.

Asimismo, se recomienda que los autobuses cumplan con los siguientes factores de deterioro de emisiones de carácter multiplicativo durante la vida útil del autobús.

**Tabla 3.- Factores de Deterioro EPA2010/Euro VI**

Ciclo de Prueba	Estándar de Emisión	CO	HCNM	CH4	NOx	NH3	PM	Vida útil
HDTT/ETC/WHTC	EPA 2010/ EURO VI	1.3	1.4	1.4	1.1	1.0	1.05	700,000 km

Fuente: DELPHI, 2011.

A fin de recabar información concerniente al mantenimiento de las unidades, los fallos mecánicos y excedencias en los niveles máximos permisibles de emisiones, los fabricantes de los autobuses deben permitir el acceso irrestricto y estandarizado a las autoridades o a quien estas designen a los sistemas de diagnóstico a bordo de los autobuses (OBD). En



relación con estos sistemas de diagnóstico, es importante señalar que a partir de la aplicación de la normatividad EURO IV, el operador de los autobuses pesados a Diesel está involucrado en el desempeño de los sistemas de control de emisiones, sin embargo, no fue sino hasta la aplicación de los sistemas OBD II, contemplados en la norma EURO V cuando el empleo de estos sistemas se generalizó a los motores de encendido por chispa (como es el caso de los autobuses a gas natural). Un sistema OBD II es capaz de detectar e indicar al operario mediante el encendido de una luz de advertencia en el tablero del autobús el funcionamiento errático de los sistemas de control de emisiones, detectar la causa origen del fallo y almacenarlo en una memoria electrónica para posteriormente transferirlo mediante protocolos establecidos por ISO. Se ha establecido internacionalmente los requerimientos generales de los sistemas OBD y los componentes que deben ser monitoreados (GTR 5, 2006):

- ✓ Tren de válvulas variable.
- ✓ Componentes eléctricos y electrónicos
- ✓ Sistema de refrigeración del motor
- ✓ Sensores de gases de escape
- ✓ Trampa o sistema de adsorción de NOx (en su caso)
- ✓ Sistema de ventilación positiva del cárter
- ✓ Sistema de combustible
- ✓ Sistema de sobrealimentación
- ✓ Válvula EGR (en su caso)
- ✓ Detección de problemas de encendido
- ✓ Sistema de control de ralentí

Asimismo, se establece que los sistemas OBD deberán estar diseñados para la misma durabilidad que el vehículo.

### **3.3. Recomendaciones para la implementación exitosa de autobuses a GNC.**

El cumplimiento de la normatividad es fundamental, pero también es importante disponer de un marco normativo flexible y de fácil aplicación que permita el cumplimiento de estándares con el mínimo impacto en la operación de los sistemas. Asuntos como la disponibilidad de repuestos, la capacitación de inspectores y el establecimiento de sanciones al concesionario de servicio en caso de incumplimiento, resultan trascendentales para la permanencia de sistemas de transporte a GNC en el tiempo.

Para la capacitación a inspectores, es necesario que los instructores posean los conocimientos técnicos generales y de fondo en el tema, así como contar con experiencia práctica del equipamiento de los sistemas de abastecimiento de los vehículos a gas natural y el uso de métodos didácticos como demostraciones, instrucciones, sistemas de apoyo visual y prácticos a efectos de garantizar una capacitación efectiva. La capacitación deberá dictarse en el idioma preferido por el equipo receptor y los manuales y materiales deberán estar disponibles para futuras consultas.

La capacitación incluye aspectos de seguridad, operación de los equipos y seminarios de aprendizaje teórico y práctico de cada operación, a efectos de proveer a los mecánicos e ingenieros del conocimiento básico para el manejo de los manuales de intervención de las unidades. Es conveniente que la capacitación incluya los siguientes temas específicos:

- Sistemas computarizados de diagnóstico a bordo, referido al sistema de control de emisiones, al mantenimiento programado, la detección de averías y cualquier tema que por su relevancia resulte de interés para el operador del sistema de transporte a GNC.
- Operaciones de abastecimiento y desabastecimiento de combustible.
- Revisión de cilindros. Caducidad, inspección de averías, etc.
- Herramientas especiales y procedimientos asociados al suministro y consumo de GNC.
- Procedimientos en caso de emergencia, activación, restauración y revisión de sistemas de alarma.

En relación con la vigilancia de sistema de autobuses a GNC, para garantizar su correcta operación, se recomienda realizar auditorías contemplando los siguientes aspectos:

- ✓ Seguridad
- ✓ Protección al medioambiente
- ✓ Eficiencia
- ✓ Gestión de las estaciones

Las siguientes faltas deben ser consideradas como muy graves y deberían ser motivo de importantes sanciones. Se recomienda que su reincidencia sea penalizada con la revocación de la concesión:

- ✓ Impedir el acceso a las instalaciones y autobuses de personal de supervisión asignado por la autoridad.
- ✓ No declarar modificaciones en las instalaciones que afecten su seguridad.
- ✓ Continuar utilizando equipos más allá de su vida útil o en condiciones que pongan en riesgo la seguridad del personal o de las instalaciones.
- ✓ Fallas en el sistema de detección de fugas de gas.
- ✓ Fallas en el sistema de paros de emergencia.
- ✓ Sobre llenado de cilindros de gas en autobuses.
- ✓ Llenado de cilindros en autobuses que presenten fugas.

- ✓ Vaciado de cilindros fuera del área diseñada para este fin sin presentarse una emergencia extrema o sin aviso a la autoridad competente.

Una de las principales consideraciones a tener en cuenta al impulsar el uso de buses a gas natural en una ciudad está asociada con los posibles gastos de inversión adicionales que esta tecnología implica. Los buses a gas natural son por lo general más costosos que los vehículos Diesel y tienen consumos más altos en términos energéticos (Posada, 2009; Kojima, 2001; CERI, 2009; Chemonics International, 2004). Esto implica que para que los operadores vean razonable el uso de estos vehículos, se deben ofrecer los incentivos financieros adecuados y un diferencial de precio respecto a los combustibles tradicionales atractivo. En muchos países el Diesel tiene beneficios tributarios y subsidios por parte del gobierno central. Es importante que antes de impulsar el uso de buses a GNC se pueda favorecer el precio del gas de una manera suficiente para compensar los mayores gastos involucrados en la adquisición de la flota.

También se deben considerar incentivos no monetarios como carriles exclusivos (que en el caso de los sistemas BRT forman parte de la definición de este tipo de sistema de transporte), menor frecuencia en inspecciones o menores restricciones de circulación que fomenten el uso de estos vehículos (Kojima, 2001). Otra herramienta con la que cuentan los gobiernos de ciudades o países interesados en el impulso de éstas tecnologías es la ejecución de demostraciones y estudios que ayuden a generar la confianza necesaria dentro de los operadores.

El precio del combustible no es el único factor que se debe considerar para apoyar el cierre financiero de iniciativas de GNC en las ciudades de hoy en día. El aprovechamiento de las economías de escala debe ser una variable que puede hacer la diferencia en estos procesos. Si bien en ciudades donde el sistema de transporte está constituido principalmente por muchas empresas pequeñas en lugar de pocas pero grandes prestadoras de servicio, la transformación de una parte importante de la flota será un desafío mayor y es importante considerar esta estrategia como una posibilidad de implementación.

Adicionalmente, el gobierno debe enviar señales de estabilidad y fomento del sistema mediante el apoyo al establecimiento de estaciones de distribución. Una estación de distribución con capacidad para atender cerca de 150 buses puede llegar a costar unos USD \$350,000 sin incluir los costos de importación de los equipos y otros impuestos (UNESCAP, 2012). Sin lugar a dudas la instalación de éstas va a depender en gran medida del apoyo que el gobierno esté dispuesto a ofrecer.

Otro tema importante es la disponibilidad y distribución del recurso. El cambio a gas natural permite la explotación de un nuevo combustible para el transporte pero sigue siendo un recurso no renovable. A pesar de que las reservas deben ser consideradas antes de impulsar un proyecto de gran envergadura, por lo general no resulta ser un tema decisivo, ya que las reservas con frecuencia exceden con creces las necesidades.

Tal y como se comentó en la sección 2, no parece haber una correlación directa entre la masificación del uso del GNC y las reservas probadas de la región, siempre y cuando exista la infraestructura necesaria para que el combustible esté disponible localmente para su importación. Por otra parte, el CNG puede ser visto como un combustible de fácil transición al gas natural licuado, al biometano e incluso al hidrógeno, con el consecuente impacto futuro. El biometano produce solo el 20% de los GEI que produce un combustible fósil (Thamsiroj, 2011).

Las mezclas gas natural-biometano son una alternativa factible en el mediano plazo y dada la incorporación de un componente renovable, permite la agregación de grupos promotores adicionales. Cabe hacer mención de que una mezcla 90% gas natural -10% biometano, permite reducir en 8% la emisión de GEI respecto al uso de gas natural 100% (CSE, 2010). En cuanto al gas natural licuado (GNL), dada su creciente comercialización a nivel mundial puede estar disponible en los mercados latinoamericanos y presenta ventajas respecto al GNC, tanto en términos energéticos, como de autonomía vehicular; estas ventajas están tienen su origen en el aprovechamiento del proceso de regasificación, que se realiza *in situ* en el automotor. Por otro lado, el uso de GNL como combustible vehicular presenta como principal inconveniente el costo de los sistemas de almacenamiento y la necesidad del venteo sistemático de combustible con el fin de mantener el combustible en fase líquida cuando las unidades se encuentran fuera de operación.

Es la distribución del recurso por medio de una red robusta y suficientemente confiable lo que en algunas oportunidades se convierte en un cuello de botella en la ejecución de programas de gas natural. La demanda de este recurso por parte de los sistemas de transporte no es suficiente para justificar grandes inversiones en redes nuevas, de manera que las ciudades deben tener otros sectores que aprovechen esta red, como el sector industrial, comercial o doméstico.

La confiabilidad de la red, definida como el número de días sin prestación del servicio como proporción de los días en servicio de la red, es otro factor determinante especialmente para el impulso de sistemas de transporte público (CGA, 2012). Una proximidad a la red de distribución de gas del orden de un kilómetro suele ser típica, sin

embargo, los proyectos de estaciones de llenado pueden ser viables para distancias a la red de 2 y hasta 3 kilómetros como en el caso Argentino.

En relación con lo anterior, el andamiaje regulatorio del sistema es fundamental y debe ser considerado cuidadosamente. Éste debe tratar temas como el cumplimiento de estándares internacionales de calidad del combustible, condiciones de los cilindros de gas y estaciones de abastecimiento, y el mantenimiento de los vehículos. El marco regulatorio jugará un papel fundamental sobre todo en ciudades donde el sistema actual sea desorganizado y con pocas herramientas de comando y control. Es común en muchas ciudades en vía de desarrollo encontrar sistemas de transporte desorganizados con esquemas de inspección insuficientes y que permiten condiciones laborales que poco benefician a los conductores y propietarios de vehículos.

Esto ha resultado en la circulación de vehículos en pésimas condiciones de mantenimiento que no cumplen con las especificaciones mecánicas de fábrica. En muchas oportunidades los altos niveles de emisión están asociados más al mal mantenimiento de los vehículos que a las tecnologías como tal. Bajo estas condiciones, independiente de si se emplea gas natural o Diesel, los resultados no serán los esperados. Nuevamente, por sus características esenciales, se observa que los sistemas BRT son excelentes candidatos al empleo de este combustible alterno.

Incentivar el uso de sistemas de transporte colectivo en ciudades emergentes con un enfoque netamente ambiental, requiere que los usuarios del automóvil encuentren en el sistema de transportación colectiva incentivos suficientes para abandonar la transportación individual. La existencia de estacionamientos, tiempos de espera y transporte adecuados, así como tarifas atractivas y amenidades con percepción de seguridad y modernidad pueden ser factores decisivos para el empleo de la transportación colectiva en sustitución del uso del automóvil particular, dando lugar a sistemas de transporte sustentables.

En este contexto, los sistemas de transporte de autobuses en carriles confinados, con unidades de alta calidad, rápidos, confortables y costo efectivos, son un ámbito ideal para la aplicación del GNC y son una alternativa al tren ligero con un costo 20 veces menor y al metro con un costo de 10 a 100 veces menor (Hensher, 2008). Resulta evidente que estos sistemas fácilmente podrían absorber el sobreprecio de las unidades a GNC respecto a los vehículos a Diesel y los costos de las estaciones de suministro de GNC con un impacto marginal en la inversión inicial y en el costo por persona transportada por kilómetro.

Sin lugar a dudas los autobuses urbanos y en particular los sistemas BRT poseen características que los hacen altamente atractivos para el consumo de GNC, en particular, su uso en zonas urbanas congestionadas y sus largos recorridos diarios en rutas bien

definidas permiten un rápido retorno de la inversión que representan respecto a autobuses convencionales a Diesel. Por otro lado, las condiciones transitorias de paro y arranque que suelen ser altamente contaminantes en motores a Diesel se ven mitigadas al emplear buses propulsados por este combustible alternativo (GTZ, 2006).

#### **4.- CONSIDERACIONES TÉCNICAS**

##### **4.1. Propiedades del gas natural comprimido (GNC)**

El uso de GNC como combustible vehicular suele ser más sensible a variaciones en la composición del combustible que otras aplicaciones del gas natural como podría ser la generación de electricidad (Malenshek, 2009). Por otra parte, los requerimientos de calidad varían para los diferentes fabricantes de motores de gas natural, pero en general se consideran un contenido mínimo de metano de entre 85% y 90%, contenidos máximos de propano de entre 2% y 9% y contenidos máximos de butano de entre 1% y 5% (McTaggart, 2010). Estas especificaciones están orientadas a vehículos ligeros, siendo los motores sobrealimentados de uso en vehículos pesados más sensibles a la calidad del combustible.

Para los sistemas BRT, recomienda un contenido mínimo de metano de 95% con el fin de establecer un factor de seguridad adecuado en los programas de uso de buses a GNC. Si la calidad del combustible no es la adecuada, los sistemas de ajuste de la relación aire-combustible funcionarán deficientemente dando lugar a mayores emisiones contaminantes y en ocasiones, a la pérdida de eficiencia de combustión. En condiciones extremas, la presencia de altos contenidos de propano y butano puede dar lugar a problemas de detonación y funcionamiento defectuoso y eventualmente pueden producir daños permanentes del motor (Graf, 2010). Existen otras propiedades del GNC que deben ser reguladas para la implantación exitosa de sistemas BRT y destacan por su importancia las siguientes:

Contenido de agua.- Debe ser limitado con el fin de evitar la presencia de agua líquida y partículas de hielo en el sistema de suministro de gas natural que pueden obstruir filtros, reguladores, líneas y cualquier otro componente del sistema, tanto en las estaciones de compresión como en los buses. Si el gas proporcionado por el concesionario presenta agua, debe ser secado en la estación de compresión antes del llenado de los vehículos. Se recomienda establecer un punto de rocío 6 grados centígrados inferior a la mínima temperatura ambiente esperada.

Contenido de azufre.- A pesar de que el contenido de azufre del gas natural suele ser mucho menor que el presente en el Diesel o las gasolinas, con el fin de obtener los mejores beneficios de este combustible alternativo es necesario controlar la presencia de este contaminante, pues envenena a los convertidores catalíticos. En particular, el proceso de oxidación del metano en los convertidores catalíticos es altamente sensible al contenido de azufre y como es sabido, el metano tiene un potencial como gas de efecto invernadero hasta 20 veces más alto que el bióxido de carbono (EPA, 2010).

Normalmente los contenidos de azufre en el gas natural son muy bajos, sin embargo, por razones de seguridad, algunos compuestos sulfurosos son adicionados con el fin de detectar el aroma en caso de fuga, es por esto que se debe tener especial cuidado en la cantidad de odorizante agregada al combustible. Se recomienda un contenido máximo de compuestos de azufre de entre 8 y 30 ppm, dependiendo de las recomendaciones de los fabricantes de automotores y de la calidad del gas disponible.

Residuos de aceite.- Normalmente proceden del sistema de lubricación del compresor y puede ser arrastrado hasta el vehículo durante el llenado de cilindros (Adams, 2010). Para que este aceite no interfiera con el buen funcionamiento de los reguladores de presión ni del sistema de inyección en general, puede ser eliminado instalando filtros tanto en la estación de llenado como en el vehículo, se recomienda un contenido máximo de aceite de 5ppm y un filtrado de partículas a 1 micrón.

Cabe hacer mención de que en el año 2008 fue aprobada y publicada la especificación DIN 51624 que establece las propiedades fisicoquímicas requeridas para el gas natural comprimido, es importante resaltar que no incluye residuos de aceite, a pesar de que es una propiedad relevante para la buena conservación de los vehículos. A continuación se presentan las principales propiedades incluidas en esta especificación:

**Tabla 4.- Especificaciones de GNC (DIN 51624 [2008])**

parameter	unit	min. value	max. value
CH <sub>4</sub>	Mol.-%	80	-
C <sub>2</sub>	Mol.-%	-	12
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Mol.-%	-	6
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Mol.-%	-	2
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Mol.-%	-	1
C <sub>6+</sub>	Mol.-%	-	0.5
CO <sub>2</sub> + N <sub>2</sub>	Mol.-%	-	15
total sulphur (inclusive odorization)	mg/kg	-	10
moisture	mg/kg	-	40
methane number	-	70	-

Fuente: Graf, 2010.

#### 4.2. Estaciones de llenado de GNC

Los sistemas de recuperación de gas en las estaciones pueden tener impacto ambiental si no son seleccionados de manera escrupulosa, asimismo, el uso de filtros de gas coalescentes y sistemas de acondicionamiento redundantes garantizan una operación satisfactoria de las estaciones y la mínima transferencia de compuestos indeseables a los autobuses. Por otra parte, el empleo de sistemas de alarma, monitoreo remoto o sistemas redundantes y de soporte eléctrico son deseables, pero representan costos adicionales que no en todos los casos son justificables.

El concesionario debe garantizar que el personal operativo de las estaciones cuenta con el entrenamiento necesario para la operación de los equipos mecánicos, eléctricos y de seguridad para el suministro de GNC en condiciones adecuadas y con la menor afectación posible al medioambiente. Asimismo, se recomienda capacitar a los equipos locales de bomberos en cuanto a los procedimientos de emergencia (como la desactivación y aislamiento de sistemas de almacenamiento y suministro) y la operación de los equipos de seguridad en las estaciones.

En el diseño de la estación, se deben contemplar las redundancias necesarias para evitar el paro no programado y la consecuente falla en el servicio de abastecimiento de GNC que repercute en deficiencias en el servicio en ruta de los autobuses. Las estaciones solo deberán detenerse durante los mantenimientos preventivos y de acuerdo al plan que se establezca al inicio de la operación del sistema. Esta sugerencia reviste particular importancia en los sistemas BRT, donde su éxito como medio de transporte alternativo a



la transportación individual depende en gran medida del estricto cumplimiento de los tiempos de traslado establecidos.

Es recomendable que la flotilla de autobuses a GNC disponga de los medios necesarios para el suministro del combustible en sus propias instalaciones, contemplado el dimensionamiento de los compresores y sistemas de almacenamiento de manera tal que sean capaces de suministrar el máximo consumo en hora pico y que adicionalmente exista un sobredimensionamiento de los equipos para soportar el consumo de los futuros autobuses, de acuerdo con los planes de expansión de la red de transportes y con la sustitución de autobuses que utilicen Diesel como combustible.

Con el fin de promover el uso de GNC en vehículos particulares y flotillas de automóviles, se recomienda instalar en las estaciones de abasto a autobuses, al menos una isla de dispensadores de tal manera que pueda suministrar el combustible de manera comercial. Esta práctica permite ayudar a gestionar la sobre oferta de gas originada por futuros consumos, a la vez que proporciona un medio valioso de promoción del GNC con una inversión mínima. Es importante señalar que los accesos de la estación para los autobuses y los particulares deberán ser independientes y es conveniente evitar la libre circulación de peatones.

También es importante proveer un cierto nivel de redundancia en las áreas de secado, compresión y dispensadores de gas con el fin de anticipar paros programados por mantenimiento de equipos y descomposturas. La no previsión de áreas para la ubicación futura de nuevos compresores por incremento en la demanda de gas, acarrea importantes erogaciones. Un diseño arquitectónico con superficies amplias y visibles contribuye a la imagen de seguridad que requiere el gas comprimido para su aceptación como combustible en vehículos privados (GE-N1-118).

En cuanto a la instrumentación de los sistemas de compresión y suministro de gas, deben de ser de la mejor calidad y confiabilidad probada en estaciones de abasto, es recomendable el empleo de componentes análogos como termopares y transductores en lugar de interruptores mecánicos, ya que carecen de piezas móviles y posibilitan la automatización y monitoreo remoto de las estaciones. Se debe prever la adquisición inicial de un lote mínimo de los instrumentos de uso común de repuesto, para evitar el paro no programado de la estación a causa de la descompostura de un elemento.

Se recomienda la instalación de un sistemas de monitoreo y alarmas que incorpore un módem para transmisión de condiciones de operación del compresor, transacciones realizadas y su estatus.

El sistema de control desactivará los compresores en los siguientes eventos:

- ✓ Baja presión de succión
- ✓ Alta presión de succión
- ✓ Alta presión de descarga
- ✓ Alta temperatura de descarga
- ✓ Baja presión de aceite
- ✓ Excesivos ciclos de paro/arranque
- ✓ Detección de gas en ambiente

El sistema de control de las estaciones deberá monitorear todas las instalaciones, incluyendo en particular los siguientes elementos:

- ✓ Compresores
- ✓ Dispensadores
- ✓ Válvulas prioritarias y secuenciales
- ✓ Sistema de vaciado de autobuses
- ✓ Sistema de compensación por temperatura
- ✓ Sistema de paro de emergencia

#### **4.3. Tecnología de los autobuses a gas natural.**

Este tema abarca aspectos de los procesos de combustión, de los sistemas de control de emisiones, de los sistemas de almacenamiento de combustible y de los requisitos indispensables para garantizar el buen servicio de los vehículos, tanto desde el punto de vista medioambiental, como de seguridad en el manejo de combustible y desempeño.

El factor que debe dirigir la escogencia de una tecnología específica en los sistemas de transporte público son las metas de emisiones en el futuro. Si bien los buses de gas natural pueden tener menores niveles de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), esta reducción es por lo general cercana al 10% (Hilal, 2006; Anil, 2011; Rong, 2010; Yao, 2011) sin considerar posibles aumentos en las emisiones de gases como el metano, sin embargo, estudios recientes (Ou, 2010; Rose, 2012) sugieren que la reducción de GEI al usar GNC puede ser superior al 20% considerando el ciclo de vida completo del vehículo y el combustible. Esta es una discusión que incluso hoy permanece abierta y las reducciones alcanzadas varían entre los distintos estudios (Hilal, 2006). Sin embargo, en términos de contaminantes criterio los beneficios del uso de autobuses a gas natural son indiscutibles. Las emisiones de material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) son sustancialmente menores y las de los óxidos de nitrógeno (NOx) también son menores a las registradas por autobuses a Diesel.

En el ANEXO B se presenta un análisis comparativo entre los motores a Diesel y los motores de ciclo Otto que utilizan gas natural como combustible.

Si bien es cierto que con el advenimiento de nuevas tecnologías para los motores a Diesel asociadas a la exigencias de niveles de emisiones más estrictos (EPA 2010, EURO VI) las ventajas comparativas del GNC se han visto reducidas, el requerimiento de Diesel de Ultra Bajo Azufre (ULSD por sus siglas en inglés) para estos vehículos dificulta su utilización en países emergentes que en general carecen de este combustible (UNEP, 2009). La utilización de gas natural en los países poco industrializados que disponen localmente del gas y son importadores de combustibles como el Diesel y la gasolina, pueden obtener los mismos beneficios ambientales que los países desarrollados al utilizar GNC y adicionalmente mejorar el balance de importaciones de refinados.

Como se mencionó anteriormente, los fabricantes de motores a Diesel se han visto obligados a la instalación de complicados sistemas de control de emisiones (Squaiella, 2012). El cumplimiento de los niveles exigidos en la normatividad EPA 2010 y EURO VI, demanda el uso de convertidores catalíticos oxidativos, filtros de partículas y sistemas de catálisis selectiva para la reducción simultánea de óxidos de nitrógeno y material particulado. La incorporación de estos dispositivos ha tenido un importante efecto en los costos operativos de estos vehículos y una reducción en la disponibilidad de los autobuses, asociada a la mayor complejidad tecnológica de los motores y sus sistemas de control (Calgary Transit Fleet, 2011; EPA, 2012).

Mientras que el nivel de sofisticación de los motores a Diesel ha tenido un incremento significativo en los últimos años, ocasionado por la continua demanda de niveles más estrictos de emisiones, los motores a gas natural requieren de sistemas de control de emisiones de tecnología probada, como los convertidores catalíticos de tres vías.

En un principio los fabricantes de motores a gas natural de servicio pesado optaron por el desarrollo de motores de mezcla pobre que permitían menores emisiones de NOx sin el empleo de dispositivos de postratamiento de gases de escape y sin sacrificar indicadores de desempeño como torque y potencia respecto a los vehículos Diesel (Posada, 2009). Este tipo de vehículos sin ningún tipo de sistema de control de emisiones cumple estándares como Euro III o Euro IV mientras que los buses de combustible Diesel requieren de filtros y bajos niveles de azufre (por debajo de 50ppm) para cumplir este mismo estándar.

Al enfrentar niveles más exigentes de emisión como EPA 2010 o Euro VI, los fabricantes han optado por el desarrollo de motores de combustión estequiométrica para cumplir las exigencias de emisión de los NOx. Si bien los motores de este tipo no son en sí mismos

más limpios, sí permiten la instalación de convertidores catalíticos de tres vías (TWC por sus siglas en inglés). Estos sistemas han permitido que los vehículos pesados a GNC se certifiquen como Euro VI y EPA 2010 incluso antes que los vehículos Diesel y sin la necesidad de tener combustibles con estándares de calidad difíciles de cumplir con es el caso del ULSD.

Algunos estudios sugieren que los buses a GNC con motores de combustión estequiométrica equipados con recirculación de gases (EGR) y catalizador de tres vías (TWC) presentan reducciones de hasta el 90% en las emisiones de NOx al compararlos con buses de gas natural con motores de mezcla pobre (Posada, 2009). Los motores de mezcla pobre no suelen cumplir los estándares Euro VI y solo pueden certificarse como Euro V si cuentan con catalizadores oxidativos. En este sentido, generar demanda por buses de gas natural vehicular con motores de mezcla pobre puede convertirse en un obstáculo para cumplir más adelante estándares de emisión más exigentes.

La Tabla 1 muestra las tecnologías necesarias para cumplir los diferentes estándares. Dicha tabla es una adaptación de la presentada por Posada. Para una explicación más completa de cada sistema y sus implicaciones en términos de desempeño mecánico y ambiental, se recomienda al lector referirse a dicha publicación.

**Tabla 5.-Resumen de tecnologías de motores propulsados por gas natural necesarias para cumplir los estándares europeos de emisión.**

<b>Estándar de emisión NOx/PM (g/kWh)</b>	<b>Tipo de Combustión</b>	<b>Sistema de mezclado</b>	<b>Sistema pos tratamiento de gases</b>
<b>Euro III - 2000 5.0/0.016</b>	Mezcla pobre	Válvula de regulación (throttle) o inyección multipunto (preferiblemente). De circuito abierto/sensor lambda	Ninguno
<b>Euro IV - 2005 3.5/0.030</b>	Mezcla pobre	Circuito cerrado /sensor universal de oxígeno (sensor de oxígeno de rango amplio)	Catalizador oxidativo <i>Durabilidad: 500.000km o 7 años</i>
<b>Euro V - 2008 2.0/0.030</b>	Mezclado (mezcla pobre y estequiométrico) o combustión estequiométrica + EGR y turbocargado	Circuito cerrado/sensor universal de oxígeno (sensor de oxígeno de rango amplio) + sensor lambda secundario	Convertidor catalítico de tres vías (TWC) con oxidación de metano <i>Durabilidad: 500.000km o 7 años</i>
<b>Euro VI - 2013 0.4/0.010 (niveles propuestos)</b>	Combustión estequiométrica + EGR con refrigeración y turbocargado. Diseño mejorado de la cámara	Circuito cerrado/sensor universal de oxígeno (sensor de oxígeno de rango amplio) + sensor lambda secundario	Convertidor catalítico de tres vías (TWC) con oxidación de metano a temperaturas menores a los 350°C

	de combustión y sincronización del sistema motor/TWC		<i>Durabilidad: 700.000km o 7 años</i>
--	--	--	--

Fuente: Posada, 2009

En general, el consumo de combustible de un autobús depende de las características tecnológicas del tren de propulsión y es posible comparar directamente el consumo de combustible para las diferentes tecnologías sin considerar las condiciones de operación ni los pesos vehiculares, ya que se puede suponer que las unidades a GNC a utilizarse en sistemas BRT tendrían las mismas condiciones operativas que vehículos equivalentes empleando Diesel como combustible.

En términos de rendimiento de combustible, mientras que el de un bus a Diesel puede ser del orden de los 60 litros/100km, al expresar el consumo de GNC en su equivalente energético de Diesel (considerando 35,700 kJ/litro), un bus de combustión estequiométrica alcanza los 75 litros/100km y uno de mezcla pobre puede superar los 80 litros/100km (Pelkmans). Estas diferencias tienen su origen en la mayor relación de compresión característica de los motores a Diesel respecto a los de ciclo Otto.

## 5.- OTRAS CONSIDERACIONES IMPORTANTES

### 5.1. Necesidades adicionales para la implantación de autobuses a GNC

La existencia de piezas de recambio y personal capacitado para el mantenimiento de las unidades y estaciones de servicio es fundamental para la permanencia de los programas. Es importante reconocer que los vehículos a GNC tienen requerimientos de mantenimiento adicionales a los de vehículos similares a Diesel y estos mantenimientos suele ser más frecuentes. Lo anterior en virtud de los motores de ciclo Otto poseen componentes específicos que por sus propias características tiene una vida útil menor a la de los componentes de los motores a Diesel.

La capacitación de los operadores del sistema, en particular en aspectos críticos como el término de la vida útil de los cilindros de almacenamiento o la inspección de los mismos por daño mecánico, son indispensables para la operación segura de las unidades.

El impulso de cualquier nueva tecnología implica programas ambiciosos de capacitación. Es claro que el mantenimiento y reparación de buses de GNC requiere de habilidades específicas que difieren a las requeridas para vehículos a Diesel o a gasolina. Por consiguiente debe haber un entrenamiento adecuado de conductores y mecánicos que permita el desempeño deseado de los buses. Este hecho cobra importancia al considerar que el sistema de suministro de GNC opera a altas presiones y puede dar lugar a

accidentes graves si no se operan con los márgenes de seguridad requeridos. Si en principio las capacidades técnicas de las ciudades o países no son suficientes o satisfactorias se puede acudir a instituciones y especialistas internacionales. Sin embargo es deseable que se generen los procesos necesarios para que el conocimiento local aumente y en el corto o mediano plazo no sea necesaria la asistencia extranjera (Kojima, 2001).

El óptimo desempeño de un autobús a gas natural depende por un lado de la calidad del combustible, pero también de la realización de mantenimientos preventivos y correctivos y para esto es indispensable el establecimiento de programas de capacitación y servicio técnico adecuados. La adquisición de unidades y estaciones de servicio a fabricantes y distribuidores que no disponen de la representación técnica y comercial en el país receptor, frecuentemente es causa de deficiencias operativas del sistema que frecuentemente es ocasionada por desabasto de repuestos o ausencia de personal técnico debidamente capacitado.

Para garantizar el éxito en la implantación de sistemas de autobuses gas natural y su permanencia en el tiempo se emiten las siguientes recomendaciones:

Desde el planteamiento inicial de los sistemas a GNC, se debe contemplar la capacitación requerida para el uso de este combustible alternativo (Adams, 2010), incluyendo el aprovisionamiento de los manuales de los equipos en el idioma oficial del país receptor, o en su defecto, contemplar desde un inicio la necesidad de contratar personal técnico 100% bilingüe.

Se recomienda garantizar el aprovisionamiento de un lote de los repuestos indispensables como parte de la procura inicial de los autobuses y estaciones de servicio, asimismo, se debe disponer de los programas de mantenimiento preventivo desde el inicio de operaciones del sistema de transporte. Estas medidas, permiten establecer una mecánica de responsabilidad compartida entre los proveedores de los equipos, la empresa operadora y las autoridades con el fin de resolver *a priori* posibles fallos técnicos que podrían desencadenar en la operación deficiente de los vehículos. En este sentido, el establecimiento de sanciones por parte de la autoridad y mecánicas de solución de conflictos asociados a la descompostura de vehículos en periodo de garantía que no afecten la calidad del servicio ofrecido por los buses resulta primordial. Si bien el principal incentivo para el uso del GNC en autobuses es el medioambiental, el buen funcionamiento y fiabilidad de la red de buses es indispensable para garantizar la satisfacción del usuario, particularmente en sistemas BRT.

Otro aspecto fundamental para el funcionamiento eficiente de la red de autobuses a GNC, versa en torno a su dependencia con la red de suministro de electricidad. A pesar de que los autobuses a Diesel también requieren de energía eléctrica para suministrarles el combustible, en caso de fallo en la red eléctrica el soporte requerido es de menor capacidad que para un compresor de gas natural. Asimismo, como se mencionó anteriormente, por razones de espacio disponible para el almacenamiento del gas, los autobuses a GNC podrían tener menores autonomías que vehículos similares a Diesel, lo cual puede ser especialmente crítico en los sistemas BRT, donde los recorridos diarios suelen ser considerables.

Cuando se opta por el empleo de sistemas de carga lenta (que representan ahorros sustanciales en los requerimientos de capacidad de compresión instalada y sistemas de almacenamiento en estación) resulta indispensable la previsión de un sistema de respaldo de energía eléctrica.

## **5.2. Seguimiento de los programas de autobuses a GNC**

El establecimiento de criterios de evaluación y seguimiento de los sistemas BRT en el tiempo favorece el adecuado desempeño de las flotillas desde todos los puntos de vista. En particular, cuando se emplea gas natural comprimido como combustible es relevante el seguimiento de parámetros operativos como el tiempo de llenado por autobús, la limpieza y sustitución de filtros, los tiempos de paro no programado de los compresores y en general cualquier situación que eventualmente conduzca a la interrupción del servicio, que como resultado final conducirá a la reducción de la disponibilidad de los sistemas BRT con la consecuente afectación de las velocidades promedio, los tiempos de traslado, desincentivado el empleo del transporte colectivo respecto a la transportación individual.

Se recomienda el empleo de sistemas compatibles con el monitoreo remoto de estaciones, sin embargo, a pesar de que es creciente el uso de monitoreo a distancia, no en todos los casos puede resultar una opción viable, tanto por cuestiones asociadas al costo de los equipos de supervisión, como por las dificultades técnicas que pueden conducir a su mal funcionamiento. Es posible que por razones de costo pueda resultar más segura la supervisión *in situ*.

De igual manera, a pesar de la complejidad de los equipos de compresión y sus sistemas de monitoreo, las prácticas comunes de supervisión, basadas en la inspección ocular y auditiva detallada, puede resultar más eficiente que la operación instrumentada sin

vigilancia presencial. Por otra parte, el monitoreo remoto de los sistemas de emergencia como detectores de fuego o altas concentraciones de metano, resulta no solo deseable sino en ocasiones indispensable, pues permite la alerta temprana de los cuerpos de bomberos y autoridades locales avocadas a labores de contingencia que pueden evitar fallas catastróficas.

Es aconsejable la documentación a las autoridades de los siguientes eventos:

Mantenimientos adicionales a los establecidos en los Programas. De acuerdo con los fabricantes de equipos, deberá ser proporcionado un programa de mantenimiento preventivo anual. En caso de intervenciones de emergencia o paros no programados, se debe elaborar un reporte de las operaciones realizadas así como de las causas que condujeron a la intervención.

Notificación de paros de emergencia. Adicional a los sistemas de alarma locales, es conveniente notificar al personal técnico la activación de un interruptor de emergencia manual o la operación del sistema automático de paro empleando los medios electrónicos adecuados.

Registro y documentación de eventos. Para fines de evaluación de la calidad del servicio, elaborar reportes periódicos de la operación de las estaciones y los autobuses, incluyendo activaciones de paros de emergencia manuales y automáticos. Estos reportes deben incluir las intervenciones de mantenimiento programado y no programado y su duración abarcando tanto a los autobuses como a las estaciones de suministro de gas.

Por los riesgos que entraña la operación de sistemas a alta presión y su dependencia con el estado de los sistemas de suministro y consumo de gas natural a alta presión, es necesaria la supervisión de todos los elementos que podían desencadenar una falla catastrófica. Cualquier elemento del sistema que presente señales de abuso o deterioro deberá ser sustituido.

En particular, los cilindros de almacenamiento y las mangueras de suministro de gas tienen vidas útiles establecidas y adicionalmente deben ser sustituidas cuando estén involucrados en un accidente o presenten niveles de deterioro inadmisibles, de acuerdo con criterios específicos fijados para este fin. Es por esto que resulta importante contemplar las necesidades de capacitación de la autoridad –o de quien esta designe- en cuanto a la revisión de los sistemas de suministro del combustible. Asimismo, se recomienda establecer *a priori* reglamentación en cuanto a la disposición final de los sistemas reemplazados, para garantizar que no sean reutilizados para el uso de GNC o cualquier otra aplicación que resulte en riesgos innecesarios.



Finalmente, vale la pena mencionar la importancia de incluir variables de desempeño ambiental en la evaluación de éxito de las flotas de transporte público (Chemonics, 2004). La motivación detrás de los cambios de tecnología debe ser entendida y compartida tanto por los tomadores de decisión como por los operadores. Medir y premiar buenos resultados ambientales asociados a su flota permite que la importancia de los cambios sea reconocida y valorada.

## **ANEXO A. Análisis de programas de GNC.**

### **Utilización de GNC en Argentina.**

Por su importancia a nivel mundial y su permanencia durante más de 30 años, el programa de utilización de gas natural comprimido en vehículos ligeros Argentino aporta valiosa información acerca de los factores que promueven el éxito de estos programas y su permanencia en el tiempo. En este sentido, el desarrollo de una política de regulación de precios ha sido determinante para la adopción del GNC (GE-N1-118, Collates, 2011). A inicios de la década de los 80's, en Neuquén se descubrió el yacimiento de gas natural más importante de Sudamérica y Argentina dependía –y continúa dependiendo hasta nuestros días- de las importaciones de Diesel.

A partir del descubrimiento de los yacimientos de Neuquén, el gobierno Argentino visualizó la posibilidad de afrontar el desbalance energético a través de la sustitución de Diesel por gas natural en el sector del transporte público a través del Plan de Sustitución de Combustibles Líquidos adoptado en 1984. En cuanto a la aplicación del GNC en los autobuses argentinos, a pesar de que las limitaciones tecnológicas, no representaban un reto dada la experiencia previa de Nueva Zelanda e Italia, existieron tres factores que ocasionaron el fracaso de estos programas:

- Existencia grupos de presión política importantes que soportaban –y continúan soportando- el uso de Diesel como combustible en los autobuses.
- La resistencia de las compañías de transporte urbano a cambios en el manejo de sus flotillas para absorber los gastos que representa la coexistencia de las dos tecnologías (Diesel y GNC) en la misma flotilla.
- La política de precios fijada por el gobierno que otorgaba –y continúa otorgando- al Diesel ventajas competitivas respecto al GNC.

Si bien el programa de utilización de GNC en autobuses fracasó, el empleo de este combustible en vehículos ligeros fue un éxito rotundo. A partir de 1983, la Secretaría de Energía del gobierno Argentino dirigió a través de resoluciones, la creación de comités para el desarrollo de la industria del GNC mediante la implementación de las reglas y códigos necesarios para el suministro y consumo de carburante a partir de los reglamentos y estándares utilizados anteriormente por Italia. En virtud de la precepción pública de inseguridad asociada al uso de un combustible gaseoso almacenado a alta presión, el desarrollo de los estándares de seguridad tuvo un acentuado enfoque en la promoción de la imagen del GNC como un combustible seguro.

Posteriormente, en 1985 se decretó la resolución 30/85 que fijó el precio del GNC al 45% del precio de la gasolina Premium. Después, al ser privatizadas las empresas Gas de Estado y Yacimientos Petrolíferos Fiscales en 1992 y 1993 respectivamente, la distribución del gas se desagregó en 8 distribuidores y su transporte en dos compañías independientes.

La resolución 30/85 y la desregulación del gas fueron los hechos más significativos que condujeron a la masificación en el uso de GNC en vehículos ligeros en Argentina. Sin embargo, esta masificación está asociada a la crisis de los combustibles y frecuentemente continúa percibiéndose al GNC de manera negativa respecto a la gasolina, pues requiere de frecuentes recargas de combustible (por menor autonomía vehicular) y está asociado a la pérdida de espacio de almacenamiento en los automóviles, pues requiere de tanques de almacenamiento en el maletero.

Aún después de la privatización de Gas del Estado y Yacimientos Petrolíferos Fiscales, el Estado Argentino tiene influencia directa en el precio del Gas Natural, a través del control de impuestos a los energéticos.

En cuanto al desarrollo de infraestructura para el GNC, uno de los hechos que facilitaron la masificación su en Argentina, fue la existencia de una red de transporte y distribución de gas suficientemente desarrollada previa al inicio del programa. Argentina cuenta actualmente con una red troncal de 11,000 km y 93,000 km de líneas de distribución. A partir de estas redes desarrolladas previamente, fue posible iniciar la instalación de estaciones de recarga de gas natural.

En 1984, el Gobierno Argentino inauguró dos estaciones públicas con el fin de constituir una percepción de seguridad en el manejo del combustible y un mostrar un compromiso gubernamental para el uso del GNC. Estas estaciones fueron localizadas en intersecciones transitadas y en lugares visibles; es importante mencionar que la inversión estatal en estaciones de recarga de GNC estuvo limitada a tres estaciones, sin embargo, la política del gobierno permaneció enfocada al desarrollo de confianza y reducción de incertidumbres para los inversionistas a través del establecimiento de normatividad y reglamentación. De igual manera, el estado inició la demanda de GNC a través de la conversión de una flotilla de 300 vehículos de Gas del Estado y el apoyo financiero para la conversión de 300 taxis en la ciudad de Buenos Aires en 1984.

Dependiendo del tipo de estación, el punto de equilibrio (ventas mínimas para que la estación sea viable) es del orden de 90,000 a 100,000 m<sup>3</sup> /mes, dependiendo del tipo de estación.

Típicamente, la distancia de una estación al punto de conexión al gasoducto suele ser menor a 1 km, pero puede llegar a ser de hasta 2 o 3 km.

En el caso Argentino, la financiación del programa por parte del estado ha sido limitada, el estado prácticamente se ha avocado a la emisión de normatividad y estándares con un importante énfasis en aspectos de seguridad y en el establecimiento de compromisos claros e incentivos económicos a través de la regulación del precio del combustible.

El envío de señales claras, confiables y permanentes en cuanto al precio del gas natural y sus tendencias en el tiempo permite establecer rentabilidades claras para las estaciones de suministro. A su vez, favorecer la estabilidad en los costos de compresión a través de una política de precios en los insumos como electricidad y otros, facilita la correcta planeación de los periodos de recuperación de la inversión por parte de las empresas operadoras de flotillas de autobuses a través del sobreprecio del GNC respecto al Diesel y las gasolinas.

La eliminación de restricciones en cuanto a distancia mínima entre estaciones favoreció el interés de compañías petroleras en el establecimiento de estaciones de recarga. Posteriormente, la concesión del proceso de certificación de estaciones a las compañías distribuidoras de gas natural provocó el Interés de los distribuidores en el éxito del programa de GNC y el establecimiento de mecánicas de inspección y aprobación eficientes y sucintas.

La promoción para el uso de vehículos a GNC mediante el control del diferencial de precios entre combustibles, ha ocasionado patrones de incremento en el consumo que difícilmente son sostenibles en el tiempo. Las reservas probadas de gas en Argentina ya nos son tan abundantes como hace algunos años y los incentivos para inversión en exploración son insuficientes, lo que hace necesario el desarrollo de políticas que incentiven esta actividad para garantizar los futuros mercados.

### **Utilización de GNC en Brasil.**

El GNC se introdujo en el mercado de combustibles en Brasil a finales de los ochentas, sin embargo, su consumo comenzó a crecer significativamente hasta mediados de los noventas, como resultado de la política gubernamental que fijó una diferencia sustancial en el precio a favor del GNC respecto a la gasolina como una manera de promover el consumo del gas natural importado desde Bolivia (Looty, 2009). La industria automotriz Brasileña (a excepción del fabricante Fiat) no produjo motores diseñados para el consumo de gas natural, sino que los clientes debían adquirir e instalar el sistema de suministro de gas. Esta situación permanece hasta nuestros días, con una modesta participación en el mercado de vehículos diseñados originalmente para consumir GNC, lo que ocasiona un incipiente aprovechamiento de las ventajas en la eficiencia energética que ofrece el GNC,

pues se consume en motores que fueron originalmente diseñados para otros combustibles.

La mayor parte del GNC en Brasil se utiliza en vehículos utilitarios ligeros y taxis en lugares dotados de redes de estaciones de carga de gas como Rio de Janeiro y Sao Paulo. El consumo de GNC ha tenido un crecimiento sostenido, y actualmente, junto con los vehículos denominados “Flex-fuel”, que son capaces de consumir gasolina, etanol o sus mezclas, constituyen una alternativa al diesel y la gasolina en el mercado de los combustibles.

Al igual que en Argentina, el GNC se considera un combustible inferior a la gasolina y al Diesel y al utilizarlo se presentan inconvenientes como la pérdida del espacio disponible en el maletero y la menor autonomía, sin embargo, estos inconvenientes se compensan con el menor precio del combustible.

En el período comprendido entre los años 1991 y 2005, el consumo de GNC tuvo un crecimiento anual del 58%, desde 2,000 hasta 1,171.000 vehículos ligeros. Para el mismo período el crecimiento del parque vehicular a gasolina y diesel tuvo un modesto crecimiento del orden del 3% (Looty, 2009).

En Brasil, el uso del GNC está avocado a los vehículos ligeros y es el propietario del vehículo el que decide instalar el sistema de suministro de GNC, con la única motivación de ahorrar costos de combustible. En virtud de lo anterior, esencialmente los taxis y vehículos con recorridos urbanos regulares son los principales consumidores de este combustible.

### **Utilización de GNC en India.**

A diferencia de Argentina y Brasil, en la India el uso del GNC no se inició por razones de diversificación energética, sino como una alternativa tecnológicamente factible para reducir la contaminación en grandes ciudades como Delhi y Mumbai en los años noventa, cuando el combustible Diesel en este país tenía contenidos de azufre hasta de 10,000 ppm (UNEP, 2009; Dursbeck, 2001; Anil, 2011). Mediante el uso del GNC en sustitución del Diesel, fue posible lograr niveles de emisiones de NOx y partículas menores en las flotas de autobuses.

Esta primera generación de autobuses cumplían con los estándares de emisiones EURO II empleando motores estequiométricos y controles de relación aire combustible mecánicos operados por potenciómetro y sensor de oxígeno en gases de escape. Mediante ésta

estrategia se posibilitó el empleo de convertidores catalíticos de tres vías y permitió drásticas reducciones en las emisiones de material particulado (hasta 46 veces menores emisiones) acompañado de modestas reducciones de NOx respecto a los autobuses a Diesel.

En India, los programas de conversión de flotillas de autobuses a GNC ha sido la medida medioambiental que mayor impacto ha tenido en la calidad del aire en ciudades, asociado a los largos recorridos urbanos de estos autobuses. Adicional a las ventajas mencionadas, en India el GNC ofrece la ventaja de ser un combustible no adulterable, lo que representa una importante protección para los dispositivos anticontaminantes como los convertidores catalíticos.

En Mumbai, el programa para el uso de GNC tuvo un importante apoyo gubernamental por razones ambientales principalmente, sin embargo, el interés comercial de las flotillas de taxis también jugó un papel decisivo en la masificación.

En el caso de Delhi, la promoción del GNC comenzó a partir de la disponibilidad de gas natural en la ciudad a inicios de los años noventa con un incipiente plan de conversión a GNC. Fueron abiertas dos estaciones públicas por el Gobierno y este propuso la conversión voluntaria a vehículos de flotillas. El mayor apoyo vino a partir de la intervención del estado en 1998, mediante la publicación de un programa de promoción del control de la contaminación ambiental que incluyó las siguientes medidas:

- ✓ Reemplazo de los taxis modelo 1990 y anteriores por vehículos nuevos que emplearan combustibles limpios a partir del mes de marzo del año 2000.
- ✓ Incentivos financieros para la sustitución de vehículos modelo 1990 y posteriores por vehículos que emplearan combustibles limpios.
- ✓ A partir de abril del año 2000, los autobuses con más de 8 años, solo podrían utilizar GNC u otros combustibles limpios.
- ✓ Para marzo de 2001, todos los autobuses urbanos deberían utilizar GNC.
- ✓ El Gobierno Indio aumentaría de 9 a 80 estaciones de carga de GNC para el mes de marzo de 2000.

Cabe hacer mención de que a pesar de que en 1991 el Gobierno incluyó en la definición de combustible limpio al Diesel con 10 ppm de azufre, este combustible no se comercializa en India, lo que implica que el único combustible susceptible de empleo en autotransporte urbano es el GNC.

En el año 2002, después de la exitosa implantación del GNC en Delhi, el estado identificó otras 14 ciudades con problemas de contaminación y emprendió otros programas de GNC

como un combustible limpio e inadulterable, en las ciudades en las que el gas natural no está disponible, el uso de gas licuado como combustible se considera una alternativa.

En cuanto a la tecnología de los motores, en la India se comenzó con motores estequiométricos, pero conforme migraron a los estándares Euro III, fue necesario el uso de motores de mezcla pobre, semejantes a los utilizados en los Estados Unidos en los años noventa. Sin embargo, han identificado que estos motores de mezcla pobre no poseen ventajas respecto a los motores a Diesel en cuanto a emisiones de NOx se refiere.

En la India existe preocupación acerca de la pertinencia de convertir vehículos antiguos a Diesel al uso de GNC. Esta conversión es particularmente complicada y puede ocasionar incremento en las emisiones si no se realiza de manera apropiada.

En 2010, 11 ciudades de la India estaban en proceso de introducción de vehículos a GNC con tecnología Euro IV.

Uno de los principales inversores en autobuses a GNC es “Delhi Transport Corporation” que pertenece al Estado. Esta empresa ha decidido adquirir exclusivamente autobuses nuevos a GNC y no realizar conversiones a partir de vehículos a Diesel.

Durante 2001-2002, después de algunos accidentes que involucraron incendios en autobuses, se determinaron las siguientes causas de los sucesos:

En vehículos a GNC de origen:

- ✓ Daño en tuberías de alta presión.
- ✓ Desprendimiento de tuberías de los sistemas de fijación.
- ✓ Falla de PRD's, relevo de presión a través de discos de ruptura.
- ✓ Corto circuitos.
- ✓ Escasa flexibilidad de líneas de gas a alta presión.

En vehículos convertidos a GNC:

- ✓ Mala calidad de la conversión.
- ✓ Ausencia de medios para relevar tensión en líneas “loops”
- ✓ Insuficientes abrazaderas de sujeción de líneas.
- ✓ Proximidad de tubo de escape a cilindros de almacenamiento.
- ✓ Ausencia de escudo protector de calor en cilindros.
- ✓ Ausencia de tapones protectores del punto de llenado.

En cuanto a la política de promoción del GNC, en la India no existen incentivos fiscales para el suministro y consumo, sin embargo, existe un subsidio directo al precio, a través del mecanismo de administración del precio del gas que aplica para ciertos consumidores entre los que se incluye el GNC, sin embargo, solo los programas de GNC de Delhi y Mumbai se vieron beneficiados por estos incentivos. Este mecanismo de subsidio está en proceso de eliminación, dando paso a las tarifas comerciales que establece el libre mercado.

En cuanto al precio respecto a los combustibles convencionales en Delhi, en junio de 2010, el precio de la gasolina y el Diesel eran 46.5% y 31.4% mayores que el precio del GNC. Con el fin de incentivar el uso del gas, el gobierno Indio aumenta periódicamente el precio de los combustibles líquidos, permitiendo un balance de costo-beneficio positivo hacia el GNC.

En la India existe una política de liberación de precios, por lo que la brecha entre el precio del Diesel y del GNC se está acortando. Cuando el diferencial de precio entre el Diesel y el GNC es del orden de 50%, el período de recuperación de la inversión es del orden de dos a tres años, mientras que si el Diesel es solo 30% más caro que el GNC, el periodo de recuperación es de entre 3 y 5 años. Lo que reduce el atractivo del gas.

### **Utilización de autobuses a GNC en España.**

La Ley de 11/02/05, por el que se incorporan al ordenamiento jurídico español diversas directivas comunitarias en materia de fiscalidad de productos energéticos, establece un impuesto para el gas natural en su uso como carburante de 0,4140 euros/kWh (1,15 euros/GJ) (6,5 veces menor que el del Gasóleo).

La Empresa Municipal del Transporte (EMT) de la Comunidad de Madrid, ha tenido un crecimiento sostenido en la utilización del GNC en sus autobuses desde el año 2005. Hoy en día, los 787 autobuses a GNC representan casi el 40% de su flota. Esta empresa identifica al GNC como uno de los combustibles más limpios, con compatibilidad con flotas a Diesel, con un precio estable y con suministro garantizado. Este combustible representa la mejor alternativa a corto y mediano plazo para la sustitución progresiva de autobuses a Diesel, tanto por su coste como por la protección al medio ambiente.

En función de los buenos resultados obtenidos, la EMT-Madrid, decidió que a partir de junio de 2010, todos los motores térmicos que se incorporen a su flota deberán de ser impulsados por combustibles gaseosos. En el mediano y largo plazo, el uso de CNG se



presenta como una alternativa atractiva en vehículos híbridos eléctricos-gas natural (Terron, 2011).

### **Utilización de autobuses a GNC en Corea.**

A raíz de la promulgación del protocolo de Kyoto en 1997 entre otras medidas, a principios de este siglo el gobierno Coreano lanzó el programa para la utilización de gas natural en autobuses, abarcando Ciudades a las grandes ciudades, entre ellas Seúl (Park, 2012). A la fecha, del orden del 50% de los autobuses de pasajeros de uso urbano en Corea operan utilizando gas natural como combustible. Diversas ciudades Coreanas han emprendido ambiciosos programas gubernamentales de sustitución de autobuses a Diesel por Gas Natural por razones ambientales principalmente. Es importante mencionar que del total de vehículos que utilizan gas natural como combustible en Corea, 94% de ellos son autobuses, lo anterior en virtud de los importantes programas de promoción del gas del GNC que han promovido los gobiernos locales.

El gobierno central de Corea a través del Ministerio de Medioambiente, promueve el uso del GNC mediante subsidio directo parcial para la adquisición de autobuses y los costos del combustible. En este esquema, la colaboración entre el Gobierno Central y los Gobiernos locales resulta esencial para la expansión de los programas de transporte a GNC.

## ANEXO B. Análisis comparativo entre motores a Diesel y a gas natural.

Los motores de ciclo Diesel y Otto (como los que utilizan gas natural como combustible) difieren notoriamente en sus procesos de combustión y por ende en las estrategias de control de emisiones. Mientras que en los motores a Diesel, la combustión se inicia en forma espontánea como resultado de las condiciones de alta presión y temperatura prevalecientes en el interior de la cámara, en los motores de ciclo Otto el inicio de la combustión es provocado generalmente por un arco eléctrico. A continuación se presenta un cuadro comparativo de los motores de ciclo Diesel y de Ciclo Otto así como las principales implicaciones de sus diferencias:

	<b>Ciclo Diesel</b>	<b>Ciclo Otto</b>
Masa entrante durante el ciclo de admisión	Exclusivamente aire.	Mezcla aire-combustible en proporciones próximas a la estequiometría.
Regulación del grado de carga del motor	Por medio de la cantidad de combustible inyectado (la masa de aire admitida es prácticamente constante para un régimen de giro dado).	Por obturación de la admisión del motor se regula la cantidad de mezcla aire-combustible.
Estrategia de mezclado del aire y combustible	El combustible se inyecta en el interior de la cámara de combustión en las proximidades del punto muerto superior del pistón, el tiempo disponible para el mezclado del combustible es limitado.	El combustible se mezcla con el aire antes de ingresar al motor, hay suficiente tiempo para su mezclado uniforme.
Inicio de la combustión	Por autoencendido, ocasionado por las altas presiones en el cilindro, no hay un estricto control del instante de inicio de la combustión.	Por arco eléctrico en inicio de la combustión se controla con precisión.
Estequiometría de la combustión	Altamente variable, desde mezclas muy pobres en el seno del chorro de diesel, hasta extremadamente pobres en las proximidades de las paredes del cilindro.	Uniforme, pequeñas variaciones entre mezcla rica y pobre.
Duración de la combustión	Larga, inicia por autoencendido y después continúa propagándose a la velocidad a la que se inyecta el combustible.	Corta, una vez que se inicia con una chispa, continúa propagándose a la velocidad local de sonido.

	<b>Ciclo Diesel</b>	<b>Ciclo Otto</b>
Emisiones de material particulado (PM).	Alta, por efecto del quemado del combustible en condiciones extremadamente ricas (poco aire) en las proximidades del chorro de combustible inyectado.	Baja, prácticamente toda la combustión se realiza en condiciones próximas a la estequiometría.
Emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx).	Alta, por efecto de las altas presiones en la cámara	Media, menores presiones en cámara de combustión.
Emisiones de monóxido de carbono (CO)	Bajas, por combustiones más eficientes y completas.	Comparativamente altas.
Emisiones de Hidrocarburos (HC)	Similares	Similares
Estrategia de control de emisiones	Complicada, en general, las medidas que mitigan la emisión de NOx favorecen la emisión de PM y viceversa.	Sencilla, el uso de sonda Lambda permite la aplicación de convertidores catalíticos de tres vías de alta eficiencia (80-90%).

Por otra parte, de acuerdo con la normatividad Federal vigente en los Estados Unidos, la definición de encendido por compresión de los motores Diesel está basada en el tipo de ciclo y no en el mecanismo usado para iniciar la combustión.

La presencia de una mariposa de admisión para la regulación de la carga del motor suele ser la manera de distinguir entre ciclo Diesel y Ciclo Otto. Cuando el grado de carga se regula controlando el suministro de combustible en lugar de usando una mariposa para obturar la admisión, pueden ser considerados de encendido por compresión a pesar de incorporar bujías de encendido. Es por esto que excepcionalmente los motores de mezcla pobre (lean combustion) que utilizan gas natural, para fines de certificación de sus emisiones pueden ser comparados con los motores a Diesel.

Para la aplicación de estándares de emisiones, los buses de pasajeros deben considerarse vehículos "Heavy Duty, HD" dentro de la categoría de motores denominada "Heavy Heavy Duty engines, HHDE" y estos vehículos debe cumplir tanto con los estándares establecidos tanto para los autobuses urbanos (HB), como para los motores.

Los estándares de emisiones básicos para vehículos HD están expresados en "gramos por caballo de potencia al freno y por hora" (g/bhp\*hr) y requieren certificarse en los Estados Unidos de Norteamérica mediante el ciclo denominado FTP Heavy Duty Transient Test (HDTT) que fue desarrollado considerando una variedad de recorridos para autobuses y camiones en la unión americana incluyendo tramos de ciudad, carreteras y autopistas. Este ciclo de prueba se efectúa al motor instalado en un dinamómetro de banco y contempla condiciones cambiantes de torque y velocidad durante las cuales se realiza un

muestreo de emisiones utilizando un muestreador a volumen constante. Cabe hacer de mención de que no existe una correlación (teórica o experimental) que permita la conversión de los valores de emisiones obtenidos en diferentes ciclos, lo anterior en virtud de que el nivel de emisión de un motor (o vehículo) para una condición operativa dada depende de factores que involucran a las estrategias de control de emisiones desarrolladas por cada fabricante y para cada familia de motores en particular, es por esto que no solo resulta relevante el nivel de emisión exigido para cada contaminante, sino el ciclo de prueba normado para este nivel de emisión.

## ANEXO C

### Análisis del costo en autobuses a GNC.

	New York Transit Authority (2006)	American Public Transportation Association (2007)	Strategic Environmental Consultant (2012)	Federal Transit Administration, 2009	Baltic Biogas Bus Project (2012)	MTA Nueva York (2003)	Washington Metropolitan Area Transit Authority (2006)	Federal Transit Administration, 2007	International Association of Public Transport (EUROPA)
<b>Autobús Diesel</b>	290,000	257,000-416,000 USD			292,500		300,000	321,000	273,000
<b>Autobús GNC</b>	319,000	329,000-410,000			344,500		340,000	340,000	325,000
<b>Incremento (USD)/autobús</b>	29,000	0-153,000	50,000-80,000	60,000	52,000	35000-70,000	40,000	19,000	52,000
<b>% incremento autobús</b>	10%	14%			18%		13%	6%	19%

Adicionalmente, los porcentajes de incremento en costo de los autobuses determinados por la International Association of Public Transport (EUROPA) de 15%-20%, son consistentes con lo reportado por la mayoría de las autoridades de tránsito.

#### Consideraciones:

En dólares americanos

1 Euro = 1.3 USD

Autobuses de 10 a 12 metros

- En virtud de que el sobreprecio de las unidades a GNC depende principalmente de los cilindros de almacenamiento de gas, se considera que el incremento del costo por autobús es un indicador adecuado para cálculos económicos asociados al uso de GNC, ya que no depende de las características de los autobuses a comparar. A partir de esta información, se obtiene un costo promedio de 45,500 dólares americanos adicionales por unidad a Gas Natural en sustitución de unidades a Diesel.
- Los porcentajes de incremento por autobús, dependen de las características de las unidades que se comparan, sin embargo, el incremento porcentual promedio de 14% para cálculos preliminares es un buen indicador. Adicionalmente, en ausencia de incentivos fiscales específicos para el GNC, este indicador también es válido para países en desarrollo.

## Referencias.

- Adams, R., Horne, D.B., 2010. Compressed Natural Gas (CNG) Transit Bus Experience Survey April 2009 —April 2010. National Renewable Energy Laboratory.
- American Public Transportation Association, APTA, 2000. Standard bus procurement guidelines – low floor CNG.
- Anil Jain and Anupama Sen. Natural Gas in India: An Analysis of Policy. Oxford Institute for Energy Studies. 2011.
- Anumita Roychowdhury. 2010. NG programme in India: The future challenges. CENTRE FOR SCIENCE AND ENVIRONMENT.
- Bradley, M.J. & Associates, 2003. Natural Gas as a Transportation Fuel: Best Practices for Achieving Optimal Emissions Reductions.
- CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. 1999. Evaluation of Compressed Natural Gas (CNG) Fueling Systems.
- CALGARY Transit Fleet, City of Calgary. 2011. Feasibility of compressed natural gas buses at Calgary transit.
- Canadian Natural Gas Vehicle Alliance (CNGVA), 2010. Natural Gas Use in the Canadian Transportation Sector. Deployment Roadmap. Natural Gas use in transportation roundtable.
- Canadian Gas Association, CGA, 2012. A Sustainable Energy Future, The Role of Natural Gas. CGA, s.f. Canada. Disponible en <http://www.cga.ca/documents/CGASustainabilitywebfinal.pdf>. Revisado por última vez el 1 de junio de 2012.
- Centre for Science and Environment, CSE, 2010. CNG programme in India: The future challenges. Fact sheet series, 2010. Disponible en [http://www.cseindia.org/userfiles/cngfuture\\_pdf.pdf](http://www.cseindia.org/userfiles/cngfuture_pdf.pdf). Revisado por última vez el 1 de junio de 2012.
- CERI Commodity Report - Natural Gas, 2009. Ottawa, Canadá. [www.cngva.org](http://www.cngva.org)
- Chemonics International, Inc. USAID/Egypt. Sustainability Plan for CNG Bus Pilot Fleet. Cairo Air Improvement Project. Compressed Natural Gas Component. Marzo 2004. Disponible en [http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNACY233.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNACY233.pdf). Revisado por última vez el 1 de junio de 2012.
- Collantes, G., Melaina, M. W., 2011. The co-evolution of alternative fuel infrastructure and vehicles: A study of the experience of Argentina with compressed natural gas. Energy Policy 39, 664-675.

Dunn, M, 2003. State of the art and future developments in natural gas engine technologie. Proceedings of DEER 2003: Diesel Engine Emissions Reduction Newport, Rhode Island.

Dursbeck F. et al., 2001. Status of implementation of CNG as a fuel for urban buses in Delhi  
FINDINGS – CONCLUSIONS – RECOMMENDATIONS.

Delphi, 2011. WORLDWIDE EMISSIONS STANDARDS HEAVY DUTY AND OFF ROAD VEHICLES 2011/2012.

DIN 51624, 2008. AUTOMOTIVE FUELS - COMPRESSED NATURAL GAS - REQUIREMENTS AND TEST METHODS

EPA, 2010.- <http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/ch4.html>

EPA, 2012.- Nonconformance Penalties for On-highway Heavy Duty Diesel Engines.

GTR 5, 2006. Global technical regulation TECHNICAL REQUIREMENTS FOR ON-BOARD DIAGNOSTIC SYSTEMS (OBD) FOR ROAD VEHICLES (Established in the Global Registry on 15 November 2006) . UNITED NATIONS.

Environmental Protection Agency (EPA), 2012. Interim and Proposed Technical Support Document: Nonconformance Penalties for On-highway Heavy-Duty Diesel Engines.

EURO VI, 2009. Official Journal of the European Union. 2009. REGULATION (EC) NO 595/2009 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL OF 18 JUNE 2009 ON TYPE-APPROVAL OF MOTOR VEHICLES AND ENGINES WITH RESPECT TO EMISSIONS FROM HEAVY DUTY VEHICLES (EURO VI) AND ON ACCESS TO VEHICLE REPAIR AND MAINTENANCE INFORMATION AND AMENDING REGULATION (EC) NO 715/2007 AND DIRECTIVE 2007/46/EC AND REPEALING DIRECTIVES 80/1269/EEC, 2005/55/EC AND 2005/78/EC .

Federal Transit Administration (FTA) U.S. Department of Transportation, 2009. Characteristics of BUS RAPID TRANSIT for Decision-Making. Project No. FTA-FL-26-7109.2009.1.

GE-N1-118. Reglamento para Estaciones de Carga de GNC, Argentina, 1992.

Gonzalez Jorge. September, 2012. Cummins Westport.

Graf, Frank; Riedl, Jörg; Kröger, Kerstin; Reimert, Rainer; Meyer Jörg, 2010. Monitoring cng quality in germany.

GTZ, 2006. Vehículos a gas natural. Modulo 4d, Transporte sostenible. Texto de referencia para formuladores de políticas públicas de ciudades en desarrollo.

Hensher, D.A., Golob, T.F., 2008. Bus rapid transit systems: a comparative assessment. Transportation 35, 501-518.

Hilal A. Raza. February 2006. The Role of Natural Gas in the Transport Sector for Sustainable Development. Conferencia en International Symposium on Natural Gas and Sustainable Development Doha, Qatar. 6-8

Hossain, I.,Gülen, G.,2007. Lifecycle analysis of different urban transport options for Bangladesh. Energy Policy 35, 4909-4918.

Jenks, C. W., 1998. Technology Assessment of Refueling-Connection Devices for CNG, LNG, and Propane. Transit Cooperative Research Program.

Kojima, Masami, 2001. Breathing Clean. Considering the Switch to Natural Gas Buses. World Bank Technical Paper No. 516. The World Bank. s.f. Washington, D.C. USA.

Looty, M., Pinto Jr, Helder., Ebeling, F., 2009. Automotive fuel consumption in Brazil: Applying static and dynamic systems of demand equations. Energy Policy 37, 5326-5333.

Malenshek, M., Olsen, D.B., 2009. Methane number testing of alternative gaseous fuels. Fuel 88, 650-656.

McTaggart-Cowan, G.P., Rogak, S.N., Munshi, S.R., Hill, P.G., Bushe,W.K., 2010. The influence of fuel composition on a heavy-duty, natural-gas direct-injection engine. Fuel 89, 752-759.

NFPA 52, 2010 "Vehicular Gaseous Fuel Systems Code, 2010 Edition"

National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2006. Washington metropolitan area transit authority: compressed natural gas transit bus evaluation.

Ou, X., Zhang, X., Chang, S., 2010. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations. Energy Policy 38, 406-418.

Park,S.,Tak,H.,2012. The environmental effects of the GNG bus program on metropolitan air quality in Korea. Ann Reg Sci 49,261-287.

Pelkmans, L. De Keukeleere, D. y Lenaers, G. Emission and fuel consumption of natural gas powered city buses versus diesel buses in real-city traffic. Vito - Flemish Institute for Technological Research, Belgium. s.f.

Phani K. Raj, William T. Hathaway, Ronald Kangas. 1996. DESIGN GUIDELINES FOR BUS TRANSIT SYSTEMS USING COMPRESSED NATURAL GAS AS AN ALTERNATIVE FUEL. Contractor sponsored by U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration.

Posada, Francisco, 2009. CNG Bus Emissions Roadmap: From Euro III to Euro VI. The International Council on Clean Transportation. [www.theicct.org](http://www.theicct.org)

Rong, F., 2010. Understanding developing country stances on post-2012 climate change negotiations: Comparative analysis of Brazil, China, India, México, and South Africa. Energy Policy 38, 4582-4591.



Rose, L., Hussain, M., Ahmed, S., Malek, K., Costanzo, R., Kjeang, E., 2012. A comparative life cycle assessment of diesel and compressed natural gas powered refuse collection vehicles in a Canadian city. *Energy Policy*. In press.

Squaiella LLF et al, 2012. Strategies for emission control in diesel engine to meet Euro VI. *Fuel*. In press.

Taylor, A.M.K.P., 2008. Science review of internal combustion engines. *Energy Policy* 36, 4657-4667.

Terrón Juan Ángel, 2011. Experiencia con autobuses de GNC. EMT Madrid. San Sebastian,

Thamsiroj, T., Smyth, H., Murphy, J.D., 2011. A roadmap for the introduction of gaseous transport fuel: A case study for renewable natural gas in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 4642-4651.

Trudgeon, M., 2005. An overview of ngv cylinder safety standards, production and in-service requirements.

UNEP, 2009. Cleaning up urban bus fleets with Focus on Developing and transition countries.

UNEP, 2011. Diesel Sulfur Level. Global Status. Aug., 2011.

UNESCAP, 2012. Guidelines for the conversion of diesel buses to CNG. UNESCAP. s.f.  
[http://www.unescap.org/ttdw/Publications/TIS\\_pubs/pub\\_1361/pub\\_1361\\_ch2.pdf](http://www.unescap.org/ttdw/Publications/TIS_pubs/pub_1361/pub_1361_ch2.pdf). Revisado por última vez el 1 de junio de 2012.

Wu, Y., Wang, R., Zhou, Y., Lin, B., Fu, L., He, K., Hao, J., 2011. On-road vehicle emission control in Beijing: past, present, and future. *Environmental Science & Technology* 45, 147-153.

Yao, M., Liu, H., Feng, X., 2011. The development of low-carbon vehicles in China. *Energy Policy* 39, 5457-5464

Yeh, S., 2007. An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles. *Energy Policy* 35, 5865-5875.