



Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás

Capítulo 3. Motores de transporte por carretera



PSE PROBIOGAS.

Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España.

PS-120000-2007-6



Motores de transporte por carretera

Autores:

Castaño Pérez, Valentín (CIDAUT)
Domínguez Carrero, José Ignacio (CIDAUT)

Fecha de publicación:

31-03-2010



ÍNDICE

1 Antecedentes	3
2 Introducción	4
3 Descripción de la tecnología	4
3.1 Características principales de los motores a gas.....	4
3.2 Requisitos del biogás. Necesidad de adecuación.....	27
3.3 Necesidad de sistemas auxiliares	36
3.4 Aspectos logísticos de la distribución	45
4 Estudio económico de la utilización del gas natural en los vehículos.....	48
5 Referencias	50



1 Antecedentes

El proyecto singular y estratégico PROBIOGAS, cofinanciado por el MICINN y los fondos FEDER (2007-2011), integra un conjunto de actividades de carácter científico tecnológico que están interrelacionadas entre sí y que tienen como objetivo común "el desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás en entornos agroindustriales, así como la demostración de su viabilidad y promoción en España". El proyecto está formado por 14 subproyectos e incluye estudios de viabilidad, acciones de investigación y desarrollo, proyectos de demostración a escala industrial, y acciones complementarias para la coordinación y difusión del proyecto.

En el subproyecto 4 "BIOGÁS" se estudia la viabilidad de los distintos aprovechamientos del biogás agroindustrial: motores de co-generación, vehículos de transporte, inyección en la red de gas natural, uso en pilas de combustible y uso en microturbinas.

Fruto de estos estudios, se han elaborado cinco informes de viabilidad, uno para cada tipo de aprovechamiento, en los cuales se describe la tecnología y las condiciones de su aplicación, así como los costes de inversión y operación. Además, se ha elaborado un informe sobre la caracterización y purificación del biogás.

El presente informe corresponde al estudio de viabilidad del uso de motores de transporte por carretera para el aprovechamiento del biogás.

El presente estudio ha sido realizado con fines experimentales. Aun cuando en su elaboración los autores han procurado el máximo rigor en el tratamiento de los datos e informaciones contenidas en el mismo, no se acepta responsabilidad alguna por la utilización que de los mismos pueda realizarse. Cualquier uso posterior deberá contrastarse adecuadamente.

Es propiedad, (c) FUNDACIÓN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN AUTOMOCIÓN (CIDAUT) / Consorcio PROBIOGAS 2009. Todos los derechos reservados.



2 Introducción

Las características de los motores habitualmente empleados en sistemas de transporte son manifiestamente diferentes a las de los motores estacionarios empleados en cogeneración, por lo que han sido objeto de un análisis pormenorizado y separado del uso de los motores en cogeneración.

Las diferencias fundamentales entre ambos tipos de motor no solo se centran en el tamaño, sino también en los requerimientos de prestaciones en diferentes puntos de funcionamiento y en los requerimientos de seguridad y homologación de los sistemas auxiliares.

Se ha realizado un análisis de los requerimientos técnicos de los vehículos de gas, respecto a peculiaridades constructivas, sistemas de almacenamientos, costes asociados y demás requerimientos de los vehículos de gas ya existentes.

Se han evaluado las características del biogás en comparación con otros combustibles gaseosos de origen fósil empleados en motores de gas para transporte (GN).

Se ha realizado un análisis de necesidades de sistemas auxiliares, y de modificaciones respecto de los existentes.

También se ha hecho una estimación de las necesidades logísticas de suministro en función de la autonomía de los vehículos, las presiones de almacenamiento, los sistemas de repostaje, etc.

3 Descripción de la tecnología

3.1 Características principales de los motores a gas

Las propiedades características del biogás como combustible son muy similares a las del gas natural, por lo que podrá ser empleado sin grandes inconvenientes en motores de automoción preparados para trabajar con gas natural.

La única precaución que se deberá tener es depurar convenientemente el biogás, hasta conseguir estar por debajo de los niveles máximos permitidos al gas natural en todos los contaminantes limitados (eliminación de CO₂, O₂, N₂ y resto de elementos gaseosos diferentes del metano, así como H₂S, HCl, HF y otros compuestos causantes de corrosión ácida en el motor, que pueden ser causa de desgaste, abrasión ó formación de depósitos).



El gas natural se utiliza habitualmente en motores de combustión interna alternativos de encendido provocado (MEP ó motores tipo Otto). También se puede utilizar en motores de encendido por compresión (MEC); en estos casos suelen ser motores diesel transformados y lo habitual es que se emplee una cierta cantidad de gasóleo para provocar la ignición.

En función del tipo de motor y de la relación del gas natural con otros combustibles, los vehículos se clasifican en [1]:

- Vehículos mono-fuel, monovalentes ó **dedicados**: Utilizan gas natural como único combustible. Se trata de motores MEP optimizados para trabajar con gas natural, lo que asegura un rendimiento elevado y unas emisiones muy bajas.
- Vehículos **bi-fuel** ó bivalentes: Operan indistintamente con gas natural ó gasolina. Son motores MEP que tienen dos depósitos diferenciados, con dos sistemas diferentes de alimentación y un botón que permite seleccionar uno u otro carburante. En este caso, los vehículos son reversibles: siempre existe la posibilidad de retirar el sistema de alimentación de CNG y que el vehículo recupere su estado inicial.
- Vehículos **tri-fuel**: Se trata de vehículos flexibles con motores MEP desarrollados en Brasil que pueden utilizar gasolina, etanol, mezclas de ambos ó gas natural.
- Vehículos **dual-fuel** ó de combustible dual: Disponen de motores MEC que utilizan una mezcla de gas natural y gasóleo. El gasóleo, que actúa como iniciador del proceso de combustión, se inyecta directamente a la cámara de combustión, mientras que el gas natural se introduce en el aire de admisión mediante un carburador ó un sistema de inyección. Cuando el vehículo está al ralentí, funciona con 100% gasóleo, mientras que a los grados de carga y regímenes de giro más elevados, la proporción de gasóleo puede estar comprendida entre el 5 y el 20%. En promedio, este tipo de motores puede consumir del orden de 60-70% de gas natural y 30-40% de gasóleo.
- Vehículos de inyección directa de alta presión (**HPDI**): Tecnología dual-fuel que inyecta simultáneamente gasóleo y gas natural a alta presión en la cámara de combustión. Lo normal es que el gasóleo se inyecte en cantidades pequeñas, siendo este el responsable de que se produzca la combustión. Esta tecnología está siendo desarrollada para vehículos pesados por Westport Innovations en Canadá.

En algunos países se utiliza el HCNG (también conocido como H₂CNG), que es una mezcla de gas natural y un 4 a 9% de hidrógeno. Es usado como combustible en



motores de combustión interna. Las mezclas de HCNG con menos del 50% de hidrógeno tienen unos riesgos de pérdidas e inflamabilidad similares a las del CNG. No se necesita ningún tipo de precaución especial para evitar la fragilidad de los materiales en contacto con la mezcla. Estos motores, convenientemente optimizados, son capaces de trabajar con mezclas más pobres, mejorando el rendimiento y reduciendo todas las emisiones en general y las emisiones de NOx en especial. Existen estaciones de servicio con este combustible en Noruega y Canadá.

También existen locomotoras diesel convertidas a CNG, donde la potencia del motor se emplea en la generación de la electricidad que mueve el tren.

En general, los vehículos de gas natural dedicados muestran mejor rendimiento y tienen emisiones más bajas que los vehículos bi-fuel, dado que su motor se ha optimizado para trabajar con gas natural. Un diseño optimizado para el vehículo de gas natural permite conseguir una potencia superior a la del vehículo de gasolina, debido a su elevado índice de octano que le permite utilizar una mayor relación de compresión. También permite adaptar el funcionamiento del catalizador para reducir las emisiones, ya que la oxidación del metano requiere temperaturas más elevadas que otros hidrocarburos. Además, y con respecto a los vehículos bi-fuel, el vehículo dedicado no tiene que llevar dos combustibles diferenciados, por lo que se incrementa la capacidad de carga ó se reduce el peso del vehículo. El empleo de CNG en los vehículos a gran escala facilitará el desarrollo de este tipo de vehículos.

Por todo ello, desde el punto de vista medioambiental, la tecnología más efectiva es la que emplean los vehículos dedicados con un catalizador específico. Esto permite optimizar tanto el consumo de combustible como las emisiones. Dentro de estos, mientras que las tecnologías de combustión estequiométrica ($\lambda=1$) permite el nivel de emisiones más bajo en comparación con los motores diesel (85% de reducción de NOx y 100% de partículas), el mínimo consumo de combustible se da con los motores de mezclas pobres. En este último caso, el fabricante deberá garantizar unas bajas emisiones de NOx y un catalizador de oxidación efectivo para reducir sustancialmente las emisiones de HC.

No obstante, por motivos de seguridad en el aprovisionamiento de combustible, la mayor parte de los vehículos ligeros de CNG disponibles actualmente en Europa son vehículos bi-fuel, empleando cada combustible de manera independiente. Los vehículos llevan motores estándar de gasolina y pueden rodar independientemente con cualquiera de los dos combustibles. El tipo de combustible a emplear se selecciona mediante un botón en el tablero de a bordo. Varios fabricantes comercializan directamente vehículos bi-fuel: Fiat, Opel, Peugeot, Volkswagen, Toyota, Honda,...

Como se verá más adelante, la potencia, aceleración y velocidades máximas de un vehículo a gas natural son similares a las de los vehículos convencionales equivalentes. La autonomía es generalmente más baja, debido al menor poder calorífico del gas por litro de combustible. La vida de un vehículo de gas natural suele ser entre dos y tres años mayor que en los vehículos de gasóleo ó gasolina equivalentes, teniendo además menores costes de mantenimiento.

La mayor parte de los vehículos ligeros a gas son vehículos de gasolina transformados, que trabajan de manera similar a los MEP de gasolina. El equipamiento adicional necesario, en el caso general, se muestra en la *Figura 6* [2].



Figura 1. Equipamiento adicional de un vehículo de gas natural.

A continuación se describe el proceso en este tipo de vehículos: El CNG (gas natural comprimido) entra al vehículo a través de la válvula de llenado de gas natural (A) y se almacena en los cilindros de alta presión (B). Cuando el motor necesita gas natural, éste deja los cilindros y pasa a través de la válvula de corte manual (C). El gas se desplaza a través de la tubería de alta presión (D) y entra en el habitáculo del motor, alcanzando el regulador (E), donde se reduce su presión hasta la requerida por el sistema de inyección. La válvula solenoide de gas natural (F) permite a éste pasar desde el regulador de presión hasta el mezclador ó los inyectores. Esta válvula corta la entrada de gas natural cuando el motor no está funcionando. El gas natural fluye al motor a través del carburador ó los inyectores (G), donde se mezcla con el aire y entra en la cámara de combustión donde, al quemarse, produce la potencia necesaria para mover el motor, igual que en el caso de la gasolina.

Las mejores prestaciones de este tipo de vehículos se consiguen en mezclas estequiométricas controladas electrónicamente, en especial cuando se combina con EGR, turbocompresor e intercooler y catalizadores de tres vías. Igual que en el caso de los vehículos dedicados, las combustiones de “mezcla pobre” consiguen mejores rendimientos que las estequiométricas, pero se tienen mayores emisiones de NOx e hidrocarburos.



En el caso de los vehículos pesados es mucho más común el empleo de vehículos dedicados, que también pueden emplear la combustión estequiométrica ó la combustión de mezclas pobres. Los vehículos van a ser mucho más silenciosos que un vehículo diesel equivalente.

El coste del montaje de estos elementos adicionales es muy variable, dependiendo del tipo de elementos incluidos, pudiendo oscilar entre los 1.500 a 5.000 euros para los vehículos ligeros, de 3.000 a 7.500 euros para los vehículos medios (furgonetas) y entre 25.000 y 60.000 euros para autobuses y otros vehículos pesados. En cualquier caso, y teniendo en cuenta una producción en serie a gran escala, el coste del vehículo será siempre muy inferior al de un vehículo transformado a posteriori. Dependiendo del coste de transformación, de los diferenciales de coste entre ambos combustibles y del número de kilómetros anuales recorridos, los periodos de amortización suelen estar comprendidos entre 2 y 5 años.

En el caso de los sistemas dual-fuel, el comportamiento del vehículo y las emisiones van a depender mucho de las condiciones de operación y del sistema de control empleado. A partir de los años 80, las tecnologías empleadas estaban basadas en “dispersar” el gas natural en el colector de entrada de aire al motor. Los desarrollos más recientes, además de ser controlados electrónicamente, inyectan el gas natural directamente a la cámara de combustión (HPDI), con lo que se consigue mejorar en rendimientos y emisiones. Estos sistemas están todavía limitados a un reducido número de motores y fabricantes, generalmente de vehículos pesados.

3.1.1. Sistema de almacenamiento del gas natural en el vehículo

La forma más extendida de almacenamiento de gas natural en el vehículo es en forma comprimida (CNG) en depósitos cilíndricos a presiones entre 200 y 300 bar [1].

También puede utilizarse gas natural en estado líquido a muy bajas presiones y -160° C (LNG). En España se utiliza también LNG a 15 bares de presión y -132° C. El LNG tiene la ventaja de ocupar menor volumen y menor peso dentro del vehículo, pero es más complejo y más costoso. En estos casos los depósitos son de doble pared, con aislante intermedio.

Los depósitos de CNG ó LNG se pueden construir de acero, aluminio, composites ligeros (según norma ISO 11439 CNG 3” ó 4”) ó combinación de estos materiales. Los construidos a partir de composites son, con diferencia, los más ligeros. Normalmente van equipados con una válvula de seguridad (según norma ISO 11439).



El GNC requiere un volumen importante para el almacenamiento de combustible. Su densidad energética se estima en el 20-25% con respecto al gasóleo o gasolina. A diferencia de los vehículos transformados a posteriori, donde el depósito se coloca en el maletero, los vehículos ligeros transformados de factoría llevan el depósito en su parte baja, mediante una disposición más racional, y no ocupando sitio del maletero (Fiat Multipla, Fiat Panda, Volkswagen Touram,...). En los autobuses, estos depósitos van generalmente dispuestos en el techo y pueden llegar a suponer hasta el 17% del peso total del vehículo.

Mientras que el CNG está más restringido a los transportes urbanos, por su baja autonomía, el LNG está siendo más empleado en vehículos pesados que realizan transportes interurbanos, principalmente en Estados Unidos y Gran Bretaña.

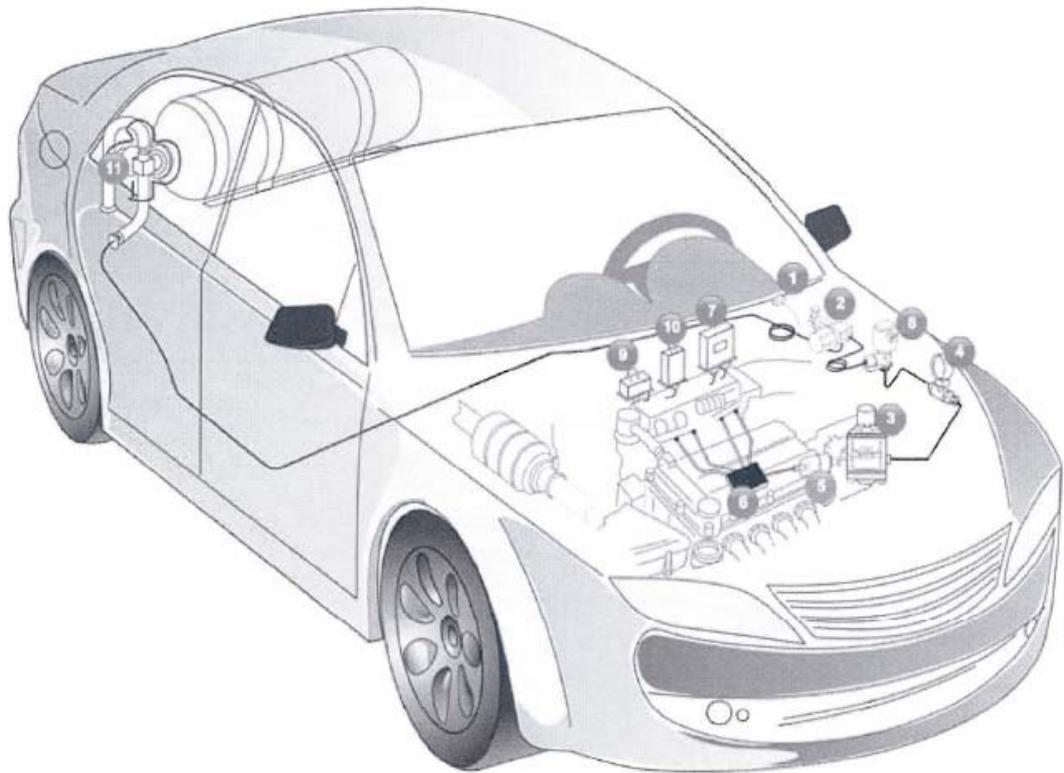
3.1.2. Sistema de alimentación del motor

Para la introducción del gas en la cámara de combustión y formación de la mezcla aire-combustible, la instalación requiere de dos elementos principales: un regulador de presión, para rebajar la presión del depósito hasta la presión de trabajo, y un mezclador de gas o inyector. Con respecto a este segundo elemento, los modelos más antiguos incluían mezcladores tipo venturi, mientras que en los vehículos modernos se han incorporado las inyecciones monopunto, multipunto o secuencial, similar a los inyectores actuales de gasolina. Normalmente el mezclador es regulado por una válvula actuada por un motor paso a paso y comandada por un sensor de oxígeno en el escape.

En los dos apartados siguientes se presentan **sendos ejemplos representativos** de los distintos sistemas existentes (**Tomasetto Achille**, en Argentina, como transformador de vehículos de gasolina a vehículos bi-fuel y **Hardstaff**, en Reino Unido, como transformador de vehículos diesel pesados a vehículos dual-fuel).

3.1.3. Tecnologías de transformación de vehículos de gasolina a vehículos bi-fuel [3]

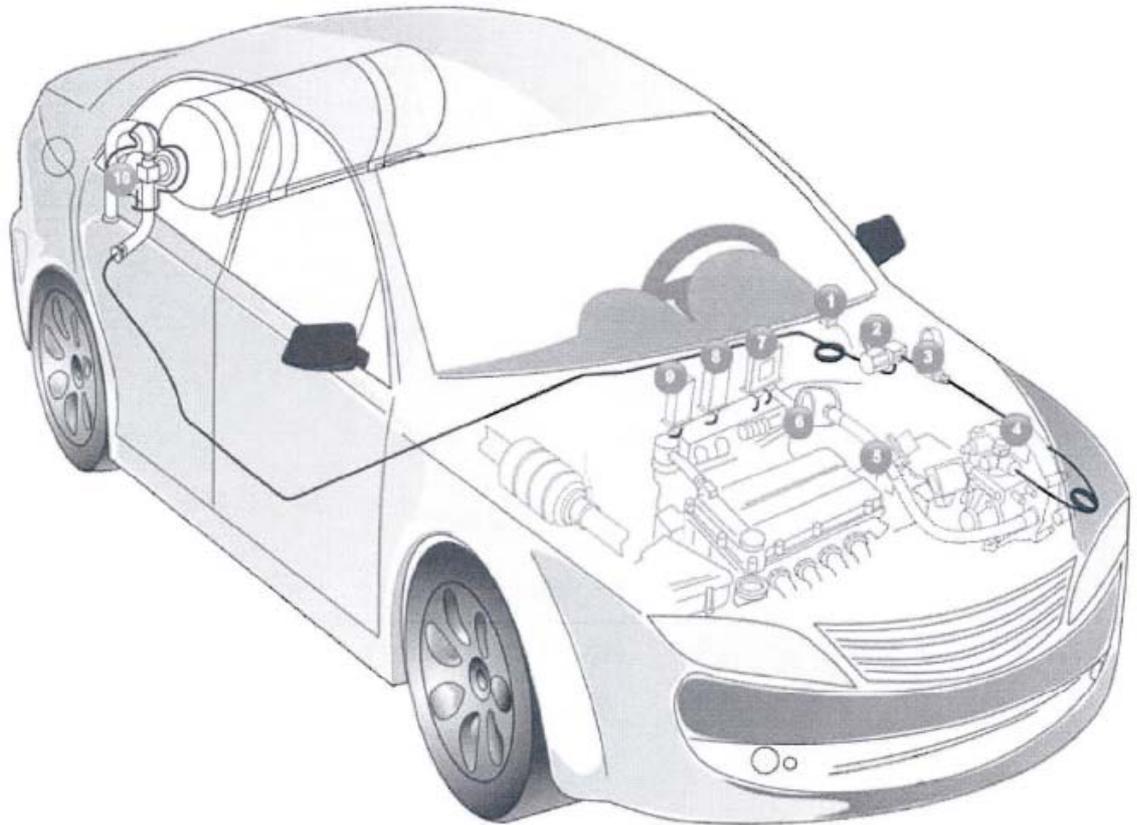
La empresa **Tomasetto Achille (Argentina)** abarca distintos tipos de transformaciones para la obtención de vehículos bi-fuel (gasolina/GNC) a partir de las distintas tecnologías de motores existentes. En las *Figuras 7 a 10* se indica el equipamiento necesario en función del tipo de alimentación.



COMPONENTES

- | | |
|--|-------------------------|
| 1. Llave conmutadora | 7. ECU GNC |
| 2. Válvula de carga | 8. Electroválvula |
| 3. Reductor de presión de gas | 9. Sensor de presión |
| 4. Manómetro indicador de nivel de gas | 10. Variador de avance |
| 5. Filtro de gas | 11. Válvula de cilindro |
| 6. Rampa de inyectores | |

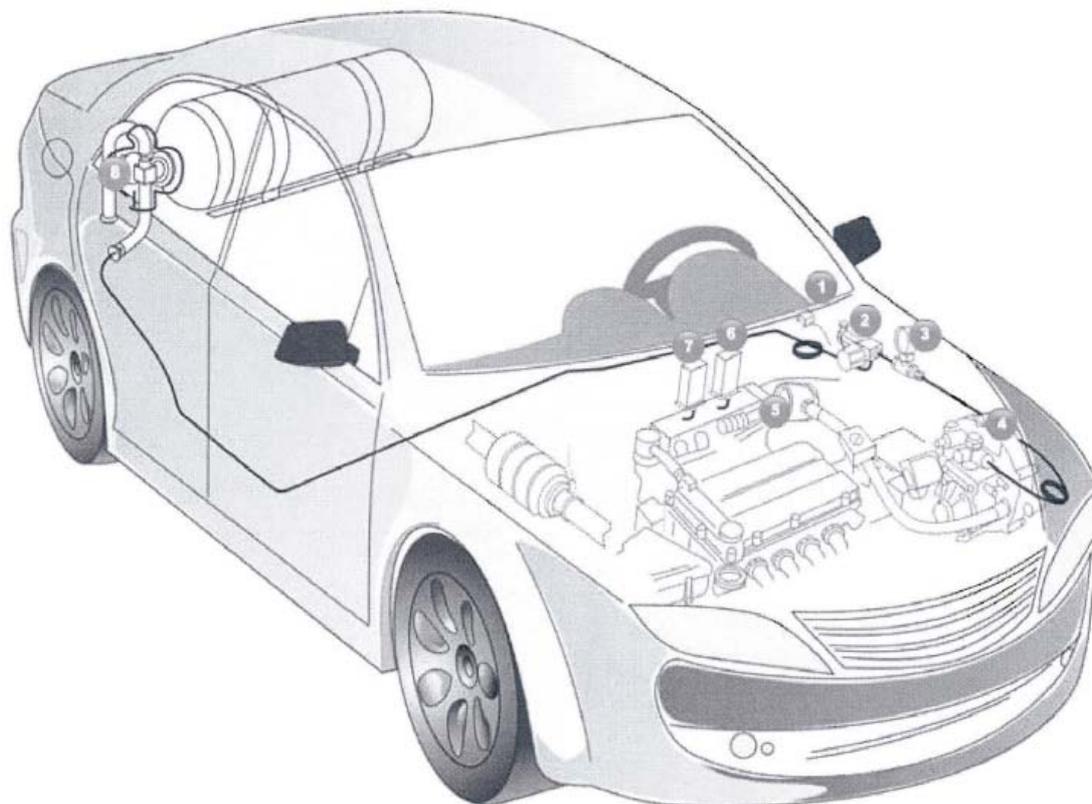
Figura 2. Equipamiento para la transformación a CNG mediante inyección secuencial.



COMPONENTES

- | | |
|--|--|
| 1. Llave conmutadora | 6. Mezclador aire - gas |
| 2. Válvula de carga | 7. Grupo electrónica de control |
| 3. Manómetro indicador de nivel de gas | 8. Variador de avance |
| 4. Reductor de presión de gas | 9. Emulador de inyectores |
| 5. Dosificador motor PAP | 10. Válvula de cilindro (opcional eléctrica) |

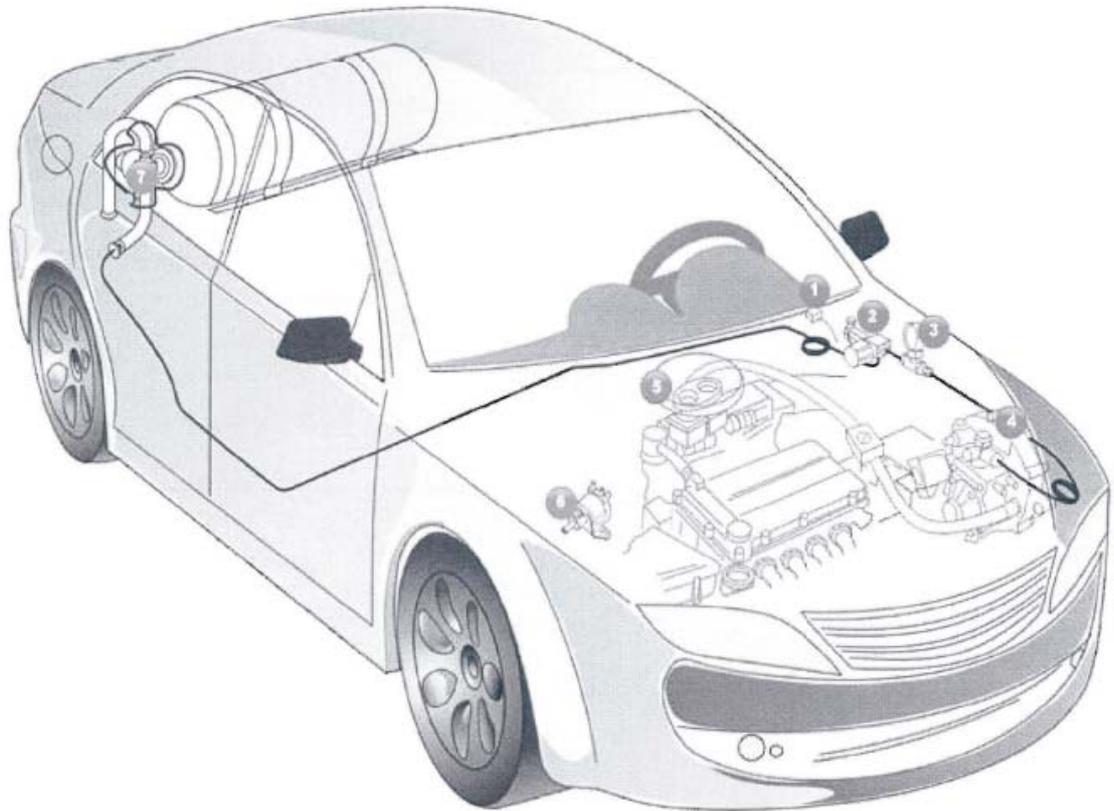
Figura 3. Equipamiento para la transformación a CNG mediante inyección en lazo cerrado.



COMPONENTES

- | | |
|--|---|
| 1. Llave conmutadora | 5. Mezclador aire-gas |
| 2. Válvula de carga | 6. Variador de avance |
| 3. Manómetro indicador de nivel de gas | 7. Emulador de inyectores |
| 4. Reductor de presión de gas | 8. Válvula de cilindro (opcional eléctrica) |

Figura 4. Equipamiento para la transformación a CNG mediante inyección en lazo abierto.



COMPONENTES:

- | | |
|--|---|
| 1. Llave conmutadora | 5. Mezclador aire-gas |
| 2. Válvula de carga | 6. Electroválvula de nafta |
| 3. Manómetro indicador de nivel de gas | 7. Válvula de cilindro (opcional eléctrica) |
| 4. Reductor de presión de gas | |

Figura 5. Equipamiento para la transformación a CNG en vehículos carburados.

También está desarrollando tecnologías reversibles para la conversión de vehículos diesel a CNG:

Sistema de conversión mixto diesel-gas

Trabajan en simultáneo con gasóleo y gas, en proporciones de mezclas que dependen de los estados de carga del motor.

Se trata de un sistema de inyección multipunto secuencial de gas que permite la entrada del combustible gaseoso muy cerca de la válvula de admisión. Así se logra un sistema de admisión que contiene solamente aire, libre de combustible,



respetando las condiciones de trabajo y diseño original y evitando los riesgos de retroceso de llama y las contra explosiones consecuentes, particularmente peligrosas en los motores turbo-comprimidos.

La posibilidad de programar los tiempos de inyección a través de un sistema mapeado evita la salida de gas sin quemar por el circuito de escape, evitando las post combustiones no deseadas y reduciendo sustancialmente las emisiones de escape.

Sistemas dedicados

Son sistemas de conversión normalmente usados para motores pesados de gran potencia, utilizados en camiones ó autobuses de pasajeros.

En este segmento, están desarrollando sistemas de conversión para motores diesel aspirados o turbo alimentados con intercooler, que les permiten operar con CNG.

Un sistema de control de alimentación de gas permite ajustar automáticamente la calidad de la mezcla aire / gas natural, optimizando el consumo de combustible y reduciendo al mínimo las emisiones de escape.

Por medio de sus sistemas de “engine mapping” se controla la potencia y par motor de la unidad transformada, ajustándolos a los valores nominales del motor original diesel. El eficiente sistema de control, sumado a componentes totalmente rediseñados o nuevos, como la cabeza de cilindros, los pistones, el sistema de encendido, mezcladores, controladores de turbo compresor y equipos de inyección multipunto secuencial de gas, permiten transformaciones sencillas, de fácil y económico mantenimiento, confiable y de probada durabilidad.

SISTEMAS ELECTRÓNICOS.

Sistema de inyección secuencial multipunto (SIGAS):

Está integrado por distintos componentes que son comandados por una Unidad de Control Electrónico. Sus características más destacables son:

- Mantiene las prestaciones originales del vehículo funcionando a gasolina, no se coloca ningún tipo de restricción en la entrada de aire, como los mezcladores usados en conversiones de generaciones anteriores.
- El gas es inyectado en la misma forma que lo hace la unidad de control original del vehículo.
- La unidad SIGAS lee los tiempos de inyección calculados por la unidad de control original, aplica las correcciones necesarias para el nuevo



combustible, GAS, y activa los inyectores. Esto hace que el funcionamiento sea similar al programado por el fabricante del vehículo.

- Elimina definitivamente el riesgo de contra explosiones, presente en todos los sistemas de generaciones anteriores. Esto es especialmente importante en colectores de admisión plásticos.
- Evita que la unidad de control original modifique sus parámetros de funcionamiento durante la marcha con gas, originando problemas al retornar a gasolina.
- La unidad SIGAS es programada y monitoreada desde un PC ó un Terminal PTA105, también es posible realizar un registro de operación para verificar su funcionamiento y detectar cualquier anomalía.

Sistema de Lazo Cerrado (XLP):

Los sistemas de Lazo Cerrado mantienen la relación de mezcla, aire- combustible, dentro de los valores óptimos, dando como resultado menor consumo de combustible, excelentes prestaciones del motor en todas las condiciones de funcionamiento y baja emisión de contaminantes.

Todo esto es posible gracias a un módulo de control ó microprocesador que utiliza como entradas las señales de diversos sensores del motor para controlar la cantidad gas. Estos sistemas incorporan la llave selectora de combustible con indicación de nivel.

Variadores de avance:

Se emplean para ajustar los parámetros de la combustión cuando el motor trabaja con CNG. Existen diversos tipos:

APW: Para vehículos con distribuidor y encendido electrónico, donde la carga de la bobina es controlada por el variador de avance.

ARF: Usado en vehículos sin distribuidor, con rueda dentada de 6, 36 ó 60 dientes y equipados con sensor magnético.

MAP: Para vehículos con Inyección Electrónica que usan sensor MAP o MAF, analógicos o de frecuencia variable.

APJ: Para vehículos con distribuidor y encendido electrónico, donde la carga de la bobina es controlada por el módulo original.



HALL: Usado en vehículos sin distribuidor, con ruedas dentadas de diferentes geometrías y equipados con sensor Hall. Tiene la posibilidad de auto-aprender las señales de CKP y CMP.

Todos ellos son totalmente programables con PC o Terminal PTA105.

Emuladores de inyectores:

Interrumpen el suministro de gasolina al motor durante el funcionamiento a gas, simulando además el funcionamiento de los inyectores cuando el motor funciona con GNC, permitiendo que la centralita de inyección funcione correctamente. Los hay para 4 y 6 cilindros.

Terminales de selección de combustible:

Para vehículos de inyección: Permite la selección del tipo de combustible (gasolina o GNC) en forma manual y el cambio se realiza automáticamente. El arranque se realiza "normalmente" a gasolina, pasando a gas con una leve aceleración, en caso de "emergencia" puede arrancarse directamente a gas.

Para vehículos carburados: Permite la selección del tipo de combustible (gasolina o GNC) y el cambio en forma manual. Durante la fase de arranque habilita la salida de gas para permitir un arranque rápido y eficiente. Cuando se realiza el cambio de GNC a gasolina permite la superposición de ambos combustibles para evitar detenciones inesperadas del motor.

Ambos tipos poseen un sistema de detección de motor parado que, en caso de una parada de motor accidental, corta inmediatamente la salida de gas, evitando cualquier riesgo. También muestran indicación del nivel de gas en el depósito a través de 5 indicadores luminosos.

Reductores.

Para reducir la presión del GN a los valores demandados por el sistema de inyección. Existen diversos modelos:

PP: Reductores de presión en dos etapas para uso en sistemas de automóviles de última generación, con la segunda etapa bi-compensada para una mejor estabilidad y un correcto desempeño en motores turbo.

PP-Plus: Reductores de presión de una etapa, para autobuses y camiones, compensados para mejor estabilidad en motores turbo.

Gama ST: Reductor de presión en tres etapas, que permite un óptimo flujo del carburante al motor en cualquier condición de funcionamiento. Con válvula de



seguridad (PRV) contra las sobrepresiones, con descarga en el circuito de alimentación para prevenir fugas hacia el exterior. Calefacción del gas a la entrada del motor por agua de refrigeración, para compensar la disminución de temperatura debida a la fase de expansión y asegurar una óptima prestación de funcionamiento sin importar los factores climáticos. Regulación de marcha lenta individual, que garantiza mejor funcionamiento de este régimen y evita apagados inoportunos del motor. Para vehículos ligeros de inyección ó carburación.

Gama TA: Reductores para automóviles, de tamaño reducido, para aquellos casos en que se disponga de espacio limitado en el habitáculo del motor. Adecuado para motores de inyección y 16 válvulas. Hay una versión más pequeña para motocicletas.

Válvulas.

Válvulas de cierre del cilindro de seguridad, con fusible para 100°C y disco de estallido a 300-340 bar, válvula de exceso de flujo y sistema de autoventeo. Accionamiento eléctrico ó manual.

Válvulas de abastecimiento externas, de accionamiento manual, de tres vías, y válvulas de abastecimiento, ambas equipadas con sistemas anti-retorno.

Electroválvulas de alta presión para gas y electroválvulas de corte de gasolina (para vehículos con carburador).

3.1.4. Tecnologías de transformación de vehículos diesel a vehículos dual-fuel [4]

La empresa **Hardstaff Dual Fuel Technologies (Reino Unido)** ha desarrollado el sistema OIGI (Oil Ignition Gas Injection), que es un sistema desarrollado para sustituir el gasóleo por gas natural en motores de vehículos ligeros y pesados.

El sistema de inyección de gas natural es controlado electrónicamente y puede alimentar al motor en forma de multipunto, monopunto ó inyección secuencial, proporcionando un amplio rango de aplicaciones para un gran número de marcas de camiones y autobuses actuales.

Una unidad de control independiente (ECU) es usada para el gas natural, proporcionando un sistema de realimentación en lazo cerrado que utiliza las variables disponibles en la unidad de control electrónica del diesel y controla la inyección de gas basándose en la señal de los diversos sensores del motor. Los sensores incluyen presión de inyección, señal lambda, posición del acelerador, temperatura del refrigerante, temperatura y presión del gas, y otras entradas. La



Unidad de Control es completamente programable y se pueden introducir mapas de inyección a medida para las distintas aplicaciones del vehículo.

El equipo de gestión de combustible OIGI es un sistema complejo, diseñado para tener un estricto control del gas y gasóleo inyectados, mediante la sincronización y mediciones precisas, ofreciendo la posibilidad de poder ajustar a medida el mapa de inyección para proporcionar emisiones reducidas y optimizar el consumo de combustible. El sistema también es compatible con los OBDs.

En este tipo de motores duales, se utiliza el gasóleo como fuente de ignición. Con el sistema OIGI, el motor al ralentí utiliza 100% gasóleo; la inyección de gas y reducción del gasóleo comienza cuando se incrementa el régimen del motor a partir de esa posición. Un control preciso de las cantidades de gasóleo y gas introducidas asegura una eficiente utilización del combustible y un rendimiento comparable al del motor diesel original.

En la *Figura 11* se presenta un esquema con el equipamiento necesario. El gas natural utilizado puede estar comprimido ó licuado. Desde el punto de vista funcional del motor, la única diferencia es que este último sistema necesita un vaporizador adicional.

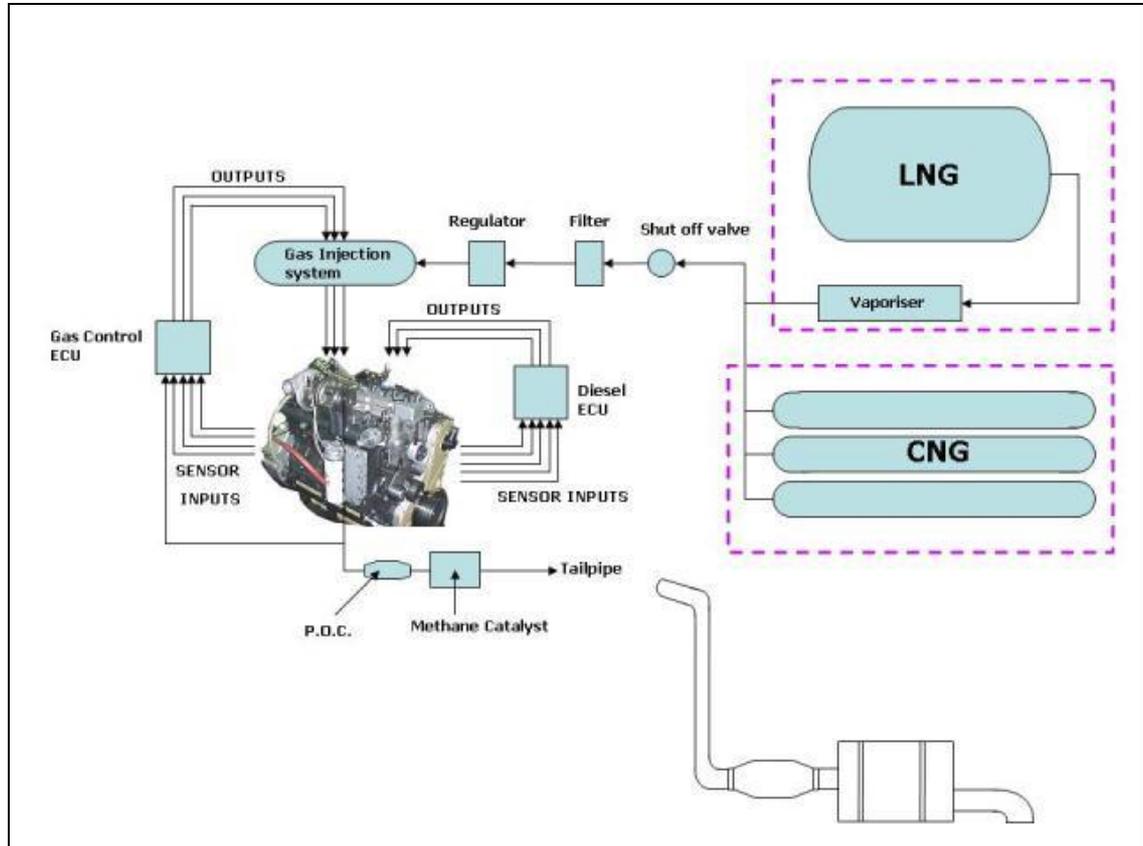


Figura 6. Esquema de una instalación OIGI para CNG ó LNG.

El sistema OIGI proporciona una solución para un combustible dual en condiciones de circulación urbana, donde el gas natural es introducido en el momento en que las revoluciones del motor sobrepasan el nivel de ralentí; proporciona un nivel de emisiones reducido, con las ventajas del rendimiento y economía de los motores diesel.

Los inyectores de este sistema pueden ser usados para distintas aplicaciones, utilizando distintos métodos de inyección, incorporando módulos de inyección apropiados en función del tipo de motor. Operan de manera lineal, dando rendimientos óptimos y, debido a su baja presión de operación, puede asegurar alta precisión en las cantidades de gas inyectadas, permitiendo al sistema cumplir estrictos controles de emisiones.

Los inyectores están certificados en la norma europea ECE R110, siendo extremadamente duraderos y robustos. Requieren poco mantenimiento con unos comportamientos y fiabilidad probados.



Para poder mantener un nivel reducido de emisiones en este tipo de sistemas, es necesario un catalizador de oxidación de partículas, así como un catalizador de metano.

Hardstaff posee un sistema de control de la temperatura del catalizador patentado, que asegura que sólo pasen a través del catalizador de metano los gases de escape suficientemente calientes; el aislamiento para la retención del calor es con objeto de conseguir un máximo rendimiento.

El dispositivo de control de emisiones incorpora un diseño para asegurar que los gases de escape puedan siempre pasar a través del sistema de escape.

Debido al diseño y sofisticación de la electrónica OIGI, el control del combustible inyectado es flexible, a fin de poder cumplir las diferentes normativas. En particular, este sistema puede superar adecuadamente los límites de emisiones exigidos por las normas Euro 3 y Euro 4. Como consecuencia de la reducida cantidad de gasóleo inyectada, y la composición del metano, el motor tiene una relativamente baja relación carbono/hidrógeno, consiguiendo emisiones menos contaminantes.

Hardstaff tiene también patentado un sistema de acoplamiento para camiones, que incrementa su autonomía, mediante un depósito de LNG en la cabina y otro de CNG en el remolque.

Emisiones contaminantes:

Los vehículos bi-fuel Harstaff alimentados por gas natural ó biogás tienen una alta eficiencia energética y producen bastante menos gases de efecto invernadero que los actuales motores de gasolina y gasóleo.

La reducción de emisiones y ruido alcanza los siguientes valores:

- 98% de reducción en CO
- 3 dB de reducción en niveles de ruido
- 65% de reducción en NOx
- Hasta el 25% de reducción de emisiones de CO₂ (cuando se sustituye el 90% del gasóleo).
- Las partículas cumplen las normas Euro 4 y 5



3.1.5. Vehículos accionados a gas natural en el mundo

En el mundo hay actualmente más de 8 millones de vehículos accionados a gas natural, estando el mayor número de vehículos en Argentina, Pakistán, Brasil, Italia, India e Irán. El mercado de Sudamérica alcanza casi el 50 % del total. En Estados Unidos hay unos 150.000 vehículos, la mayor parte autobuses. En los países de la OCDE hay más de 500.000 vehículos, la mayor parte en Italia y Alemania. En España, en mayo de 2008, había un total de 1.526 vehículos accionados a gas natural. Se espera que para el año 2020 haya 50 millones de vehículos accionados con gas metano (procedente de gas natural y biogás) [1].

En la *Figura 12* se puede ver el crecimiento de este tipo de vehículos en los últimos años [5].

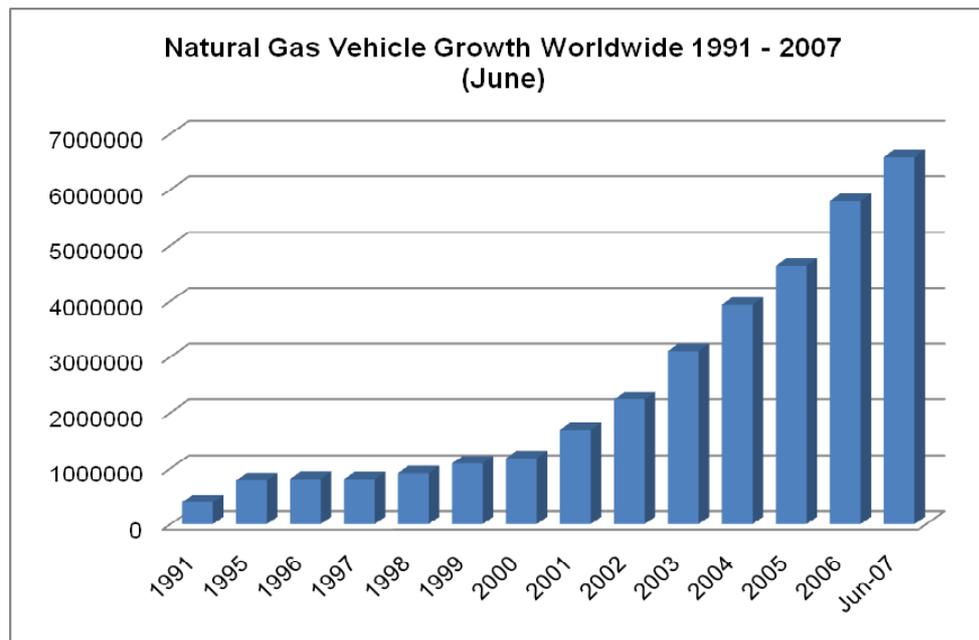


Figura 7. Evolución del número de vehículos a gas natural en los últimos años.

En la Tabla 9 se presenta el ranking por países (actualizado a mayo de 2008) ofrecido por la Asociación Internacional de Vehículos de Gas Natural [1]

Tabla 1. Situación mundial de vehículos a gas y estaciones de llenado.

	País	Nº de vehículos	Estaciones de llenado
1	Argentina	1,690,540	1,753
2	Pakistan	1,650,000	1,923



3	Brasil	1,511,945	1,609
4	India	821,872	325
5	Irán	611,516	347
6	Italia	432,900	609
7	Colombia	251,688	313
8	China	200,873	486
9	USA	146,876	1,340
10	Ucrania	120,000	224
...			
37	España	1,526	35
...			
TOTAL		8,428,520	12,796

Dentro de los distintos tipos de vehículos existentes, es en el autobús urbano donde se ponen de manifiesto las mayores ventajas de este combustible, por varias razones fundamentales [9]:

- Se trata de vehículos grandes, que consumen una gran cantidad de combustible, por lo que su periodo de retorno es bastante reducido.
- Se mueven por las ciudades más congestionadas, por lo que sus emisiones afectan a una gran cantidad de personas.
- Los continuos arranques y paradas incrementan las emisiones contaminantes de los vehículos, por lo que el efecto de reducción de emisiones al cambiar a CNG es mayor.

A continuación se describen los principales factores para el desarrollo de este combustible en los países más importantes.

Estados Unidos.

En USA, los organismos encargados de aprobar el uso de los vehículos transformados a gas natural son la EPA (US Environmental Protection Agency) y CARB (California Air Resources Board). Estos vehículos pueden ser vehículos dedicados (motores MEP que trabajan sólo con gas natural), vehículos “bi-fuel”



(motores MEP que pueden trabajar con CNG ó gasolina, pero no con ambos a la vez), ó vehículos “dual-fuel” (motores MEC que trabajan principalmente con gas natural pero utilizan algo de gasóleo como fuente de ignición). También están autorizados para certificar vehículos de hidrógeno ó de HCNG.

Generalmente CARB es más exigente que EPA en cuanto al cumplimiento de emisiones y OBDs. Los diferentes estados han ido adoptando una u otra, de las dos normativas existentes.

Los vehículos ligeros a gas natural pueden proceder directamente de los fabricantes de vehículos (OEMs), como es el caso de Honda, ó bien ser transformados, mediante sistemas suministrados por SVMs (Small Volume Original Equipment Manufacturers). En este caso, los sistemas podrán ser instalados antes ó después de poner el vehículo en servicio activo, pero siempre necesitan el certificado de aprobación de EPA ó CARB para poder circular.

También hay SVMs que transforman vehículos pesados y medios, bien sean motores basados en el ciclo Otto (gasolina) ó motores diesel. Las tecnologías de transformación de vehículos pesados y medios más extendidas son: BAF Technologies (transformación de vehículos dedicados), Baytech Corporation (transformación de vehículos dedicados y bi-fuel), FuelTek Conversión Corp. (transformación de vehículos bi-fuel), Cummins Westport Inc. (transformación MEP generalmente comercializados por los fabricantes), Emission Solutions Inc. (transformación de MEP) y Westport Innovations (para MEC con 95% CNG y 5% gasóleo).

Existe una exención de impuestos para comprar vehículos a CNG. En California, el CNG está muy extendido en flotas de la ciudad y del condado, transporte público (urbano y autobuses escolares) y existen un gran número de estaciones de llenado. Aunque los precios del gas natural están subiendo, este está disponible a un precio entre el 30 y el 60% más barato que la gasolina. La utilización de CNG por los particulares está aún muy poco extendida. Sin embargo, con los actuales incentivos fiscales y el crecimiento del número de estaciones públicas de llenado disponibles, se está experimentando un crecimiento sin precedentes. El estado de Utah ofrece una red subvencionada de estaciones de llenado de CNG a un precio 4 a 5 veces inferior a la gasolina. En otras partes del país, el precio medio es del orden del 60% del precio de la gasolina, teniendo también estaciones de llenado caseras que comprimen el gas a partir de líneas de gas natural residencial a un precio entre el 30 y 40% con respecto a la gasolina. Aparte de las transformaciones de vehículos en SVMs y de las subastas de vehículos oficiales usados, el único vehículo a CNG producido actualmente en USA es el Honda Civic GX Sedan, que se fabrica en tiradas limitadas y está disponible sólo en algunos estados.



El congreso ha facilitado la conversión de vehículos ligeros a CNG con una exención de impuestos por encima del 50% para los costes de la transformación y para la estación de llenado casera de CNG.

A pesar de que el CNG está reconocido como un combustible mucho más limpio, la conversión necesita en todo caso un certificado medioambiental de la EPA, y el procedimiento para conseguir este certificado puede costar a los transformadores hasta 50.000 \$.

Canadá.

Canadá es un gran productor mundial de gas natural, por lo que el empleo de este combustible en vehículos resulta bastante económico. La industria canadiense ha desarrollado motores a CNG para camiones y autobuses, furgonetas y taxis. No es raro encontrar estaciones de carga de CNG y propano en las principales estaciones de servicio.

Europa.

Italia es el país de Europa que tiene mayor número de vehículos a CNG en la actualidad y es el cuarto país en el mundo por número de vehículos en circulación. Actualmente hay una gran expansión del mercado de vehículos de gas (CNG y GLP) causado por la subida de los precios de la gasolina y por la necesidad de reducir las emisiones contaminantes.

Hasta 1995, la única manera de tener un vehículo accionado por CNG era haciendo la transformación mediante un kit de postventa. Entre las grandes compañías de transformación de vehículos estaban Landi Renzo, Tartarini Auto, Prins Autogassystemen, OMVL, BiGass,..., y AeB para los elementos electrónicos usados en la mayor parte de los kits. Landi Renzo y Tartarini tienen, además, delegaciones en Asia y Sudamérica.

A partir de 1995, los vehículos bi-fuel (gasolina/CNG) son comercializados por algunos fabricantes. Actualmente Fiat, Opel, Volkswagen, Citroen, Renault, Volvo y Mercedes comercializan varios modelos de coches y furgonetas bi-fuel. Normalmente, los componentes de CNG empleados son suministrados por los principales fabricantes de kits para vehículos postventa (Fiat usa componentes Tartarini y Volkswagen usa componentes Teleflex CF1 y Landi Renzo).

En Alemania se espera un incremento de los vehículos a GNC de dos millones de unidades antes del año 2020. El coste del CNG actualmente está entre 1/3 y 1/2, comparado con otros combustibles en Europa. Hay unas 800 estaciones de servicio que suministran GNC en Alemania.



En Italia también hay más de 800 estaciones de servicio de GNC, a un precio medio de 0,93 €/kg.

En Suecia hay actualmente 90 estaciones de llenado de GNC abiertas al público. Otras 70-80 estaciones de llenado estarán en servicio antes de 2010. En el 2007 había aproximadamente 14.000 vehículos a CNG, de los cuales 13.500 eran taxis y los restantes incluyen autobuses y camiones. En Estocolmo, la compañía de transporte público opera actualmente con 50 autobuses a CNG, pero tiene capacidad para operar con 500. El gobierno sueco prolongó recientemente hasta final del 2010 su subvención para el desarrollo de estaciones de llenado de CNG.

América del Sur.

Argentina y Brasil son los dos países con mayor número de flotas de vehículos a CNG. La evolución en estos países se ha visto facilitada por tres factores principales:

- Una sustancial diferencia de precios con los combustibles líquidos.
- Equipos de transformación fabricados a nivel local.
- Una creciente infraestructura de suministro de GNC.

Argentina tiene 1.700.000 vehículos a gas, que supone el 15% del total del parque de vehículos, y 1.767 estaciones de llenado. En Brasil hay 1.560.000 vehículos, lo que supone el 5% de su flota de vehículos ligeros, con 1.585 estaciones de llenado. Colombia tiene 260.000 vehículos, con 378 estaciones de llenado. Bolivia tiene 90.000 unidades y Perú 40.000.

Una "red azul" de vehículos a GNC está siendo desarrollada en las principales autopistas del cono sur (incluidos Chile y Bolivia). En Brasil se están desarrollando vehículos que pueden funcionar con tres tipos de combustible: CNG, alcohol ó gasolina.

En todos estos países, la práctica más habitual para poder utilizar el CNG consiste en transformar los vehículos de gasolina en talleres especializados (vehículos bi-fuel), que incluye la instalación del depósito en el maletero, el sistema de inyección de CNG y el control electrónico.

Asia-África.

En algunos países asiáticos, el CNG se ha extendido como una de las principales fuente de combustible utilizadas por los automóviles, especialmente en Irán, Pakistán, Bangladesh e India, al igual que en Egipto (África).



España.

En España se disponía, en mayo de 2008, de 1.526 vehículos y 35 estaciones de llenado. La mayor parte de los vehículos son autobuses y camiones, si bien ya se está empezando a extender entre los vehículos ligeros. Sólo en Madrid había 675 camiones de recogida de basuras y 360 autobuses urbanos. También existen autobuses urbanos en Barcelona, Sevilla, Valencia, Salamanca, Burgos y Málaga. Empresas como FCC, Cespa y Urbaser disponen de camiones accionados a gas natural en distintas ciudades [1] [7].

En 2007 entró en servicio en Valencia la primera estación de abastecimiento de gas natural de uso público, gracias a un acuerdo entre Gas Natural y la Cooperativa Valenciana de Taxistas (TAXCO).

Por su carácter menos contaminante, en los últimos años se viene dando al gas natural un fuerte impulso desde las Administraciones y desde diversas empresas privadas, lo que hace prever una fuerte expansión de este tipo de vehículos en los próximos años.

3.1.6. Garantías del vehículo [9]

Existen ya más de 40 empresas fabricantes de vehículos en el mundo (OEMs) que comercializan vehículos a CNG contruidos en sus factorías. La mayor parte de ellos son vehículos bi-fuel ó vehículos dedicados.

Hoy día, la mayor parte de estos vehículos son diseñados y fabricados por el fabricante en su totalidad y, como tales, están sometidos a las mismas normativas de calidad que los vehículos de gasolina ó diesel. Estos vehículos están totalmente garantizados, en cuanto a mantenimiento y reparación, ante cualquier tipo de avería igual que el resto de vehículos de la misma marca.

En otros casos, algunos fabricantes tienen contratos con empresas ajenas, quienes realizan la transformación a gas natural, con una calidad equivalente a la de salida de fábrica y los vehículos son comercializados como tales. De igual modo, estos vehículos son considerados igual que los procedentes de las líneas de montaje y están totalmente garantizados mientras se cumplan las pautas establecidas por el fabricante.

No obstante, una gran parte de los vehículos a CNG actualmente en circulación han sido transformados por empresas independientes una vez comprado el vehículo. En estos casos, el vehículo debe cumplir todas las normativas (nacionales e internacionales) establecidas al respecto. Esto garantiza al propietario del vehículo



la protección necesaria ante cualquier “mala práctica” por parte de las compañías transformadoras.

3.2 Requisitos del biogás. Necesidad de adecuación.

Las características del biogás, tras ser sometido a un proceso de tratamiento adecuado, son prácticamente idénticas a las del gas natural empleado en automoción. El biogás, convenientemente tratado, cumple los requisitos que exigen las distintas normativas al gas natural empleado en automoción y su comportamiento en los motores es equivalente al propio del gas natural.

3.2.1. Índice de Wobbe

Se define el índice de Wobbe de un combustible gaseoso como la relación entre su poder calorífico superior y la raíz cuadrada de su densidad específica (relativa al aire):

$$W = H/(\rho_e)^{1/2} \quad \text{donde } \rho_e = \rho/\rho_{\text{aire}}$$

Sus unidades son las mismas que en el poder calorífico (MJ/Nm³).

La importancia del índice de Wobbe se basa en que es proporcional a la cantidad de energía calorífica del gas que pasa a través de un orificio, en condiciones subsónicas, como consecuencia de una determinada diferencia de presión. Teniendo en cuenta que la mayor parte de los equipos de combustión de gas se basan en el flujo del mismo a través de orificios, cualquier variación en el índice de Wobbe del combustible implicaría una variación proporcional en el flujo de energía y, como consecuencia, en la relación aire/combustible. Podemos decir que dos gases son intercambiables cuando tienen el mismo índice de Wobbe.

En los motores que poseen sonda λ y regulan en lazo cerrado la formación de la mezcla estequiométrica, pueden ser admitidas y compensadas moderadas variaciones en el índice de Wobbe. Sin embargo, en los vehículos que trabajan con mezclas pobres y no disponen de este control, una disminución en el índice de Wobbe del combustible puede ser la causa de una pérdida de potencia importante, mientras que un incremento del mismo puede formar una mezcla demasiado rica y dar origen a sobrecalentamientos internos que destruyen el motor.

En el caso del gas natural, el índice de Wobbe del metano es **50,66 MJ/m³**. La adición de hidrocarburos de mayor peso molecular, como etano y propano, incrementan el índice de Wobbe, mientras que el incremento en la concentración de gases inertes lo disminuye. En la práctica, se utiliza una combinación adecuada de ambos tipos de gases de modo que sus efectos se contrarrestan.

Los límites inferior y superior exigidos al índice de Wobbe para el gas natural varían en los distintos países europeos, según se indica en la figura 13 [8].

En rojo se indican los límites máximo y mínimo de la EN-437 para el gas natural de elevado contenido en metano (H-gas) y en verde se indican los límites establecidos por la Asociación Europea para la Simplificación del Intercambio de Energía (EASEE).

Los límites inferior y superior en España (coincidentes con los marcados en la EN-437) son, respectivamente, 45,7 y 54,7 MJ/nm³. Por sus características y, teniendo en cuenta que lo que se pretende es poder emplearlo en el mismo tipo de aplicaciones, estos mismos límites son los establecidos para el **índice de Wobbe del biogás**.

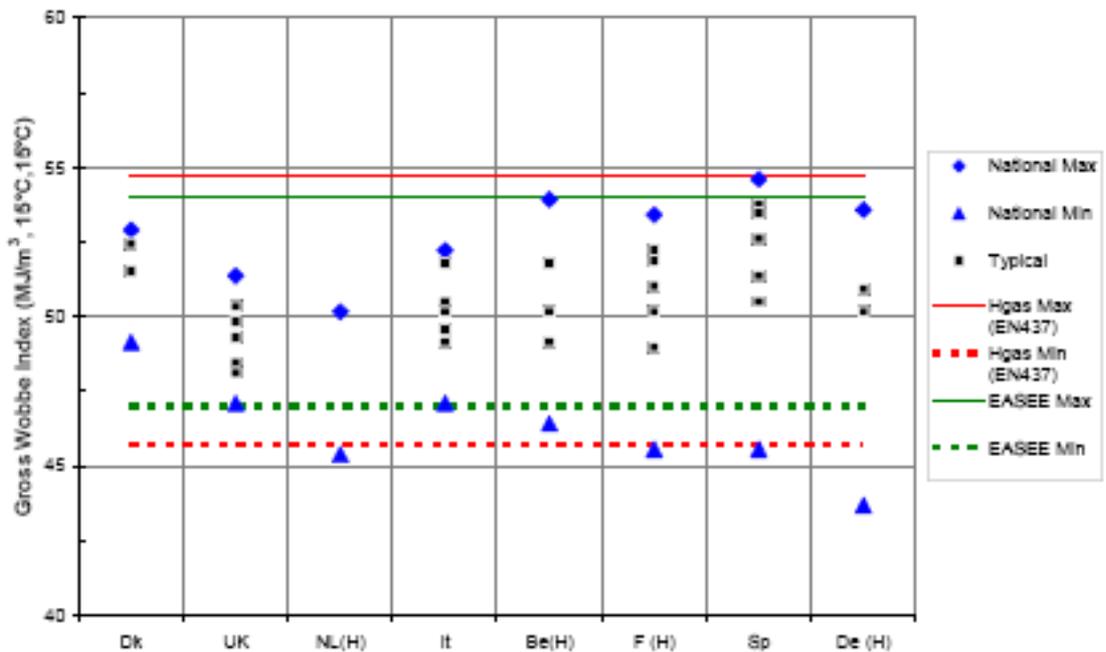


Figura 8. Valores típicos del índice de Wobbe en los distintos países europeos y límites superior e inferior de especificaciones.

3.2.2. Comportamiento general en el motor

En la *Tabla 10* se presentan las principales características como carburante del gas natural comprimido (CNG), comparadas con las de sus competidores más directos en los vehículos actuales (gasolina, gasóleo y LPG ó gases licuados del petróleo).



Destaca en gran medida la baja densidad energética del CNG (del orden del 20-25% con respecto a gasolinas y gasóleos y 30% con respecto a LPG), lo que obliga a proveer al vehículo con depósitos más voluminosos, además de más pesados por estar sometidos a elevadas presiones.

La otra diferencia importante es en relación con el octanaje del combustible. En este caso sus números de octano RON y MON son bastante más altos que los de la gasolina (e incluso también más que el LPG), lo que permitirá, en vehículos dedicados exclusivamente a CNG, elevar la relación de compresión del vehículo y obtener mayores rendimientos del motor. En vehículos bi-fuel, donde el motor debe estar preparado para trabajar indistintamente con uno u otro combustible, no va a ser posible esta variación en la relación de compresión, pero sí se puede mejorar un poco el rendimiento mediante el avance del ángulo de encendido de la combustión.

Con respecto a la relación estequiométrica de la combustión (kg. de combustible/kg. de aire), no existen grandes diferencias. Como se verá más adelante, las potencias desarrolladas por un mismo motor van a ser similares.

Tabla 2. Estudio comparativo como carburantes Gasolina, gasóleo, LPG y CNG.

	GASOLINA	GASÓLEO	LPG	CNG
Densidad (kg/l)	0,74	0,83	0,54	0,15
P.C.I. (MJ/kg)	43,7	43,2	45,9	49,4
P.C.I. (MJ/l)	32,3	35,8	24,8	7,6
Consumo (l/100km)	11	7	12	40
Vol. depósito (500 km)	35 l.	30 l.	45 l.	150 l.
Dosado estequiom.	1/14,9	1/14,5	1/15,5	1/17
Número de octano RON	95-98	-	110	125

3.2.3. Comportamiento antidetonante. Número de octano

A la hora de medir el número de octano de un combustible gaseoso, se pueden utilizar los métodos RON y MON definidos para los combustibles líquidos, pero no son técnicamente correctos. El gas natural tiene un comportamiento antidetonante tan bueno, que no puede ser determinado por los métodos clásicos pues sobrepasa el límite máximo de la escala ASTM (120,34).

Para medir su resistencia a la detonación se ha definido el número de metano (MN). En esta escala, los combustibles de referencia son mezclas de metano e hidrógeno,



de modo que el metano puro tiene un MN de 100, mientras que el MN para el hidrógeno puro es 0. Existen expresiones que correlacionan el número de metano con el índice de octano motor. La resistencia antidetonante del gas natural es máxima con el metano puro y decrece a medida que se incrementa la proporción de otros hidrocarburos.

Debido a su elevada resistencia antidetonante, en los motores diseñados específicamente para gas natural se puede incrementar la relación de compresión con respecto a los de gasolina, pudiendo alcanzarse relaciones entre 10:1 (motores grandes-vehículos pesados) y 13:1 (motores pequeños-vehículos ligeros).

3.2.4. Prestaciones en los motores a CNG.

Potencia:

A la hora de comparar la potencia que se puede obtener de un combustible gaseoso frente a la gasolina, se deben tener en cuenta varios factores:

- Poder Calorífico.
- Dosado estequiométrico.
- Volumen ocupado por el combustible dentro del cilindro.
- Calor latente de vaporización.

Se van a distinguir tres supuestos, en función del tipo de motor:

1. Inyección directa (multipunto):

En este caso el volumen ocupado por el combustible no influye sobre la cantidad de aire que entra a la cámara de combustión.

La fórmula que nos da la potencia desarrollada por un motor es la siguiente:

$$N_e = m_f \cdot H_c \cdot \eta_e = m_a \cdot F \cdot H_c \cdot \eta_e = V_T \cdot n/2 \cdot \rho_{ia} \cdot \eta_v \cdot F \cdot H_c \cdot \eta_e$$

donde m_f = masa del combustible introducido por unidad de tiempo.

m_a = masa del aire introducido por unidad de tiempo.

V_T = Volumen de llenado en el interior del cilindro.

n = régimen de giro del motor.

ρ_{ia} = densidad del aire a presión y temperatura ambientales.



η_v = rendimiento volumétrico del motor.

F = Dosado estequiométrico.

H_c = Poder calorífico del combustible.

η_e = rendimiento efectivo del motor.

Si sólo varía el combustible, y a igualdad del resto de condiciones de funcionamiento del motor (régimen de giro, apertura de la mariposa, presión y temperatura exteriores, rendimientos, etc.), la potencia será directamente proporcional al producto $F \cdot H_c$:

$$N_e = K \cdot (F \cdot H_c).$$

Para cada combustible, la potencia vendrá dada por:

Gasolina: $F = 1 / 14,9$

$H_c = 43700 \text{ kJ/kg.}$

$N_e = 2933 \cdot K$

Metano: $F = 1 / 17$

$H_c = 49400 \text{ kJ/kg.}$

$N_e = 2905 \cdot K.$

Se observa que la potencia del vehículo con gas natural puro (metano) **disminuye sólo un 1% con respecto a la gasolina.**

2. Inyección indirecta (monopunto) de LNG:

Cuando tratamos de sustituir una inyección monopunto de gasolina por una inyección monopunto de gas natural licuado (LNG), y haciendo la hipótesis de que el combustible llega siempre al cilindro en estado de vapor, hay que considerar dos nuevos factores:

En primer lugar, el volumen ocupado por el combustible gasificado. Deberá ser considerada la relación entre la presión parcial del aire y la presión de la mezcla, factor que normalmente se desprecia a la hora de calcular el rendimiento volumétrico, pero que en el caso de los combustibles gaseosos cobra más importancia debido a su mayor volumen.

Introduciendo este factor, el flujo de aire que entra al motor por unidad de tiempo vendrá dado por:

$$m_a = V_T \cdot n/2 \cdot \rho_{ia} \cdot \eta_v \cdot C.$$

El factor de corrección, C, viene dado por:



$$C = P_a/P_i = n_a/n_i = (m_a/29)/(m_a/29+m_h/18+F*m_a/M_f) = (1/29) / (1/29+h/18+F/M_f)$$

siendo humedad del aire ambiente = h.

Peso molecular del agua = 18.

Peso Molecular del aire = 29.

Peso Molecular del combustible = M_f .

Sustituyendo en la expresión de la potencia, obtenemos:

$$N_e = V_T * n/2 * \rho_{ia} * \eta_v * F * H_c * \eta_e * C.$$

Despreciando la humedad ambiental, que influye muy poco y su influencia es muy similar en todos los combustibles, los valores del factor de corrección y la potencia corregida para los combustibles considerados son:

Gasolina: $F = 1 / 14,9$

$M_f = 98$

$C = 0,9805.$

$N_e = 2876 * K$

Metano: $F = 1 / 17$

$M_f = 16$

$C = 0,9037.$

$N_e = 2625 * K$

En este caso la potencia con gas natural (metano) experimenta una importante **disminución, del 9%**, con respecto a la gasolina.

Existe otro efecto adicional que es el del calor latente de vaporización. Al pasar el combustible del estado líquido al estado vapor, se produce una disminución de la temperatura del aire de admisión proporcional al calor latente de vaporización y a la cantidad de combustible inyectada que mejora el rendimiento volumétrico. Sin embargo, los calores de vaporización de estos combustibles son similares y la influencia de este efecto es mínima.

3. Carburación ó inyección indirecta (monopunto) de CNG:

Cuando al aire de admisión se aporta directamente el combustible en forma de gas (CNG), ya no se tiene el efecto beneficioso del calor latente de vaporización sobre el rendimiento volumétrico, que sí se tiene en la gasolina. En este caso tendremos una importante pérdida de rendimiento volumétrico con respecto a la gasolina, que viene dada por la expresión:

$$\eta'_v / \eta_v = (T_a - \Delta T_a) / T_a = 0,925$$

$$\text{con } \Delta T_a = m_f * C_{lf} / m_a * C_{pa} = F * C_{lf} / C_{pa} = 22^\circ\text{C}$$



donde T_a = Temperatura del aire de admisión

ΔT_a = Disminución de temperatura debida al efecto de vaporización.

C_{lf} = 330 kJ/kg (calor latente de vaporización de la gasolina)

C_{pa} = 1 kJ/kgK (calor específico del aire a presión constante)

Debido a este efecto se tendría, por tanto, una disminución del rendimiento volumétrico del 7,5% con respecto a la gasolina y una disminución equivalente en potencia.

En este caso se suman los efectos correspondientes al mayor volumen ocupado por el gas en la mezcla y a la disminución del rendimiento volumétrico respecto de la gasolina. Teniendo en cuenta que puede existir una pequeña mejora en el rendimiento de la combustión, las **pérdidas de potencia** serán siempre en torno al **8-15%**, siendo más reducidas en los vehículos más grandes. Por ello, en vehículos dedicados, esta pérdida de potencia se puede compensar mediante el incremento de la relación de compresión o el empleo de sobrealimentación.

Consumo de combustible:

El CNG, por el hecho de ser gas a temperatura ambiente, forma con el aire una mezcla mucho más homogénea que la gasolina, lo que hace que presenten un mejor rendimiento térmico, especialmente en frío, y por tanto menor consumo en unidades de energía (kJ/km). El consumo expresado en kilogramos ó litros de combustible es superior, debido a su menor densidad energética.

3.2.5. Emisiones contaminantes

En general, los motores que trabajan con gas natural emiten baja cantidad de CO y de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y prácticamente no emiten partículas. También emiten menos CO₂, por tener menor cantidad de carbono por unidad de energía. Las emisiones en el arranque en frío también se ven reducidas, dado que no es necesario enriquecer la mezcla, lo que reduce aún más las emisiones de CO y NMHC.

En comparación con un vehículo de gasolina, la reducción de emisiones viene a ser del siguiente orden [9]:

- CO: -60/-80%
- NMOG: -87%
- NO_x: -50/-80%



- CO₂: -15/-20%
- Precursores de ozono: -80/-90%

No obstante, estos valores pueden variar dependiendo del tipo de motor

También desaparecen las emisiones de azufre y las emisiones por evaporación durante el funcionamiento y durante el llenado del vehículo, dado que los conductos y depósitos de gas natural son siempre sistemas cerrados.

En comparación con un vehículo pesado equivalente de gasóleo, la reducción de emisiones con gas natural es la siguiente [9]:

- CO: -70/-90%
- NMOG: -40/-60%
- NO_x: -80/-90%
- CO₂: -15/20% (-100% en caso de biogás)
- Partículas: -90/-95% (se forman algunas a partir del lubricante)

Ejemplos:

Ensayos realizados en USA con vehículos ligeros [2]: CO (-90%, -97%), NO_x(-35%, -60%), CO₂(-25%).

Ensayos realizados en USA con vehículos pesados (frente al gasóleo) [2]: CO (-75%), NO_x(-23%, -49%), partículas (-84%, -95%), CO₂(-15%).

También se producen importantes disminuciones, entre el 50 y el 80%, de otros componentes no limitados en los gases de escape: BTX, formaldehídos, aromáticos, hidrocarburos policíclicos aromáticos, olefinas, NMOG (gases orgánicos sin contenido de metano) y benzaldehídos.

Se puede producir un aumento de las emisiones de metano, hidrocarburo que no es perjudicial para la salud pero sí contribuye al efecto invernadero. En cualquier caso, siempre se va a ver compensado por la reducción de emisiones de CO₂, cuyo efecto es superior, con lo que el balance global resulta favorable. Además, los vehículos dedicados exclusivamente a gas natural llevan catalizadores de tres vías diseñados específicamente para reducir el metano residual en más del 90%.

Al igual que en el caso de los combustibles tradicionales, variaciones en la composición del gas pueden afectar a las emisiones. El principal factor es la



variación del índice de Wobbe, especialmente cuando el vehículo no dispone de control de la mezcla en lazo cerrado con sonda λ y catalizador de tres vías.

3.2.6. Resumen de comportamientos

Ventajas del CNG frente a los combustibles tradicionales:

- Disminución de **emisiones contaminantes: NO_x, partículas, CO y HC.**
- Disminución de **emisiones de CO₂.**
- Disminución de **consumo** energético (mayor rendimiento de los motores).
- Vehículos **más seguros** que los de gasolina, por ser un combustible más ligero que el aire y volatilizarse hacia arriba.
- Combustión “más suave” y reducción del **ruido** (mezcla más homogénea y mejor repartición de la carga entre cilindros).
- Mayor **durabilidad** del motor y menor costo de mantenimiento.
- Se eliminan las **pérdidas por volatilización** en el repostaje (diferente sistema de llenado).
- **Vehículos dedicados:** mejor rendimiento y emisiones.
- Funcionamiento más fácil en **mezclas pobres** (mayor rendimiento).

Inconvenientes ó barreras del CNG:

- Requisitos especiales para el **depósito** y revisiones de seguridad. Depósito de combustible adicional en vehículos bi-fuel y dual-fuel. Mayor peso arrastrado.
- Menor **autonomía** del vehículo.
- Escasez de puntos de **abastecimiento**. Necesidad de medidas de seguridad adicionales en los puntos de abastecimiento y en talleres de reparación.
- Pérdida de **prestaciones** en algún caso (hasta 10-15%).



3.3 Necesidad de sistemas auxiliares

3.3.1. Especificaciones del gas natural como combustible de automoción

La homologación en cuanto a emisiones de los vehículos y motores alimentados a gas natural se realiza con diversos tipos de gases normalizados (G_R , G_{23} , G_{25} , G_{20}), para asegurarse que el comportamiento del vehículo se mantiene con todo el amplio rango de calidades del gas natural en Europa. Estos gases normalizados cubren rangos desde el 86% hasta el 100% de metano, en distintas mezclas con etano y N_2 .

En España no existe una normativa especial que indique las características exigidas al gas natural de automoción. Deberá ajustarse, por tanto, a las propiedades que se exigen al suministro de gas natural para otros usos.

La calidad de suministro del gas natural está regulada por el RD 1434/2002, de 27 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de gas natural y, en particular, en el Capítulo X del Título III, sobre el suministro. En este sentido, la regulación considera la calidad del producto y la continuidad de suministro.

Los límites de calidad del gas natural en relación a su composición, poderes caloríficos y demás características de la calidad del producto, corresponden a los aplicables al gas del grupo H, segunda familia, de acuerdo con la clasificación de gases de la norma UNE-EN-437, y deberán cumplir los indicado en las normas de Gestión Técnica del Sistema (NGTS).

En la *Tabla 11* se muestran las principales características de este gas.

Tabla 3. Características del gas natural suministrado en España (UNE-EN-437).

Componente	Unidad	Valor límite
Índice de Wobbe	MJ/nm ³	45,7-54,7
Poder Calorífico Superior	MJ/nm ³	35,4 – 42,4
Metano	% vol	79-97
Etano (C ₂ H ₆)	% vol	0,1 - 11,4
Hidrocarburos superiores (Propano, butano, pentano, hexano)	% vol	0,12-5,0



Nitrógeno (N ₂)	% vol	0,5-6,5
Dióxido de Carbono (CO ₂)	% vol	0-1,5

También el gas natural debe ser odorizado, de forma que cualquier fuga pueda ser detectada con facilidad por el olfato humano normal cuando exista una mezcla cuya concentración volumétrica sea un quinto de la correspondiente al límite inferior de inflamabilidad.

En Europa, la Asociación Europea para la Simplificación del Intercambio de Energía (EASEE) ha establecido unas normas más restringidas para la calidad del gas natural ó biogás (*Tabla 12*), pero sólo hace referencia a la operabilidad general del gas intercambiado y no a su aplicación en motores ó turbinas [8]

Tabla 4. Especificaciones de la EASEE para el gas natural.

Componente	Unidad	Valor límite
Índice de Wobbe	MJ/nm ³	47-54
Densidad relativa	m ³ /m ³	0,555-0,70
Azufre total	mg/nm ₃	30 (máx)
H ₂ S+CO _s +RSH	mg/nm ₃	5 (máx)
O ₂	% vol	0,01 (máx)
CO ₂	% vol	2,5 (máx)
T ^a condensación agua	°C a 70 bar A	-8
T ^a condensación hidrocarburos	°C 1 a 70 bar A	-2
Hidrógeno		Insignificante

En otros países existen normativas más estrictas que van encaminadas a establecer una uniformidad de composición y evitar variaciones importantes en la emisión de contaminantes por causa de la naturaleza del combustible. Tal es el caso de la Norma Sueca SS 15 54 38 ó la establecida en USA por el California Air Resources Board (*Tablas 13 y 14*).

La norma sueca, que se ha desarrollado específicamente para el biogás, establece dos tipos de gases, en función del tipo de motores a los que se aplican: Tipo B, para motores equipados con sonda Lambda y tipo A, para aquellos motores que no van



equipados con el control por sonda Lambda. Esta norma no tiene en cuenta la presencia de otros componentes del gas natural, como pueden ser el hidrógeno, propano, etc.

Tabla 5. Especificaciones de la Norma Sueca SS15 54 38.

Componente	Unidad	Valor límite A	Valor límite B
Índice de Wobbe	MJ/nm ³	44,7-46,4	43,9-47,3
Metano	% vol	97±1	97±2
MON	-	>130 (ISO 15403)	>130 (ISO 15403)
Contenido en agua	mg/nm ₃	32 (máx)	32 (máx)
Azufre	mg/nm ₃	23 (máx)	23 (máx)
O ₂	% vol	1 (máx)	1 (máx)
(CO ₂ +O ₂ +N ₂)	% vol	4 (máx)	5 (máx)
NH ₃	mg/nm ₃	20 (máx)	20 (máx)

Tabla 6. Especificaciones impuestas por California Air Resources Board para el CNG de Automoción.

Componente	Proporción (% molar)
Metano	88.0 (mín)
Etano	6.0 (máx)
C ₃ y superiores	3.0 (máx)
C ₅ y superiores	0.2 (máx)
Hidrógeno	0.1 (máx)
Monóxido de carbono	0.1 (máx)
Oxígeno	1.0 (máx)
Gases inertes (CO ₂ +N ₂)	1.5 - 4.5

Para establecer una composición uniforme del gas natural a nivel mundial, de manera que pueda ser utilizado con plenas garantías por cualquier vehículo, se ha creado el Comité Técnico ISO TC193, que está desarrollando la normativa específica.



3.3.2. Características del biogás. Sistemas auxiliares de purificación

Las características del biogás, obtenido por descomposición bacteriana de la materia orgánica, son muy similares a las del gas natural empleado en Automoción (CH_4 en un elevado porcentaje), por lo que los motores adaptados a este combustible también estarán en condiciones de trabajar con biogás, siempre que este haya sido sometido a un adecuado proceso de purificación.

Los procesos de producción de biogás generan normalmente una mezcla gaseosa de composición variable en función de su procedencia (*Tabla 1*), con los siguientes componentes principales:

- Metano: 45-80%
- CO_2 : 20-55%
- N_2 : 0-20%
- O_2 : 0-10%
- H_2S : 0-8%
- H_2 : 0-5%
- Otros compuestos presentes en pequeñas cantidades son:
 - Vapor de agua
 - Compuestos halogenados

Para conseguir una mayor autonomía en los vehículos, es conveniente eliminar la mayor cantidad posible de CO_2 y resto de elementos gaseosos (O_2 , N_2 , etc....), incrementando así el contenido en metano. Por otra parte, algunas de las impurezas minoritarias pueden dar lugar, durante la combustión, a productos que son causa de corrosión (tal es el caso del H_2SO_4 , HCl ó HF , formados en la combustión a partir de ácido sulfhídrico y haluros) ó causa de desgaste y abrasión en algunas partes del motor. Estos últimos también forman depósitos, que producen una disminución del volumen de la cámara de combustión y, como consecuencia, mayor relación de compresión y mayor tendencia a la detonación.

Para eliminar todos estos contaminantes y conseguir que el biogás cumpla las normativas específicas establecidas para la utilización del gas natural en vehículos, es preciso someter al biogás a un proceso adecuado de purificación, para el que ya existen distintas metodologías desarrolladas, aparte de otras que están en periodo de desarrollo (**Capítulo 1**).



3.3.3. Precauciones de seguridad en el manejo del biogás

Por tratarse de un gas presurizado y con riesgo de inflamación, los vehículos de gas natural deben cumplir con exigentes normativas de calidad y seguridad. En Europa está vigente el Reglamento ECE 110, que define las condiciones que debe cumplir la instalación de GNC de un vehículo, incluidos los depósitos de carburante. En España, se debe tener en cuenta, además, el Reglamento Técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos (R.D. 919/2006).

Desde el punto de vista de riesgo de inflamación, los vehículos de gas natural son más seguros que los de gasolina, por su estrecho intervalo de inflamabilidad y por ser más ligero que el aire, lo que hace que, en caso de fuga, tenga tendencia a elevarse y disiparse en la atmósfera. No obstante, las instalaciones cerradas de repostaje y/o mantenimiento deberán disponer siempre de detectores de metano y estar convenientemente ventiladas, además de utilizar mecanismos diseñados para atmósferas explosivas.

Entre las precauciones de seguridad en el empleo de este combustible, cabe destacar [1]:

- Inspección periódica de los cilindros, de acuerdo a lo indicado en el R110.
- Verificar que las conexiones eléctricas no estén expuestas para evitar cortocircuitos y que las mangueras y cables estén bien sujetos.
- No liberar el gas a la atmósfera, en caso de ser necesario vaciar los depósitos.
- Puede ser conveniente despresurizar todo el sistema de combustible antes de empezar los trabajos de mantenimiento del motor.
- No está permitida la utilización en los motores de gas natural de hierro fundido, plástico, aluminio galvanizado, ni aleaciones de cobre que excedan el 70% de este metal.
- Observar un buen mantenimiento del compresor y filtros de la estación de repostaje, para evitar el arrastre de aceite lubricante del compresor.

En el caso del LNG, existen riesgos de quemaduras criogénicas por contacto con los elementos más fríos del sistema.

3.3.4. Seguridad en garajes cerrados

Otra cuestión a plantear con el CNG es el caso de producirse fugas de gas en el vehículo en espacios cerrados.



El rango de inflamabilidad del gas natural es menor que el de la gasolina. Mientras que en la gasolina se puede producir la ignición en proporciones entre el 1 y el 16% con respecto al aire, en el gas natural sólo se produce entre el 5 y el 15%, quedando fuera un amplio rango de mezclas en bajas proporciones (entre 1 y 5%) que sí serían explosivas con la gasolina. Por tanto, ante una fuga de gas natural, la difusión hasta los valores que quedan fuera del límite de inflamabilidad es mucho más rápida que en caso de la gasolina.

Normalmente los garajes deben estar convenientemente ventilados, bien sea por ventilación natural ó forzada, para evitar la acumulación de CO. En estos casos, los riesgos son iguales ó inferiores que en el caso de una fuga de gasolina.

Si se produce una pequeña pérdida en un espacio abierto ó en un garaje ventilado, el peligro nunca va más allá de unos centímetros de distancia del vehículo y no se produce acumulación del gas en ningún punto del garaje.

Sin embargo, ante una fuga muy grande, existe un corto periodo de tiempo (dependiendo del tipo de fuga y del tipo de ventilación existente, pueden ser unos segundos ó varios minutos) donde hay riesgo de inflamabilidad. El gas se difundirá por todo el espacio abierto y será eliminado por los sistemas de ventilación.

Podría existir un mayor riesgo de accidentes en aquellos casos en que el garaje no tenga ventilación, cuando esta no sea por la parte más alta del garaje, ó cuando la ventilación se realiza sólo en función de la señal recibida de un sensor de CO.

3.3.5. Seguridad en caso de accidentes

Se han realizado numerosos estudios estadísticos sobre la seguridad de los vehículos a CNG en caso de accidentes [9] [10] y en todos ellos los vehículos han resultado ser más seguros que en el caso de los vehículos de gasolina.

Son varias las razones que conducen a este hecho, la mayor parte de ellas basadas en las medidas de seguridad adicionales que se aplican a la utilización del gas natural, mucho más exigentes que en el caso de la gasolina:

1. Las bombonas de CNG son mucho más resistentes a un impacto que los depósitos de gasolina.
2. Mediante la inspección periódica obligatoria de las bombonas se controla su deterioro, lo que muchas veces no ocurre en el caso de los depósitos de gasolina.
3. Las bombonas disponen de elementos de seguridad adicionales, que evitan la explosión en caso de incendio: válvulas limitadores de presión, válvulas



de corte en caso de rotura ó de parada del motor, discos de ruptura, elementos fusibles que funden a elevadas temperaturas,...

4. Los depósitos, conducciones y equipos de CNG van siempre sellados, para evitar fugas.
5. El gas natural lleva incorporado un elemento odorizante, que permite detectar su presencia en concentraciones a partir del 0,3%.
6. Como se ha dicho anteriormente, un intervalo de inflamabilidad menor que en el caso de la gasolina y mayor temperatura de autoinflamación (en torno a 300°C para la gasolina y más de 500°C para el gas natural).

3.3.6. Normativa aplicable

La normativa aplicable en Europa para el empleo del gas natural (o biogás) en vehículos ha sido establecida a través de diversas directivas elaboradas por la Comisión, además de otras normas desarrolladas o en fase de desarrollo por parte del CEN (Comité Europeo de Normalización) y por la ISO (Organización Internacional de Normalización).

En cuanto a las Directivas Comunitarias es preciso tener en cuenta todas las relativas a emisiones de vehículos ligeros (70/220/EEC y posteriores hasta 2001/100/EC) y vehículos pesados (88/77/EEC y posteriores hasta 2005/78/EC), potencia del motor, consumo de combustible y emisiones de CO₂, además de las relativas a los equipamientos de los vehículos de CNG (ECE R110) y a las transformaciones de vehículos (ECE R115).

Para desarrollar el mercado del gas natural en vehículos (NGV) en Europa se necesita que los vehículos puedan ser usados sin limitaciones a lo largo de todo el continente europeo. Esto incluye una manera cómoda y segura de llenar el depósito del vehículo en cualquier lugar y en cualquier momento. Para ello es necesaria una amplia red de estaciones de servicio donde el conductor del vehículo pueda ser capaz de llenar su propio depósito. Los fundamentos técnicos para esta red están siendo establecidos por el Comité Técnico 326 del CEN. De hecho ya se han desarrollado unas normas (EN 13683 y EN 13945) relativas a las estaciones de servicio y sus instalaciones que están siendo ampliamente aplicadas a nivel mundial [12].

Las normativas desarrolladas deberán ser compatibles con otras directivas europeas, como la 97/23/EC (Aparatos a presión), la 2006/42/EC (Directiva de Máquinas) y la 94/9/EC (Protección contra explosiones).

Los principales objetivos de la CEN en este campo son:



- Elaborar las normas para el suministro de gas natural comprimido a los vehículos, como pueden ser las estaciones de servicio, los equipos de llenado del depósito y las condiciones de operación.
- Coordinar e integrar dentro de CEN e ISO otros proyectos de normalización.
- Evaluación de las nuevas tecnologías de uso de gas natural en los vehículos e integración en el programa de trabajo (como LNG ó biogás).

La normalización a nivel mundial del uso de gas natural en vehículos está dividida en diferentes comités CEN e ISO. Cada uno de los comités está haciendo su contribución particular al desarrollo del nuevo sector. Además, se está llevando a cabo una coordinación entre ambas entidades con el fin de no duplicar los trabajos.

Los aspectos relacionados con la infraestructura (instalaciones de repostaje) están siendo desarrollados por CEN, mientras que los relacionados con las tecnologías de vehículos los desarrolla el grupo ISO/TC 22/SC 25. El modelo europeo de estaciones de servicio tiene una posición líder a nivel mundial, mientras que en el caso de los componentes de los vehículos la tecnología está más dispersa a nivel mundial.

El Comité Técnico 326 del CEN es el encargado de desarrollar las normas relativas a las instalaciones de CNG para vehículos en la Unión Europea. Incluye distintos grupos de trabajo (WG) que desarrollan las normativas europeas sobre los requisitos de seguridad para las estaciones de repostaje, los sistemas del vehículo y las condiciones de operación:

- WG1: Requisitos de seguridad en las instalaciones de repostaje.
- WG2: Sistemas de alimentación de gas natural en el vehículo.
- WG3: Requisitos de seguridad en las operaciones con gas natural

El Comité Técnico 282 del CEN desarrolla las normas para los sistemas de almacenamiento del LNG a pequeña escala.

Con respecto a las normas ISO, existen tres grupos de trabajo y una importante cantidad de normas desarrolladas.

Entre los grupos de trabajo cabría destacar:

- ISO TC22/SC25: Tecnologías de los vehículos.
- ISO TC58/SC3: Depósitos de gas en el vehículo.
- ISO TC193: Composición del gas natural.



Y entre las normas ya publicadas:

- ISO/DIS 11439: Cilindros a alta presión para el almacenaje a bordo de gas natural como combustible para vehículos.
- ISO/TR 15403: Calidad del gas natural para uso como carburante.
- ISO 15500: Componentes del sistema de alimentación de CNG.
- ISO/DIS 15501: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo para los sistemas de alimentación de CNG.
- ISO 14469: Sistemas de conexión para el llenado de depósitos de CNG.
- ISO/DIS 19078: Inspección de depósitos de CNG en el vehículo.

3.3.7. Apoyos institucionales

Para poder cumplir los objetivos de sustitución de los combustibles tradicionales planteados en la Unión Europea, las ayudas que se están dando desde la Administración Central a este tipo de combustible son las siguientes:

1. Exención de impuestos: Al gas natural le es aplicable un tipo de impuesto reducido (del orden de 1/6 del correspondiente a los carburantes tradicionales), mientras que el **tipo aplicable al biogás empleado en automoción es del 0%** (de acuerdo con los Presupuestos Generales para el Año 2009).
2. Ayudas para la **adquisición de vehículos nuevos**: Dentro de la Estrategia E4, se han previsto ayudas para la adquisición de vehículos de gas natural de hasta 2.000 € por vehículo para los vehículos ligeros y hasta 12.000 €/vehículo para los pesados.
3. Ayudas para la **instalación de estaciones de suministro**: También dentro de la Estrategia E4, para las estaciones de repostaje de vehículos están admitidas ayudas de hasta 30.000 € para las instalaciones individuales y hasta 60.000 € para las colectivas.

También algunas comunidades autónomas tienen establecidas ayudas adicionales que complementan estas ayudas estatales.



3.4 Aspectos logísticos de la distribución

A pesar de sus ventajas, el uso de vehículos a gas natural se encuentra con varias limitaciones, principalmente el depósito de combustible y la infraestructura disponible para la distribución en las estaciones de servicio convencionales.

El gas natural puede ser almacenado en cilindros, ya sea CNG ó LNG, y estos van situados normalmente en el maletero del vehículo, reduciendo el espacio disponible para otros usos, especialmente en los viajes largos. Además, debido a su menor densidad energética, requiere de depósitos más voluminosos que en el caso de los combustibles tradicionales.

El gas natural utilizado puede estar comprimido ó licuado. En este segundo caso, el gas ocupa menos volumen y el vehículo dispondrá de una mayor autonomía, pero requiere de un coste adicional para licuar el gas y mantenerlo como tal en el depósito del vehículo, en especial cuando el vehículo no se va a utilizar regularmente.

Se encuentra en fase de desarrollo un sistema de almacenamiento del gas natural en forma de adsorción en materiales nanoporosos (ANG ó Adsorbed Natural Gas), a presiones en el entorno de 35 bares [1]. De este modo se consiguen mayores densidades en el almacenamiento del combustible y depósitos más pequeños. Este sistema aún no está comercializado.

El llenado de los depósitos de CNG se puede hacer con dos sistemas diferentes:

- Sistemas de carga rápida: compuesto por una estación de regulación y medición (ERM), sistema de compresión y secado, cilindros de almacenamiento y surtidor. En este diseño, el gas natural necesario para rellenar los cilindros de almacenamiento se comprime previamente y los vehículos repostan por diferencia de presión entre los cilindros y sus propios depósitos, lo que reduce el tiempo de llenado a unos minutos.
- Sistemas de carga lenta: No existen cilindros de almacenamiento, y el gas se comprime a medida que se inyecta en el depósito del vehículo. Implica mayor tiempo de recarga, pero resulta más barato. Sistema apropiado para vehículos de flota, que descansan por las noches ó durante una gran parte del día (6-8 horas).

También existen sistemas mixtos, que combinan ambos en función de las necesidades de servicio del vehículo. El precio de una estación de repostaje puede oscilar entre 3.500 euros y 10.000 euros para una estación que da servicio a unos cuantos vehículos, hasta varios cientos de miles de euros para grandes estaciones



capaces de abastecer a cientos de vehículos. En general, se puede estimar que la inversión oscila entre 1.000 y 2.000 euros por vehículo.

Las estaciones de llenado pueden ser públicas (de uso general) ó privadas (de uso particular). Normalmente a las empresas que poseen un gran número de vehículos a CNG, en especial vehículos pesados, les resulta más práctico y económico disponer de su propia estación de llenado.

Se han desarrollado también instalaciones “caseras” para el llenado nocturno a partir de las tuberías de gas residencial, pero no está permitido en todos los países. En Estados Unidos, la empresa “FuelMaker” ha desarrollado un sistema casero que permite el llenado a partir de las conducciones de gas natural: “Phill Home Refueling Appliance” [11].

El sistema de conexión para el llenado del depósito es sencillo pero, en cualquier caso, se precisa de sistemas especiales de repostaje, con mayor complejidad que los surtidores de gasolina ó gasóleo. Los surtidores deben de hacer un cerramiento estanco sobre la boca de llenado del vehículo y disponer de los elementos de corte necesarios, de acuerdo con las normativas de seguridad establecidas, además de tener que reservar un espacio adicional para situar los compresores y los depósitos ó bombonas de almacenamiento (*Figura 14*).

En función de todos los condicionantes anteriores, del número de vehículos, del grado de implicación de la compañía suministradora de gas y, en definitiva, de todos los costes asociados, las instalaciones de repostaje pueden instaladas según distintas modalidades:

- Instalación exclusiva para los vehículos de la propia flota.
- Instalación para vehículos propios, con servicio al exterior.
- Instalación pública de llenado.
- Instalación de repostaje “casera” o “home refueling system”

Las instalaciones de suministro de LNG son totalmente diferentes. Se necesitan depósitos aislados y no existe la posibilidad de utilizar sistemas de carga lenta. Tampoco sería necesario estar junto a una toma de la red de gas natural canalizado, pues se suministraría en cisternas, de un modo similar a los carburantes tradicionales.



Figura 9. Cabinas de compresión y almacenamiento con surtidor de CNG



4 Estudio económico de la utilización del gas natural en los vehículos

A continuación se presenta un estudio comparativo de la utilización del gas natural frente al gasóleo. Para ello se ha elaborado una tabla EXCEL (Anexo IV) donde se puede calcular el ahorro (en euros, % respecto a la inversión total y % respecto al exceso de inversión) al variar diferentes parámetros de costes, subvenciones, consumos y vida útil del vehículo. Los resultados finales vienen expresados en función del kilometraje anual del vehículo. La tabla sería igualmente aplicable al biogás, sin más que modificar el precio del combustible (el coste de los vehículos no variará).

El estudio ha sido realizado para un vehículo ligero y para un vehículo pesado (autobús urbano) y muestra la ganancia o ahorro (en euros) resultante en el caso de utilizar un vehículo de gas natural en lugar de uno de gasóleo. En los casos en que el resultado sea negativo, no habrá ahorro, sino pérdida.

Las hipótesis consideradas para los dos ejemplos planteados se presentan en la tabla 15.

Tabla 7. Hipótesis consideradas para el estudio comparativo de costes de un vehículo ligero y un autobús urbano

	Vehículo diesel:	Vehículo de Gas Nat.:
Coste de un vehículo ligero (€):	25.000	27.500
Coste de un autobús urbano (€):	250.000	280.000
Duración de un vehículo ligero:	300.000 km. ó 10 años	300.000 km. ó 10 años
Duración de un autobús urbano:	1.000.000 km. ó 15 años	1.000.000 km. ó 15 años
Precio del combustible (€/l):	0,85 €/l	0,55 €/m ³
Consumo vehículo ligero:	7 l/100 km.	8,5 m ³ /100 km.
Consumo autobús:	50 l/100 km	60 m ³ /100 km
Subvención vehículo ligero (€):	0	2.000
Subvención autobús (€):	0	12.000

No se han considerado, por ser poco significativas y/o dependientes de otros factores (número de vehículos, situación geográfica,...), las siguientes variables:



A favor del Gas Natural:

- Costes de mantenimiento.
- Ayudas a estaciones de suministro.
- Otras subvenciones diferentes de la estatal.

En contra del Gas Natural:

- Sobrecoste de llenado.
- Medidas de seguridad adicionales en talleres.

Tabla 8. Resultados obtenidos al aplicar la tabla de costes al ejemplo de un vehículo ligero

Km. anuales:	COSTES (€ COMBUSTIBLE:		COSTES (€ AMORTIZACIÓN:		COSTES (€ TOTALES:		AHORRO	AHORRO	AHORRO /	AHORRO /
	Diesel:	GNC:	Diesel:	GNC:	Diesel:	GNC:	ANUAL:	TOTAL:	TOTAL:	ADICIONAL:
							(€)	(€)	(%)	(%)
10.000	595	467,5	2500	2550	3095	3018	78	775	3,04	155,00
20.000	1190	935	2500	2550	3690	3485	205	2050	8,04	410,00
30.000	1785	1402,5	2500	2550	4285	3953	333	3325	13,04	665,00
40.000	2380	1870	3333	3400	5713	5270	443	3325	13,04	665,00
50.000	2975	2337,5	4167	4250	7142	6588	554	3325	13,04	665,00
60.000	3570	2805	5000	5100	8570	7905	665	3325	13,04	665,00
70.000	4165	3272,5	5833	5950	9998	9223	776	3325	13,04	665,00
80.000	4760	3740	6667	6800	11427	10540	887	3325	13,04	665,00
90.000	5355	4207,5	7500	7650	12855	11858	998	3325	13,04	665,00
100.000	5950	4675	8333	8500	14283	13175	1108	3325	13,04	665,00

Tabla 9. Resultados obtenidos al aplicar la tabla de costes al ejemplo de un autobús urbano

Km. anuales:	COSTES (€ COMBUSTIBLE:		COSTES (€ AMORTIZACIÓN:		COSTES (€ TOTALES:		AHORRO	AHORRO	AHORRO /	AHORRO /
	Diesel:	GNC:	Diesel:	GNC:	Diesel:	GNC:	ANUAL:	TOTAL:	TOTAL:	ADICIONAL:
							(€)	(€)	(%)	(%)
10.000	4250	3300	16667	17867	20917	21167	-250	-3750	-1,40	-20,83
20.000	8500	6600	16667	17867	25167	24467	700	10500	3,92	58,33
30.000	12750	9900	16667	17867	29417	27767	1650	24750	9,24	137,50
40.000	17000	13200	16667	17867	33667	31067	2600	39000	14,55	216,67
50.000	21250	16500	16667	17867	37917	34367	3550	53250	19,87	295,83
60.000	25500	19800	16667	17867	42167	37667	4500	67500	25,19	375,00
70.000	29750	23100	17500	18760	47250	41860	5390	77000	28,73	427,78
80.000	34000	26400	20000	21440	54000	47840	6160	77000	28,73	427,78
90.000	38250	29700	22500	24120	60750	53820	6930	77000	28,73	427,78
100.000	42500	33000	25000	26800	67500	59800	7700	77000	28,73	427,78

En cualquiera de los ejemplos se puede ver que, aún en el caso de que el número de kilómetros recorridos por el vehículo sea muy bajo, existe siempre un ahorro muy



importante frente al gasóleo, ya que el precio de un vehículo a gas natural varía muy poco con respecto al de un vehículo diesel, mientras que el precio del gas natural resulta bastante inferior al del gasóleo. De todos los casos supuestos, sólo en el caso de un autobús que recorre menos de 20.000 km anuales, no estaría justificada la utilización de gas natural desde el punto de vista económico.

Un estudio comparativo con vehículos de gasolina hubiese mostrado ahorros aún mayores que en el caso del gasóleo.

5 Referencias

1. IDAE, “Nuevos combustibles y tecnologías de producción: Situación y perspectivas para automoción”. Ed. IDAE. Madrid, 2008.
2. Alternative Fuels & Advanced Vehicles Data Center. US Department of Energy. http://www.afdc.energy.gov/afdc/vehicles/natural_gas_what_is.html
http://www.afdc.energy.gov/afdc/vehicles/natural_gas_emissions.html
http://www.afdc.energy.gov/afdc/fuels/natural_gas_refueling.html
3. Tomasetto Achille. <http://www.tomasettoachille.com/>
4. Hardstaff Dual Fuel Technologies.
<http://www.hardstaffgroup.co.uk/site/hardstaff-dual-fuel-technologies>
5. International Association for Natural Gas Vehicles (IANGV).
<http://www.iangv.org/tools-resources/statistics.html>
<http://www.iangv.org/tools-resources/oem-vehicle-directory/Vehicles-by-Type.html>
6. http://en.wikipedia.org/wiki/Compressed_natural_gas.
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_gas_vehicles
7. García Poggio, Enrique. “Gas Natural: Una alternativa real para la mejora de la calidad del aire urbano”. Presentación GAS NATURAL, 2008.
http://www.mma.es/secciones/medios_comunicacion/campanas/pdf/la_apuesta_de_gas_natural.pdf
8. Abbot, D.J. “The Impact of Natural Gas Quality on Gas Turbine Performance”. European Turbine Network. Febrero 2009. http://www.eu-gasturbine.org/resources/1/Publications/ETN_FuelPP_Final_Feb%2009.pdf



9. “Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-Makers in Developing Cities.

Module 4d: Natural Gas Vehicles”. MVV InnoTec GmbH, Stichting ENGVA. Eschborn, 2002.

10. “Safety Assesment of Methane-operated Vehicles, for the nordic natural gas bus project”. DNV Technical Report N° 92-3537. 1992.

11. FuelMaker Corporation. <http://www.myphill.com/>

12. Business Environment of the CEN/TC.

<http://www.cen.eu/nr/cen/doc/PDF/6307.pdf>