

MOTOR DE GAS NATURAL. TECNOLOGÍA Y APLICACIÓN AL RECOLECTOR DE RESIDUOS URBANOS

(1ª PARTE)

INTRODUCCIÓN

La legislación europea en materia de control de emisiones de gases de escape de los motores, ha establecido una progresiva reducción de los niveles de emisión a través de la normativa Euro. Esta legislación, ya en vigor desde hace años, ha implicado de forma indirecta un gran avance en los desarrollos tecnológicos de los motores.

El avance tecnológico logrado es tal que, en tan sólo los diez años transcurridos desde que entrara en vigor la norma Euro 0 en octubre de 1990 hasta hoy que nos encontramos bajo las exigencias de la norma Euro 2. El rendimiento de los motores ha mejorado tanto como que, con carácter orientativo, un motor diesel pesado en 1990, obtenía 21 CV por cada 1.000 cc. de volumen de motor; en 1995 (normas Euro 2), alcanzaba aproximadamente 35 CV por 1.000 cc. y en la próxima aplicación de norma Euro 3 llegará a los 40 CV o más, es decir la norma Euro 2 supuso mejorar el rendimiento un 63% y la Euro 3 supondrá mejorarlo un 86% admitiendo el ejemplo anterior como comparación.

Los niveles de emisión marcados por las normas Euro mejorarán aún más como veremos. Estas mejoras son claramente eficaces para el transporte en general. Sin embargo, en zonas urbanas congestionadas esta evolución puede ser insuficiente al menos con la evolución prevista. Empleando combustibles alternativos como el GN, es posible mejorar drásticamente los niveles de emisiones. Es el caso de los camiones de recolección de basura cuyas exigencias de rendimiento y prestaciones exigen un

Alfonso García García
Ingeniero Industrial
Director del Departamento de
Maquinaria M.A. de FCC, S.A.

nivel de tecnología del que nos ocuparemos en este trabajo.

El estado de la tecnología (examinado aquí muy brevemente) nos indica que, tomando como referencia el motor diesel y tratando de que cualquier tecnología a considerar sea realmente alternativa a este combustible (es decir que aporte similares prestaciones y reducción objetiva de emisiones) es obligado decir que sólo el motor de GN o de GLP ofrecen prestaciones similares porque la tecnología de vehículos eléctricos presenta hoy un estado aún muy incipiente y solamente los vehículos híbridos permitirán a medio plazo alcanzar prestaciones equivalentes.

La utilización del GN en vehículos de servicio urbano es algo ya ampliamente comentado en diferentes publicaciones y artículos que hemos escrito anteriormente. Sin embargo, lo hasta ahora expuesto, lo ha sido sobre los comentarios que esta tecnología ha ido deparando en su fase de prototipos y de adaptación a los vehículos de servicio urbano.

Nuestro objetivo será exponer el resultado final de esta tecnología ya consolidada y de gran interés en su aplicación a los vehículos de recolección y por extensión al resto de los que se emplean en casi todos los servicios de una gran ciudad.

El proyecto se fundamenta en la tecnología desarrollada para poner en servicio casi 100 vehículos de recolección de residuos urbanos (RSU) que hoy circulan empleando como combustible el GN, no presentando prác-

ticamente diferencias de uso y prestaciones respecto a los de motor diesel equivalentes, logrando así que esta técnica pase de la fase de prototipos a la de asentamiento y ya posible aplicación definitiva.

EVALUACIÓN Y PROPIEDADES DEL GN COMO COMBUSTIBLE DE AUTOMOCIÓN

El GN es un combustible gaseoso, compuesto principalmente por metano, y con origen en yacimientos habitualmente independientes del petróleo. Por tanto, es una fuente de energía independiente del petróleo crudo. Su poder calorífico similar al gasóleo y al GLP (Gas Licuado de Petróleo).

El poder antidetonante es muy inferior al del gasóleo y, por tanto, el ciclo de combustión del motor térmico deberá ser de encendido por chispa o provocado (motor MEP). Desde el punto de vista de rendimiento final en el motor, se obtendrá menos rendimiento que en un diesel equivalente por el balance térmico final del proceso de combustión.

La base del diseño que se persigue consiste en partir de un motor diesel (arquitectura diesel) y por tanto de encendido por compresión (motor MEC) y transformarlo en motor MEP y sin modificar las partes básicas del primero como bloque, culata y cigüeñal. Las razones de este criterio son principalmente de coste. Sin embargo, es necesario cambiar: la relación de compresión, sistemas de alimentación, de encendido, de control del motor, de regulación, turbo-compresor y circuito de escape.

El GN en el proceso de combustión, por su naturaleza, no produce

Propiedades de los combustibles	Diesel	Gasolina	Metanol	Etanol	GLP	GNC	DME
Fórmula	C ₁₅ H ₂₈	C ₇ H ₁₅	CH ₄₀	C ₂ H ₆₀	C ₃ H ₉	CH ₄	C ₂ H ₆₀
Peso molecular	208	99	32	46	45	16	46
Contenido C (%)	86,1	84,9	37,5	52,2	80,0	75,0	52,2
Contenido H (%)	13,9	15,1	12,5	13,0	20,0	25,0	13,0
Contenido O (%)	0,0	0,0	50,0	34,8	0	0	34,8
Densidad 20 °C (kg/l)	0,840	0,740	0,795	0,790	0,540	--	0,668
PCI (Mj/kg)	42,7	42,5	19,7	26,8	46,0	47,7	28,4
Nº de octano	--	95	>110	>100	100	130	--
Emisión CO ₂ (g/Mj)	74,2	73,3	70,0	71,5	63,8	57,7	67,5

La densidad indicada es en estado líquido.

GLP: Gas Licuado de Petróleo (50% propano y 50% butano).

GNC: GN comprimido.

DME: Dimetiléster.

humo negro ni partículas y más adelante examinaremos y enjuiciaremos el resto del proceso de combustión a fin de justificar el uso de este combustible por su nivel de emisiones. Al ser un combustible gaseoso con la cadena de hidrocarburo más simple que existe, su comportamiento es muy favorable en el control del proceso de combustión porque oxida fácilmente los hidrocarburos inquemados (contaminante normalizado de control obligado en la normativa europea) en el circuito de escape y catalizador. Además produce un nivel de CO₂ muy inferior a otros combustibles gaseosos y a la gasolina, siendo en conjunto similar al emitido por el diesel equivalente, siempre considerando al motor en su concepción básica, es decir, sin efectuar tratamiento de gases de escape en la fase de post-combustión.

El GN se encuentra en estado gaseoso a temperatura y presión ambientales. Para poder usarlo satisfactoriamente en un vehículo de recolección, es imprescindible comprimirlo a fin de alcanzar el nivel de autonomía exigible en estos servicios. Más adelante comentaremos las diferencias de tratamiento de este gas en su versión de gas comprimido y de gas licuado (GNL). Esta condición exige emplear depósitos de gas comprimido a alta presión (200 bar) y en consecuencia se aumenta el peso propio del vehículo.

Actualmente hay una importante red de distribución de GN que permite disponer de forma sencilla del combustible en los parques de maquinaria. El combustible empleado es el mismo que se distribuye a red urbana para uso doméstico, con las diferencias de tratamiento de la acomoda al centro de compresión.

La necesaria compresión del gas exige inversiones importantes en las estaciones de compresión y una aportación externa de energía para el accionamiento de los compresores.

El coste final del combustible para su utilización en esta aplicación es objetivamente más caro que el del gasóleo, principalmente, por todos los aspectos antes indicados y por el precio del propio combustible que sigue las exigencias de política fiscal para los combustibles gaseosos.

Desde el punto de vista de seguridad, la consideración fundamental es que es un combustible gaseoso, más ligero que el aire, invisible y en consecuencia su control y utilización exige procedimientos diferentes de los que exige el uso de los combustibles líquidos habituales. A tal fin, se han diseñado y construido los sistemas específicos de uso, avituallamiento y reparación para hacer posible y segura la utilización en los parques de vehículos de recolección, en muchos casos diseñando procedimientos y sistemas no contemplados en la legislación vigente. Por otra par-

te, los depósitos, red de tubos y válvulas responden a exigencias reglamentadas y muy estrictas.

En general, las precauciones especiales son debidas a la naturaleza propia de un combustible diferente a los hasta ahora empleados y que se debe almacenar a gran presión, pero objetivamente es más seguro de manejo que la gasolina a pesar de su estado líquido a presión atmosférica, tanto por su volatilidad como por su índice de inflamabilidad.

A modo de comparación, en el siguiente cuadro se indican las propiedades y características de diferentes combustibles:

Como puede observarse en el cuadro anterior, comparando principalmente las características del diesel (combustible actual) con el GNC, se puede ver la importante diferencia entre el peso molecular (13 veces mayor en el diesel) y la similitud de PCI (en unidades másicas del poder calorífico inferior). Obviamente esta comparación en términos volumétricos es claramente diferente y exige la compresión del gas para lograr la equivalencia energética equivalente.

Igualmente es muy importante constatar la menor aportación, por unidad de contenido energético, de CO₂ del GNC respecto a todos los demás combustibles indicados en la tabla y concretamente, un 22,2% menor de la del diesel.

Los valores anteriores tienen una trascendencia decisiva en el comportamiento de los diferentes combustibles en el proceso de combustión y de emisiones.

El GN de uso habitual en España tiene un poder calorífico de 34,3 MJ/m³ equivalente a 8.200 kcal/m³ aproximadamente con una densidad de 0,719 kg/m³. Dado que su densidad relativa respecto al aire es de 0,56, se trata de un combustible mucho más ligero que el aire y en consecuencia se dispersa hacia arriba en forma gaseosa y a una velocidad de 0,8 a 0,9 cm/s. Esta condición retarda considerablemente la acumulación del gas en ambientes cerrados por lo que bastarían sistemas simples de ventilación para disipar hipotéticas fugas.

A diferencia del GN, la gasolina se dispersa en forma líquida (vapores) con una tendencia inmediata a formar concentraciones puntuales y elevadas de gran peligro potencial. El gasóleo se comporta de forma similar a la gasolina en cuanto a que su dispersión es también líquida, pero, sin embargo, origina en el ambiente estancamientos más persistentes, es más difícil de incendiar que la gasolina pero, una vez encendido, por su persistencia, puede tener consecuencias más graves.

En cuanto al riesgo de incendio, la temperatura de autoencendido del GN es del orden de unos 550 °C, casi el doble que el gasóleo o gasolina por lo que, respecto al riesgo de autoencendido, es claramente menos peligroso. En lo concerniente al riesgo de explosión o combustión, el metano se caracteriza por un rango de mezcla combustible con el aire comprendido entre un 5% y un 15%. Dado que el límite inferior es superior al de otros carburantes (la gasolina sólo un 1,1%) y también es mucho más volátil, su comportamiento es en este sentido es menos peligroso.

Considerando todas las características expuestas y tratando de hacer un balance objetivo de este combusti-

ble, vemos que representa una alternativa de gran importancia al gasóleo como combustible limpio y también como fuente de energía independiente del petróleo. Todas las características expuestas se resumen en el siguiente cuadro:

EL GN COMO COMBUSTIBLE.

- Gas más ligero que el aire (densidad relativa al aire 0,56).
- Gas no tóxico para la salud.
- Emisiones excepcionales de gases de escape y de ruido. No alcanzables por el motor diesel a corto-medio plazo.
- Baja emisión de CO₂ y baja contribución a la formación de la capa de ozono.
- Rendimiento energético menor que en los motores diesel.
- La autonomía necesaria para los servicios de recolección exige depósitos de gas comprimido a presión (200 bar) de 640 a 1.000 litros, lo que comporta un aumento de peso o tara del vehículo.
- La compresión del gas exige una aportación externa de energía.
- Combustible no dependiente del petróleo.

Para concluir este primer apartado, debemos hacer un balance de las propiedades fundamentales de este combustible en comparación con el motor diesel y su combustible, el gasóleo. De este combustible hay que destacar las ventajas e inconvenientes que se resumen en el cuadro adjunto.

El GN es susceptible de emplearse con suficiente autonomía en los camiones de recolección de dos formas: en estado gaseoso (GNC) y en estado líquido (GNL). A muy baja temperatura (-160 °C a -170 °C) y baja presión (3 a 4 bar), el gas cambia de fase y alcanza el estado líquido. Esto comporta una importante densidad de energía, es decir, es posible confinar en poco volumen la energía suficiente como para realizar los servicios de recolección de un turno sin tener que emplear los volúmenes de depósitos a presión que exige el GN comprimido.

La evaluación de densidades y acumulación de energía en tanques se puede ver en el siguiente cuadro:

Otro factor de gran interés es el aumento de peso que exige el GN comprimido, respecto al GNL y gasóleo:

El planteamiento así expuesto es de gran interés, pero hay varios aspectos que no justifican el GNL como alternativa sostenible al GNC. Algunas de estas reflexiones son las siguientes:

- El GNL es muy costoso de producir y su almacenamiento comporta inexcusablemente la recuperación del gas venteado, es decir, el % del gas líquido que por cambios de temperatura se va a gasificar, bajo este requerimiento es importante canalizar este gas comprimido a la red general. Su canalización y distribución a cada recolector ha de ser absolutamente estanca e isoterma, lo que es muy difícil de garantizar.

- El GNL en el camión debe ventear y en este caso a la atmósfera. En la ejecución del servicio se producirán descargas aleatorias y fortuitas de gas a la atmósfera. al encontrarse el vehículo en la calle es un factor de cierta consideración dado que las variaciones de temperatura, en un turno de trabajo por ejemplo el de mañana entre las 7 horas y las 14 horas, puede llegar a ser de: +15 a 20 °C.

El comportamiento y control del GNL en motores de inyección es difícil dado que la presión de inyección es de 7 a 9 bar, requisito que exige que el GNL deba ser comprimido ligeramente desde su estado líquido a baja presión (próxima a la presión atmosférica) hasta la presión de inyección, o ser vaporizado desde los depósitos a través de una válvula reguladora de presión, lo que es difícil de controlar en tiempo real dentro del proceso de combustión del motor que seguidamente abordaremos. Por este motivo, la gran mayoría de motores de GN equipados con GNL realizan la combustión, preparando la mezcla con carburador, lo que da más

EL GASÓLEO Y EL MOTOR DIESEL.**BALANCE DE UTILIZACIÓN Y RENDIMIENTO**

- Alcanza el rendimiento térmico más alto de todas las máquinas propulsadas por un motor térmico.
- Alcanza niveles de emisión de: CO; HC y CO₂ aceptables y la tecnología electrónica de aplicación al control de la combustión del diesel permite expectativas optimistas en cuanto al aumento de rendimiento térmico y disminución de las emisiones.
- El estado actual de la tecnología alcanza importantes niveles de fiabilidad.
- La autonomía del combustible es un factor muy favorable para las aplicaciones de servicio urbano.
- Los nuevos motores Euro 3 han permitido dar paso a la tecnología electrónica en el control de la combustión de motores diesel, han aparecido los sistemas EDC de control del motor (inyección electrónica), inyectores bomba a muy alta presión de inyección, filtros de partículas y sistemas de recirculación de gases de escape. En general, esto va a significar una mejora en los niveles de emisión e incluso en los valores de emisión de ruido.
- El nivel de emisiones de NOx y partículas es de difícil y muy costosa reducción.
- Es ruidoso en relación a otros motores térmicos.
- Los niveles de reducción de emisiones que impondrá la legislación Europea (normas Euro), a corto plazo norma Euro 3, de aplicación prevista en 2001, supone una reducción de emisiones que comportará aumentos de consumo específico y exigirá considerar también acciones complementarias sobre los combustibles.
- El precio del combustible, en dependencia del petróleo, alcanza ya valores importantes en comparación al GN.

emisiones que en los motores de inyección y menos prestaciones generales del equipo, como veremos más adelante.

Como conclusión principal de este capítulo debemos destacar la importancia y disposición del GN como combustible apto para lograr disminuir drásticamente las emisiones que con el gasóleo y su estado de desarrollo actual podemos alcanzar. Ya examinaremos cómo alcanzar estas posibilidades.

ESTADO DE LA TECNOLOGÍA Y DE LAS EMISIONES

El examen de la tecnología del motor de GN en su aplicación al recolector de RSU y, en general, al ámbito urbano, exige conocer el proceso de combustión de este motor para justificar brevemente el uso de este combustible en los motores objeto de nuestra aplicación y análisis.

Actualmente es motivo de gran preocupación reducir las emisiones de gases de escape y de nivel de sonido en los vehículos de ámbito urbano. Este requerimiento, llevado al terreno del realismo, exige algunas

características que, por su interés, deben tenerse muy en cuenta:

- Los motores que el servicio de recolección necesita y usa actualmente son de arquitectura diesel. El motor de gas funciona con sistema de ciclo térmico de encendido provocado y actualmente, para el nivel de potencia y par motor necesarios, no hay motores con ciclo térmico de encendido provocado (por chispa) que puedan aplicarse a estos servicios. En consecuencia, cualquier aplicación encaminada a mejorar drásticamente las emisiones, exige partir del motor

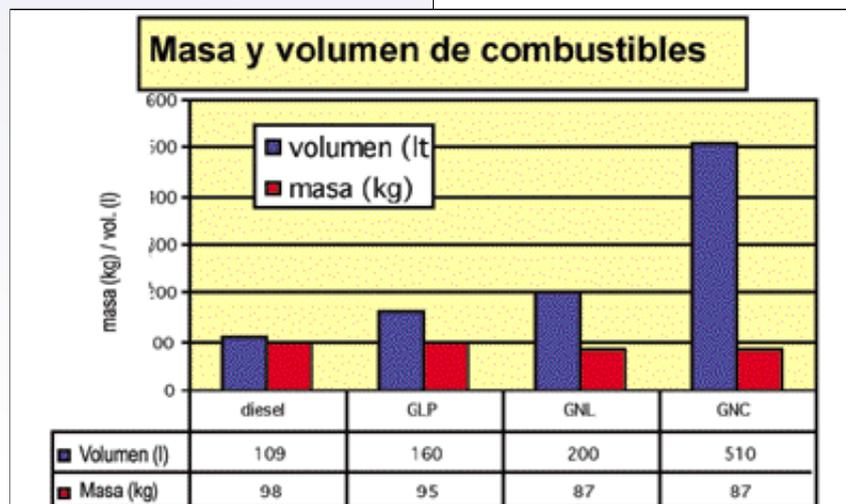
diesel y modificarlo, siempre bajo condiciones de ejecución de bajo coste a pesar de las cortas series de fabricación.

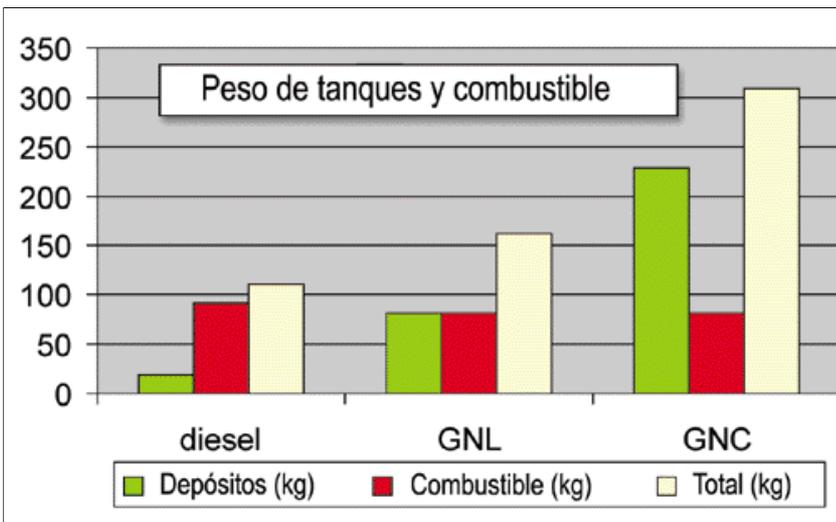
- Cualquier aplicación o tecnología a aplicar, no debe restringir los actuales rendimientos y niveles de prestaciones de los motores actuales.

• Los motores diesel, hoy ya en servicio, para aplicaciones de recolección convencional o selectiva en equipos compartimentados, son capaces de accionar las bombas de las carrocerías a solo 800-900 rpm, como límite máximo, para mantener un bajo nivel de ruido, aportando más de 100 CV a este régimen, lo que da idea del par motor exigible tanto a los motores diesel como a los de GN.

• Cualquier aplicación o modificación exige cumplir, como mínimo, los requisitos de seguridad que la legislación vigente demanda y en el caso que nos ocupa y como se verá mas adelante, ha sido necesario acometer trabajos complementarios de adecuación de talleres y zonas de avituallamiento a las exigencias de implantación del sistema a una flota de vehículos importante.

• La definición y proyecto del chasis de aplicación a los vehículos de servicio urbano en general y de recolección en particular, deben satisfacer los requerimientos de las carrocerías de forma igual a como lo hace el motor diesel, sin otra restricción que la





diferente forma de almacenamiento del combustible sobre el vehículo.

Proceso de combustión y control de las emisiones

El proceso de combustión del motor de GN debe ser brevemente comentado a fin de comprender por qué es aceptable el uso de este combustible como forma de restricción inmediata de las emisiones.

El motor térmico permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica almacenada en el combustible, a través del proceso de la combustión. La evolución del proceso está formada por varias fases: admisión del combustible en la cámara de combustión, compresión del mismo, combustión, expansión y expulsión (emisión de escape). Las fases de admisión y escape son las de "renovación" de la carga y las de compresión, combustión y expansión son las que constituyen el proceso termodinámico propiamente dicho, que transforma el proceso de combustión en proceso mecánico.

La combustión es una reacción química de oxidación del combustible en el oxígeno del aire, reacción exotérmica y en consecuencia con liberación

de energía. Además, exige aportación de energía de activación exterior (acción de la bujía).

Los productos contaminantes formados en la combustión dependen de que las reacciones de combustión sean o no completas, de la naturaleza del combustible y de su composición. Es a partir de aquí donde se comienzan a diferenciar los combustibles objeto de este trabajo.

El metano (CH₄) sólo tiene en su composición carbono e hidrógeno. El gasóleo tiene, además, en su composición aditivos derivados del azufre. La combustión real y no completa en ambos casos produce: CO₂; H₂O; H₂; CO; hidrocarburos sin quemar o par-

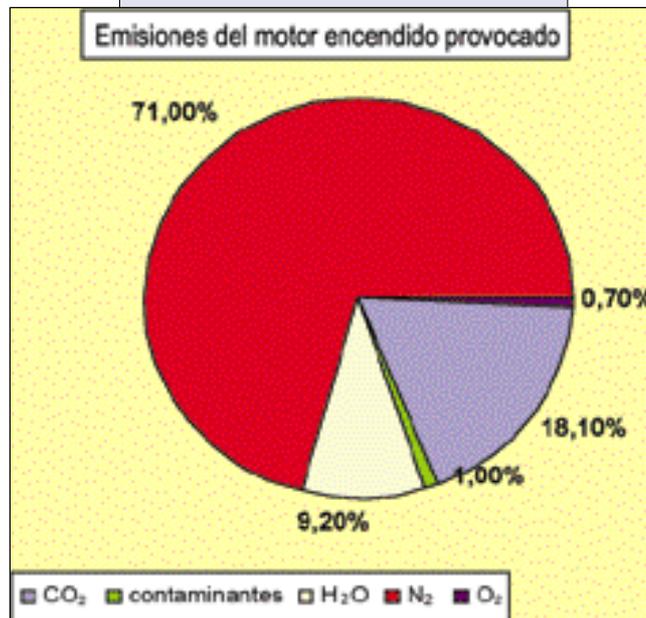
cialmente quemados (parafinas, aldehídos etc.) y además, como consecuencia de la oxidación del nitrógeno de la atmósfera, NO y NO₂. En el motor diesel además se producirán: humos (partículas) y los contaminantes procedentes del azufre de los aditivos incorporados a este combustible.

Como podemos ver, el uso de metano en vez de gasóleo evita, de entrada, las emisiones de partículas y de los derivados del azufre. Las restantes emisiones se agrupan en:

- Agua (9,2%).
- Nitrógeno (71%).
- CO₂ (18,1%)
- Oxígeno (0,7%).
- Contaminantes (1%):
 - Óxidos de nitrógeno NO_x (0,08%).
 - Monóxido de carbono CO (0,85%).
 - Hidrocarburos sin quemar HC (0,05%).
 - Partículas (humos. 0,005%).

Como hemos podido ver en la tabla anterior, las emisiones contaminantes suponen sólo el 1% del total de la emisión. A pesar de todo, el automóvil es responsable del 10 al 15% de la contaminación atmosférica y en el ámbito urbano puede alcanzar hasta un 50%. Por tanto, es de gran importancia su conocimiento y control para lograr su reducción.

La concentración de los compuestos contaminantes depende fundamentalmente del dosado. Se entiende por dosado a la relación aire / combustible utilizada en el proceso de combustión. Como forma usual de referencia para evaluar la mezcla, se emplea el llamado "dosado estequiométrico" o la relación aire-combustible necesaria para lograr la reacción estequiométrica, es decir el dosado con el que se lograría la combustión completa del combustible. Si se divide el dosado real entre el estequiométrico, se tiene el do-



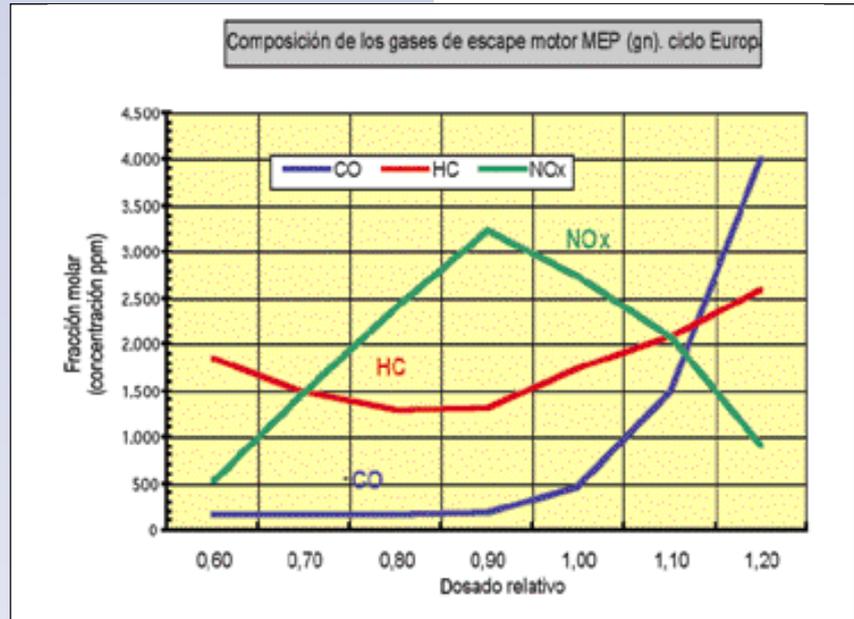
sado relativo, que es con el que seguidamente expondremos las diferencias fundamentales de la combustión del GN o gasóleo.

El dosado relativo de valor 1, es el dosado estequiométrico; el mayor de 1 implica mezcla rica, es decir exceso de combustible y el menor de 1, mezcla pobre o sea mezcla con exceso de aire. Los motores de encendido provocado (MEP), es decir, los de GN trabajan con relación aire / combustible próximas a 1 y los de encendido por compresión (MEC), o sea el diesel, lo hacen con mezcla pobre (<0,7).

En el esquema se expone la emisión real de un motor MEP pudiendo deducirse las siguientes conclusiones más importantes:

- La concentración de CO es pobre en la zona de mezclas pobres es decir con dosado relativo < 1, aumentando considerablemente en la zona de mezclas ricas.
- Los NO_x en el punto 0,91 de dosado relativo tienen aproximadamente su máximo, pero afortunadamente disminuye a partir de este punto tanto para mezclas pobres como para mezclas ricas.
- Los HC alcanzan su valor mínimo para un dosado relativo de 0,84 aproximadamente.

Con estos valores se tiene una idea de las emisiones que los motores pueden producir según la forma, equilibrio y composición de la mezcla combustible. La comparación al esquema equivalente del motor diesel



o de encendido por compresión (MEC), nos permitirá conocer la tecnología de control de emisiones y por qué se mejora considerablemente la emisión al emplear un combustible u otro.

La primera impresión después de examinar el esquema anterior es la diferencia de la composición de la mezcla para este tipo de motor (MEC) respecto al anterior (MEP). Aquí estamos ante mezclas pobres (siempre dosado < 1). Se concluye lo siguiente:

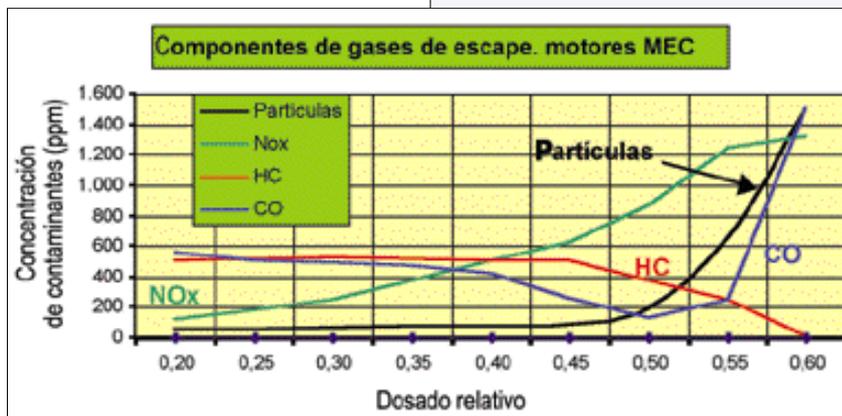
- La emisión contaminante de NO_x es máxima para valores menores del dosado que en los motores MEC. Los valores de emisión son menores que en el motor MEP porque el dosado es menor. A dosados iguales, la emisión sería mayor porque, dada la temperatura de trabajo, los NO emi-

tidos se oxidan posteriormente formando NO₂.

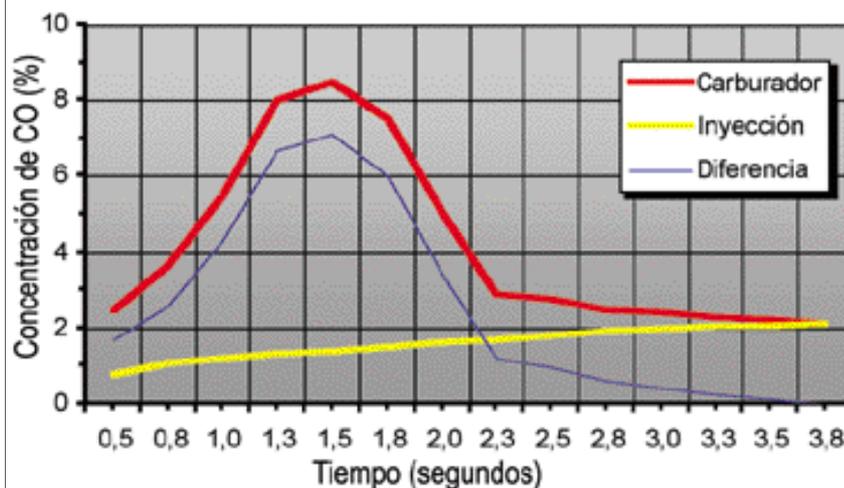
- La emisión de CO es baja y crece casi a la vez que los humos (partículas), que lo hacen en valores aproximados a 0,45 - 0,50. En los motores MEC su valor es despreciable.
- Los valores de HC son casi constantes y decrecen en las proximidades de crecimiento de los otros contaminantes. La concentración de esta emisión es comparable entre los motores MEC y MEP.
- Las partículas son un contaminante propio del motor MEC y son debidas principalmente a zonas de alta concentración de combustible en la cámara de combustión que, a la alta presión de inyección, deshidrogenan el hidrocarburo. Tal es el caso del centro del chorro del inyector muy rico en combustible y pobre de oxígeno. La mayor parte de estas partículas de carbono se deberán oxidar y forman CO₂.

El nivel de emisiones expuesto es para el sistema de carburación de motores MEP e inyección diesel en motores MEC. La forma de mejorar en cada caso las emisiones es el objeto de los siguientes comentarios.

El motor MEP de combustión de metano que exponemos en este trabajo es un motor de inyección de



**Emisiones de CO del motor MEP
en fase de aceleración**



gas y no de carburación. Esta tecnología supone una mejora muy importante en la aplicación de recolección de basuras dada la sollicitación de aceleración permanente a que es sometido el motor tanto para la compactación como para su aceleración propulsora después de cada parada.

Para comprobar la importante incidencia en las emisiones del sistema de alimentación del motor, en el siguiente esquema se puede ver a modo de ejemplo la emisión de CO en aceleración de dos motores MEP con sistemas de alimentación por inyección y carburación, siendo similar en los demás contaminantes:

La importante diferencia de emisión en aceleración se debe a que, al acelerar, el carburador enriquece la mezcla de forma considerable aumentando la concentración de CO en el escape. El motor con inyección no necesita tal enriquecimiento de la mezcla dado que el inyector regula en tiempo real y de forma muy exacta, al menos mucho mejor que el de carburador, el contenido de combustible.

En deceleración, el nivel de emisiones es también favorable al motor de inyección. En el caso del motor de carburación, al decelerar no hay un corte instantáneo de combustible y el combustible residual y debido a la acción de la depresión producida en el

colector de admisión, provoca un súbito y no deseado enriquecimiento de la mezcla. Como, además, hay restos de gases de escape en la cámara de combustión, en ese momento se producen importantes emisiones de HC y CO. En el motor de inyección el corte de ésta supone la parada instantánea de suministro de combustible a la cámara y, en consecuencia, el aumento de emisión en la aceleración es despreciable. Esta consideración afecta de forma muy especial al motor del recolector por lo antes indicado.

El funcionamiento del motor MEP de GN exige tener en consideración algunas cosas de gran importancia:

- La mezcla entra a la cámara de compresión a presión, fácilmente controlable dado que el combustible se encuentra almacenado a presión.

- La mezcla aire-combustible es muy homogénea y, en cualquier caso, mejor y más homogénea que con cualquier otro combustible líquido.

- El control del combustible al entrar a la cámara de combustión es muy satisfactorio al incorporar el sistema, mapas electrónicos de inyección de gas que permiten el control casi total de la mezcla, usando como variables de tiempo el retraso o avance de la inyección en cada momento y según la sollicitación.

- La tecnología empleada está sometida al control electrónico de la combustión, post-combustión y está optimizada a la aplicación específica del motor de recolección contando con un mapa de encendido propio.

- El sistema de inyección mejora decisivamente la función del catalizador.

- La aplicación específica de recolección exige una inter-relación instantánea entre el momento de emitir la orden de aceleración al motor y el momento en que éste debe responder. Este requerimiento de escasa importancia en un autobús urbano, en un recolector, por la gran cantidad de aceleraciones que se exigen al motor, puede suponer un gran retraso en la realización del servicio (en aplicaciones de pequeños recipientes más de una hora). Por tanto, y tratando de que no exista diferencia objetiva de rendimiento en la aplicación de un camión recolector a GN y uno diesel, es preceptivo diseñar el equipo con sistema de control electrónico centralizado, lo que exige un sistema de alimentación por inyección y también una central electrónica que controlará no sólo el funcionamiento del motor sino también la carrocería y la seguridad y funcionalidad general del equipo.

- Las emisiones son mejorables dado que con el sistema de control de combustión previsto, es posible catalizar el gas de escape y ejercer sobre él un control de la emisión en tiempo real optimizando al máximo los niveles de las emisiones.

Control catalítico de los gases de escape

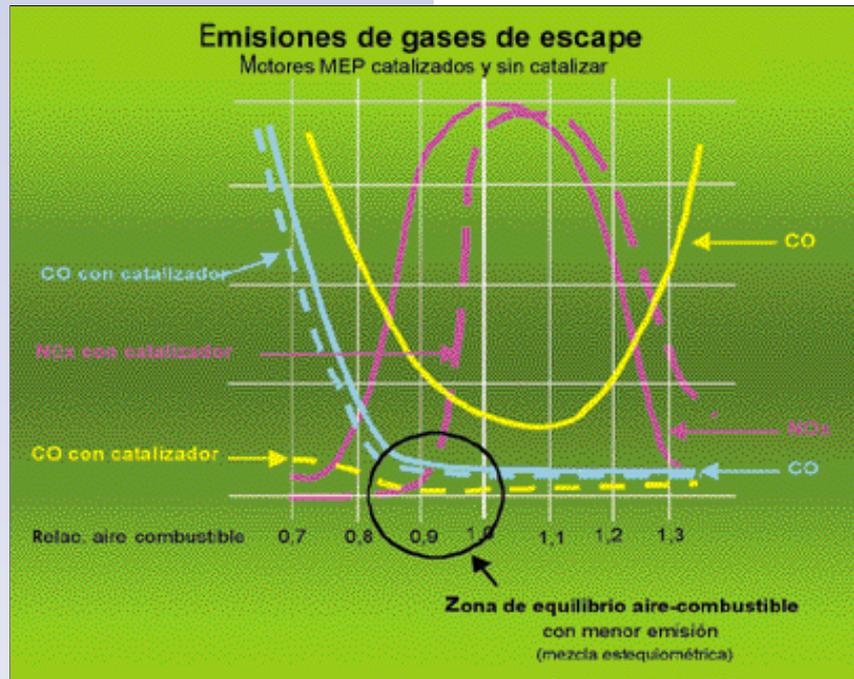
Podemos concluir que en el motor de GN, los niveles de partículas y derivados de azufre son nulos, lo cual, siendo muy importante, no es suficiente y más viendo que las emisiones de NO_x y HC son mayores y difícilmente reducibles respecto a las que alcanza el motor diesel, al menos en cuanto a las posibilidades de control de la mezcla. Sin embargo, el motor MEP en general y el de GN

en particular, permite realizar un tratamiento muy favorable de los gases post-combustión.

Una forma de reducir drásticamente las emisiones sería acabar las reacciones incompletas de combustión que no se han acabado totalmente en la combustión incompleta. Así, los CO y HC deben ser oxidados y los NO_x reducidos. Es decir, debemos emplear un catalizador que haga todas estas funciones.

El empleo del catalizador permitirá oxidar a menor temperatura que en la cámara de combustión los CO y HC. A diferencia con los catalizadores de los motores de gasolina, en nuestra aplicación con GN, no existe plomo en el combustible y en consecuencia no se disminuye la vida del catalizador de la misma forma, esperando una vida útil de no menos de 10.000 a 15.000 horas de servicio. Además, el catalizador reducirá (por ser catalítico) el NO_x a N₂.

La tecnología empleada es instalar un catalizador de tres vías y hacer funcionar al motor en condiciones de mezcla estequiométrica (Ver gráficos anteriores del motor MEP). El catalizador reduce el NO_x y, con el oxígeno producido en el seno del catalizador, se oxidarán los HC y CO. Sin embargo, este sistema exige un control muy exacto de la mezcla lo que es posible con el sistema de inyección y muy difícil de lograr con el de carburación, al menos de forma efectiva



y bajo las exigencias del recolector de basuras.

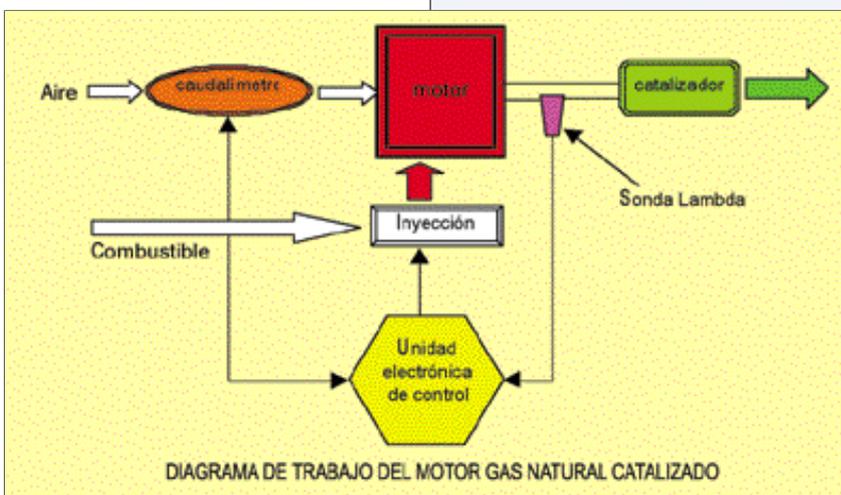
A continuación exponemos el esquema de diferencias fundamentales de los contaminantes con y sin la acción del catalizador:

El uso del catalizador no es suficiente a pesar de las importantes reducciones de emisión que se producen. Es preciso controlar siempre, en tiempo real y de forma automática los gases de escape y mantener siempre la mezcla estequiométrica. Para ello esta tecnología se completa con la instalación de una sonda de control de oxígeno en el escape llamada "sonda lambda". Se instala en el esca-

pe, posterior al motor y delante del catalizador, controlará el oxígeno y, en función de los valores registrados, envía su señal a la unidad central de control electrónico del motor y actúa instantáneamente sobre la inyección y el aire de la admisión, manteniendo y corrigiendo los valores que permiten mantener la mezcla estequiométrica en cualquier condición de carga del motor.

El esquema de trabajo del motor y de sus elementos periféricos permite ver cómo trabaja. El aire es controlado por un caudalímetro regulable desde la central electrónica, ésta, a su vez, controla y procesa las señales recibidas desde la sonda y actúa de forma programada sobre la inyección en función de la cantidad de oxígeno, de la temperatura del aire que entra al motor, la que hay después del turbo-compresor, las revoluciones del motor, la posición del acelerador en cada momento y las señales que esté captando la sonda. En definitiva, se logra controlar según la programación prevista la combustión en tiempo real y mantenerla en mezcla estequiométrica.

Además de estas funciones principales, el control electrónico centralizado fija automáticamente el meca-



EMISIONES DE GASES DE ESCAPE.

valores en: grs/ kWh					
	Fecha de aplicación	CO	HC	NOx	Partículas
Motor gas natural carburación sin catalizar		13,00	2,00	15,00	0,01
Motor gas natural carburación catalizado	1.996	0,61	0,24	1,16	0,01
Motor gas natural inyección catalizado	1.999	0,50	0,05	0,40	0,01
Motor gas l.petr. inyección catalizado	1.999	0,56	0,02	0,38	0,01
Euro II	1.995	4,00	1,10	7,00	0,15
Euro III	2.001-2.002	2,10	0,66	5,00	0,10
Euro IV	2.005-2.006	1,50	0,46	3,50	0,02
Euro V	2.008	1,50	0,46	2,00	0,02

nismo de aceleración y lo bloquea durante el proceso de compactación, manteniendo la posición de aceleración exacta que la carrocería demanda para cada momento, en función de la carga de potencia de las bombas e impidiendo al conductor la aceleración del motor en el momento de la compactación o elevación de recipientes, situación hoy día imprescindible porque logra racionalizar el combustible que solicita el motor en cada circunstancia de forma inmediata y automática. Además, alarga la vida del motor y la de sus elementos periféricos y mantiene los niveles de emisión en los mínimos previstos.

La seguridad activa del vehículo es conseguida también mediante las señales captadas por la carrocería y que comportan actuar sobre el motor acelerándolo, frenándolo, bloqueándolo o no permitiendo aumentos de velocidad no programados.

Niveles de emisiones.

Para exponer correctamente los niveles de emisiones alcanzados con la tecnología de combustión del GN que hemos expuesto, los expresamos, de acuerdo con la normativa vigente, en gramos por kWh y compararemos los niveles de emisiones alcanzados respecto a los valores máximos exigidos por la legislación, no sólo en el momento de escribir este artículo sino los previstos para los próximos años.

Es de gran interés hacer una comparación objetiva de los niveles de emisión de los motores de GN con y sin catalizador y respectivamente de inyección y de carburación. Es preceptivo comparar también dichos niveles a los alcanzados por el motor diesel para lo cual se indican los que exige la legislación vigente (Euro 2) y los previstos en la futura norma Euro 5, prevista para dentro de ocho años.

Para alcanzar un nivel objetivo de comparación, hemos decidido incorporar también los niveles de emisiones de los motores de gas licuado de petróleo (GLP), combustible también catalizable y disponible también con motores de inyección de gas que, como veremos mas adelante, permite

alcanzar niveles bajos de emisiones aunque su empleo tenga la servidumbre de derivar del petróleo.

Los niveles de emisiones, homologados y convenientemente certificados en el motor objeto de este trabajo, son los siguientes:

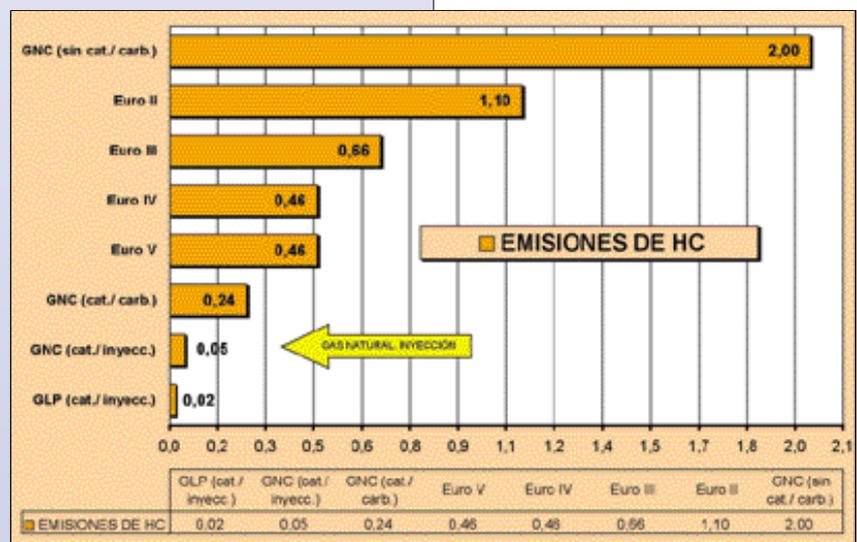
Debemos destacar aspectos tan relevantes como los niveles de emisión tan elevados que alcanza el motor de GN sin catalizar para los contaminantes: CO, HC, y NO_x. Sin embargo, reiteramos, que son muy bajos los de partículas y no existen los derivados del azufre.

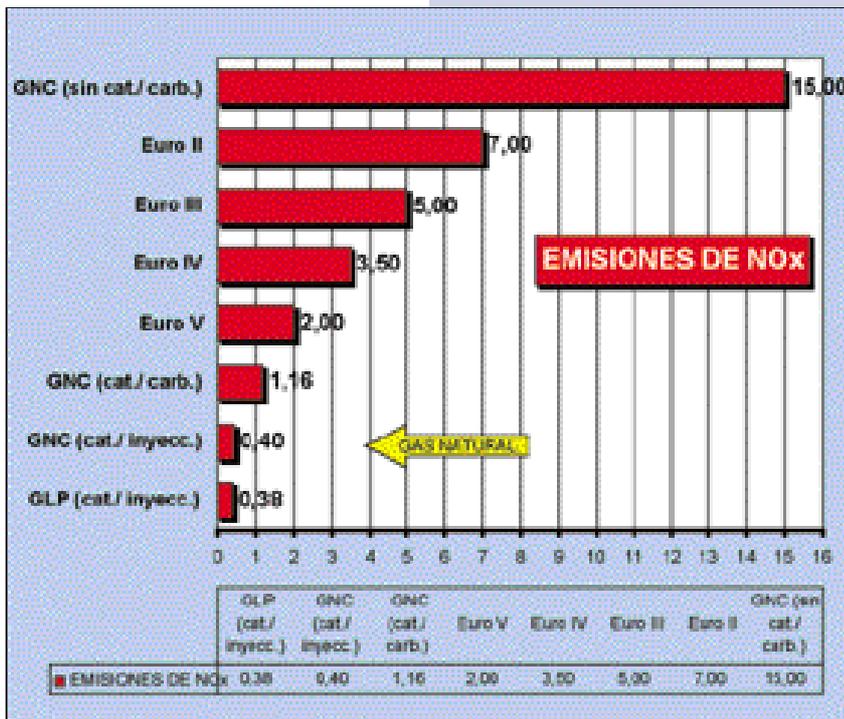
Son, por otra parte, muy destacables y excepcionalmente favorables los niveles que se logran con el control electrónico del motor e inyección de gas que son incluso menores que los previsibles para la norma Euro 5, de aplicación en 2008.

Debe observarse que los niveles de emisión del motor de gas licuado de petróleo, también de inyección, son similares a los del GN, aunque algo superiores. Este resultado es debido a la similitud tecnológica del proceso.

En primer lugar exponemos gráficamente los niveles de **hidrocarburos inquemados (HC)**:

Por el examen del esquema anterior puede comprobarse la importante reducción de **hidrocarburos inquemados** que se alcanza. Comparando





la emisión del motor objeto de este artículo (GNC inyección) con las exigencias de la norma Euro 2, vemos que se reduce en un 95,45%. Igualmente en comparación con la previsión Euro 5, la reducción alcanzada es de 89,13%, esto da idea de que con este sistema de evaluación (la misma forma de medición para el motor diesel que el de GNC) las emisiones logradas son menores que las exigibles dentro de, al menos, ocho años.

En el siguiente esquema se indican y comparan los niveles de emisiones de CO:

La reducción de emisión de CO respecto a la norma Euro 2 es del 87,5% y respecto a la previsible euro 5, es del 66,7%.

Las emisiones de NO_x, que seguidamente exponemos, son las más importantes y suponen el mayor avance respecto al motor diesel en relación al estado de la tecnología de este motor y de las expectativas que pueda alcanzar en los próximos años, en relación con la reducción de emisiones. Del examen del siguiente esquema se deduce que la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno conseguida es la que consideramos de mayor im-

portancia e interés y, dada la similitud tecnológica, el motor de GLP e inyección obtiene resultados similares. En cualquier caso, queremos destacar la atención del lector en que la reducción de óxidos de nitrógeno respecto a las exigencias a la norma Euro 2 es del 94,2% y del 80% respecto a la futura norma Euro 5.

Por último, debemos destacar las emisiones de partículas (humo). En este aspecto cualquier motor con gas como combustible, catalizado o no, reducirá las emisiones respecto al mo-

tor diesel por la propia naturaleza del combustible. Recordemos las diferencias que hemos indicado anteriormente entre motores de encendido provocado (MEP) y motores de encendido por compresión (MEC).

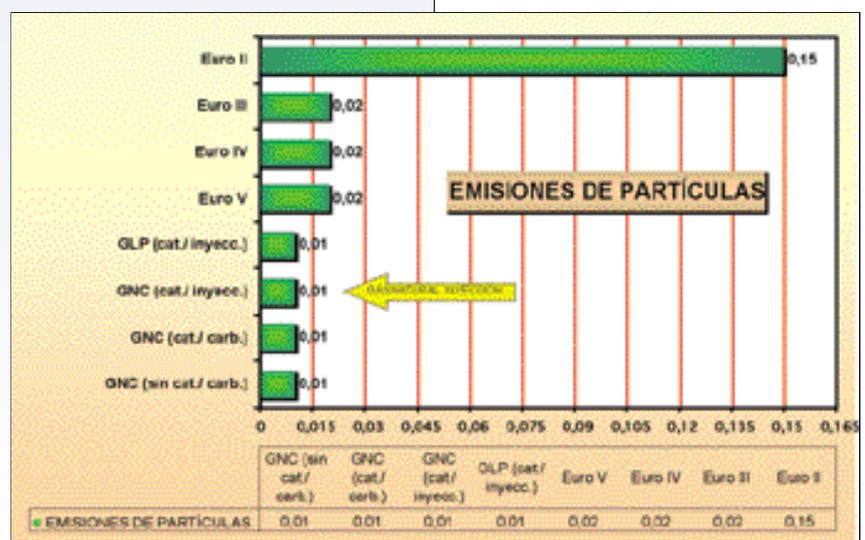
Los niveles de reducción son igualmente importantes y representan una reducción del 90% respecto a la norma Euro 2 y del 50% respecto a la Euro 5.

Para concluir este apartado, vamos a exponer la importante diferencia de emisiones entre el motor de GN con sistema de carburación y de inyección y que complementa los comentarios hechos al respecto:

Los niveles de emisiones de los nuevos motores de inyección de GN expuestos justifican claramente la consideración de esta tecnología como forma inmediata de reducir drásticamente y a corto plazo, las emisiones de los vehículos de recolección en el ámbito urbano. Sin embargo, hay otra ventaja importante, respecto a la reducción de emisiones y es la de ruido cuya reducción es también muy importante.

Niveles de emisión de ruido

El objetivo más apreciable en cuanto a reducción de emisiones es la importante y contundente reducción de emisión de ruido del motor de GN, tanto con catalizador como sin

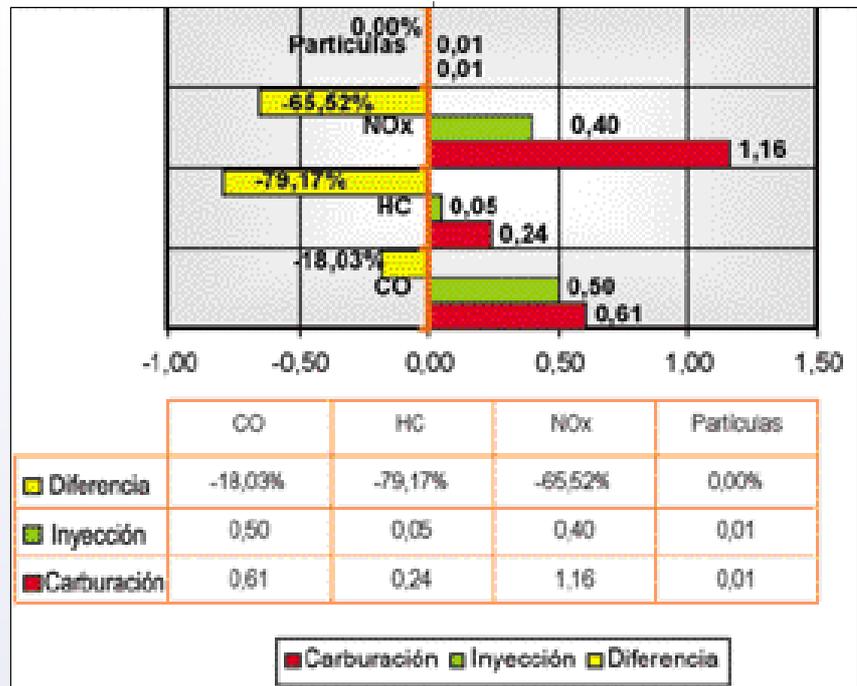


él, en comparación con el motor diesel. En éste último, la acción de los inyectores que trabajan a alta presión trae como consecuencia una intensimetría muy contundente y de difícil reducción a pesar del apantallado de estos motores. En los motores de GN hay inyección de gas a baja presión y bujías lo cual cambia drásticamente la intensidad y el tono de la emisión.

Para evaluar los niveles de emisión producidos, vamos a exponer el resultado de medir con sonómetro calibrado y para un ruido ambiente de 45 dbA los valores obtenidos en la periferia de los vehículos a una distancia de 7 metros, con el sistema de compactación a régimen nominal de trabajo, es decir unas 800 rpm. en el motor de GN y unas 1300 rpm. en el diesel. Es decir, la velocidad del motor a la que se dispone de par motor suficiente para accionar las bombas de la carrocería y servicios del equipo.

Los valores medios de emisión son de: 80,3 dbA para el vehículo diesel convencional, de 71,5 dbA para el diesel insonorizado y de 64,42 dbA para el de gas. Las importantes diferencias de emisión sonora significan una gran reducción de la potencia sonora que, recordemos, es en escala logarítmica (dbA).

En el frente de motor se alcanza una diferencia máxima de 16 dbA, valor significativo por ser el punto de



medición en que se refleja la onda de sonido propia del motor. El máximo valor se alcanza en el lado derecho (rueda anterior) por ser la salida del tubo de escape vertical. A pesar de estar la salida de gases en ambos vehículos en el mismo lugar, hay 16 dbA de diferencia porque la atenuación del silencioso especial y sobredimensionado que se emplea, logra un resultado importante con el motor de GN.

Por último, es de gran importancia señalar la trascendencia de una

correcta definición del motor en cuanto al par motor necesario para mover las bombas de accionamiento de la carrocería a la menor velocidad posible y siempre en conexión directa motor-bombas, a fin de lograr el máximo rendimiento de la transmisión y evitar ruidos de engranajes y otros elementos necesarios, en caso de no instalar las bombas en conexión directa al motor. Para comprender el alcance de esta importantísima condición, exponemos la curva de evolución de nivel sonoro de un motor diesel, insonorizado, en función de las revoluciones del motor:

Observando este gráfico y suponiendo una velocidad de 1400 rpm, el nivel de sonido es de unos 76 dbA, y si el motor gira a 800 rpm, el nivel emitido es de sólo 68 dbA. La diferencia de 18 dbA, es llegar a reducir la potencia de sonido casi a la mitad. Evidentemente, si las bombas de accionamiento de la carrocería son las mismas, el par motor aumentará en razón de la disminución de velocidad y el motor debe tener el par suficiente para accionar las bombas a esa velocidad reducida. ■

(Conclusión en el próximo número)

