

# Comparación de tecnologías para la reducción de emisiones contaminantes en autobuses urbanos

Technologies comparison  
for exhaust emissions  
reduction in urban buses

- Felipe Jiménez-Alonso

Doctor Ingeniero Industrial

Director de la Unidad de Sistemas Inteligentes en Vehículos del INSIA

- José María López-Martínez

Doctor Ingeniero Industrial

Director de la Unidad de Impacto Medioambiental del INSIA

- Francisco Aparicio-Izquierdo

Doctor Ingeniero Industrial

Director del INSIA. Catedrático de Universidad

- Nuria Flores-Holgado

Ingeniero Industrial

Investigadora de la Unidad de Impacto Medioambiental del INSIA

Recibido: 22/05/08 • Aceptado: 20/10/08

## ABSTRACT

• Exhaust emissions restrictions are continuously increasing. Engine manufacturers are working in the development of new systems that could control those emissions. In this paper, two alternatives (exhaust gas recirculation + particulate filter and selective catalytic reduction + urea) are compared on urban buses using onboard measurements along a route that includes low and high driving speed stretches. Furthermore, the use of diesel and biodiesel as fuels has been compared too.

• **Key words:** exhaust emissions, SCR, EGR, biofuel

## RESUMEN

Las exigencias para reducir la contaminación provocada por los vehículos de carretera son cada vez mayores. Los fabricantes de motores están trabajando en la introducción de nuevos sistemas que controlen dichas emisiones. En este artículo se comparan, mediante ensayos con equipos de medida embarcados, dos alternativas (recirculación de gases de escape + filtro de partículas y catalizador selectivo + urea) en el caso de autobuses urbanos circulando por una ruta tipo que comprende zonas urbanas e interurbanas. Además, se compara el empleo de diesel y biodiesel como combustibles.

**Palabras clave:** emisiones, SCR, EGR, biocombustible.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La preocupación por el medio ambiente es creciente en las sociedades desarrolladas. El control de la explotación de los recursos naturales y la disminución de la contaminación provocada por la actividad del hombre son grandes prioridades para garantizar un desarrollo sostenible. En concreto, el sector del transporte por carretera es uno de los más ampliamente tratados por su repercusión local y global, lo que ha dado lugar a la búsqueda de soluciones como los vehículos eléctricos o híbridos, las pilas de combustible o el uso de gas natural. Sin embargo, aunque los avances técnicos son

continuos y la introducción de algunas de las soluciones anteriores se prevé de forma paulatina, las mejoras sobre los sistemas actuales son imprescindibles.

En los núcleos urbanos, la principal causa de contaminación es el tráfico rodado, y las administraciones competentes son conscientes de ello, por lo que, cada vez es más frecuente la imposición de exigencias medioambientales a los vehículos de flotas que prestan servicios en las grandes ciudades, como son los autobuses urbanos o los vehículos de recogida de residuos y limpieza de calles (R.S.U.).

En la actualidad las emisiones de los motores de los vehículos industriales de carretera están reguladas por la Directiva 88/77 CE, cuya última modificación es la Directiva 2006/51/CE. Estas normativas anticontaminación son progresivamente más estrictas, lo que provoca que sea necesario el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan alcanzar los límites impuestos, y se tienda hacia soluciones integradas que incluyan al motor, su control, el sistema de inyección y el post-tratamiento de gases.

Por otra parte, la Directiva 2003/30/CE requiere que el uso de biocombustibles alcance en 2010 el 5.75% del total de combustible empleado en los vehículos de la Unión Europea. Actualmente, la solución más viable es el uso de FAME (*Fatty Acid Methyl Esters*) conocido convencionalmente como biodiesel. Con respecto al diesel, el biodiesel es más

respetuoso con el medio ambiente al ser biodegradable, y su combustión reduce ciertas emisiones nocivas.

## 2.- TECNOLOGÍAS ANALIZADAS

Cuando se persigue el desarrollo de sistemas para la reducción de las emisiones contaminantes dentro del marco de la normativa Euro 4 vigente en la actualidad, surge el problema principal de no poder reducir de forma simultánea los óxidos de nitrógeno y las partículas. Para lograr ese doble objetivo se plantean dos alternativas: recirculación de gases de escape (conocido por las siglas anglosajonas EGR) con filtro de partículas (DPF), y catalizador selectivo (SCR) con urea.

### 2.1 RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE Y FILTRO DE PARTÍCULAS (EGR + DPF)

El principio del sistema EGR consiste en la reducción de los NOx (figura 1) bajando la temperatura de combustión mediante la reintroducción de una pequeña parte de los gases de escape, previamente enfriados, en la cámara de combustión. La contrapartida a este efecto es el incremento de las emisiones de partículas, que son reducidas posteriormente mediante un filtro. Los beneficios de esta estrategia han sido corroborados en diversos estudios y, en Europa, se viene usando desde hace 7 años.

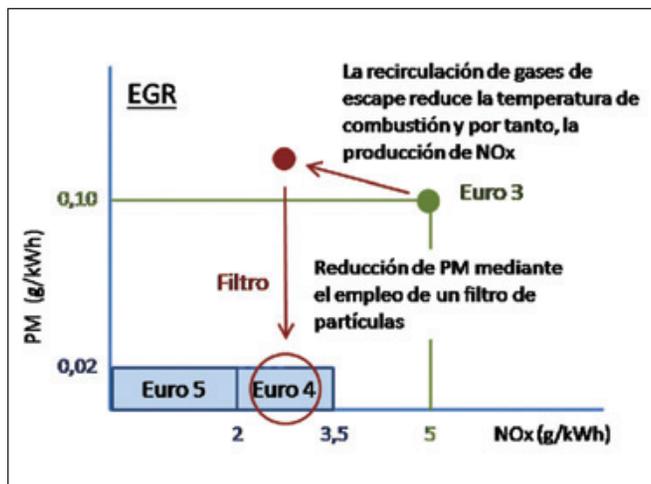


Figura 1: Estrategia de control de misiones del sistema EGR + DPF

El gas de escape se extrae del colector de escape mediante un conducto hacia el colector de admisión, justo después de la mariposa de admisión. La cantidad de EGR puede alcanzar hasta el 30%, dependiendo del tipo de motor y de la condición operativa. El gas del escape recirculado se combina con los residuales del ciclo anterior para disminuir la temperatura máxima de combustión. El gasto de EGR se regula a través de la unidad de control electrónico del motor, estando definido como:

$$EGR = \frac{m_{EGR}}{m_{adm}} \times 100$$

La fracción total de residuales en el cilindro durante la carrera de compresión:

$$x_{escape} = (EGR/100)(1 - x_r) + x_r$$

donde  $x_r$  es el gas residual del ciclo anterior.

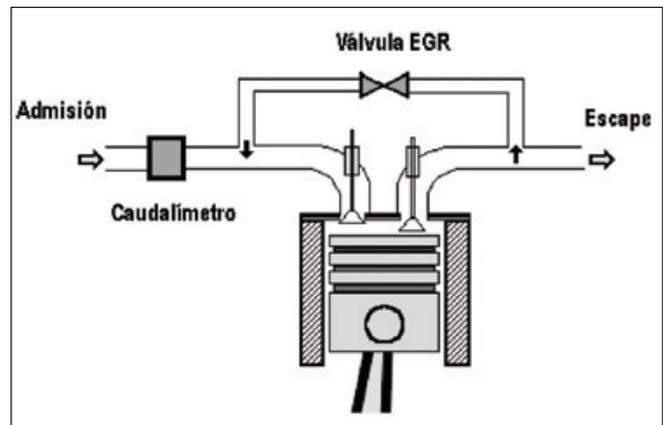


Figura 2: Esquema de un sistema de EGR para un MEC

El EGR no solamente reduce la temperatura máxima de combustión, sino que también ralentiza el proceso de combustión, disminuyendo el rendimiento del motor. Según se incrementa el EGR, el porcentaje de ciclos de combustión lenta ineficiente se incrementa también. Además, el incremento del EGR conduce a ciclos de combustión parcial, y en el límite, puede conducir al apagado de llama. Así, la utilización del EGR para reducir los NOx, puede pagar un alto precio tanto por el incremento de los HC, como por la disminución del rendimiento térmico del motor.

La cantidad de EGR es controlada por la unidad de gestión del motor. Las menores concentraciones de NOx, junto con un bajo consumo, tienen lugar cuando la mezcla es la estequiométrica, con una cantidad de EGR la máxima posible sin afectar adversamente al proceso de combustión

### 2.2 CATALIZADOR SELECTIVO + UREA (SCR + UREA)

Optimizando las condiciones de combustión del motor, se logran considerables reducciones en la formación de

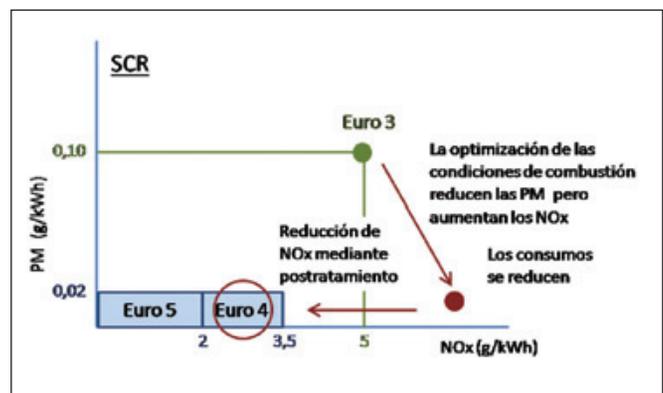
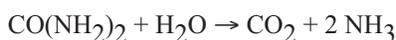


Figura 3: Estrategia de control de misiones del sistema SCR + urea

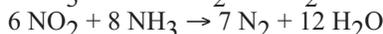
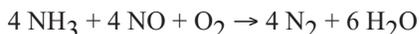
## Planteamiento de ensayos de vehículo en ruta

partículas y en el consumo (figura 3). Sin embargo, los NOx aumentan, con lo que deben ser eliminados en un post-tratamiento de gases de escape empleando un catalizador selectivo, para lo cual se requiere un suministro continuo de una solución acuosa de urea al 32,5% + 0,5% como agente reductor. En el catalizador SCR, los NOx se eliminan, en presencia de amoníaco (NH<sub>3</sub>), dando agua y nitrógeno (N<sub>2</sub>), donde el NH<sub>3</sub> se obtiene a partir de la urea por hidrólisis a altas temperaturas. Esta solución, que se ha empleado desde hace muchos años en aplicaciones estacionarias, empezó a aplicarse a vehículos pesados en la Unión Europea en 1992 por un consorcio formado por Daimler Chrysler, MAN, Iveco y Siemens AG.

Como se ha comentado, se coloca en el escape del motor el catalizador SCR con un sistema de inyección de urea (ver figura 4). La urea se mezcla con el agua para dar amoníaco:



El amoníaco en presencia de un catalizador actúa sobre los NO<sub>x</sub>, mediante las siguientes reacciones:



Pruebas de larga duración han demostrado una disminución en las emisiones de NO<sub>x</sub> entre un 63-68%.

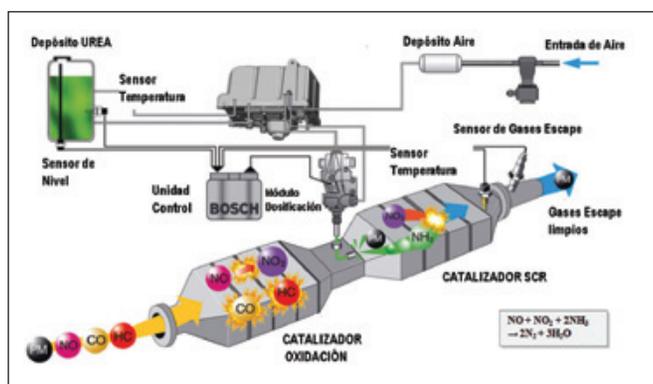


Figura 4: Esquema de funcionamiento de un catalizador de SCR con un sistema de inyección de urea. Dicho catalizador viene precedido de un catalizador de oxidación (Fuente: Bosch)

### 3.- COMPARACIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES

Para la selección de los vehículos de una flota importante, como, por ejemplo, la de autobuses urbanos de una gran ciudad, resulta de capital importancia tener cuantificada la efectividad de las diferentes tecnologías disponibles. La comparación de dicha efectividad de las tecnologías de post-tratamiento anteriores puede realizarse sobre bancos



dinamométricos, para lo que existen ciclos estándar definidos, o mediante ensayos en circulación normal, lo que reproduce las condiciones usuales de funcionamiento del vehículo. Evidentemente, esta segunda opción resulta más realista siempre que sea viable y, por ello, la comparación aquí planteada se presenta en ruta real, midiendo las emisiones y el consumo mediante un equipo embarcado.

#### 3.1 PLANTEAMIENTO DE ENSAYOS DE VEHÍCULO EN RUTA

Los ensayos se realizaron sobre una ruta de 15,5 km diseñada por la Empresa Municipal de Transportes de Madrid para la prueba de sus autobuses nuevos. Dicha ruta comprende zonas de circulación a baja velocidad, con semáforos, rotondas y pasos de peatones, y otras zonas de alta velocidad por autovía. Se emplearon dos autobuses diesel de inyección directa que cumplen con los requerimientos de la normativa Euro 4, cada uno con un sistema de post-tratamiento. Adicionalmente, se utilizaron 3 combustibles: diesel, biodiesel al 20% (B20) y biodiesel al 100% (B100). Cada ensayo fue repetido 5 veces observando que los perfiles de velocidades se encontraban en el rango especificado.

Para realizar las mediciones bajo condiciones normales de uso, se empleó el equipo Horiba OBS 2200, que adquiere de forma continua las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, THC y NOx, así como el consumo de combustible y la



Figura 5: Instalación del equipo de medida

velocidad de circulación en cada momento. Adicionalmente, permite la entrada sincronizada de señales analógicas de otros equipos, como el medidor de partículas de Maha. La figura 5 muestra el montaje de los equipos en uno de los vehículos.

### 3.2 RESULTADOS OBTENIDOS

En las figuras 6 y 7 se comparan las emisiones instantáneas de NOx y partículas con los dos sistemas de post-tratamiento a lo largo de la ruta, con diesel como combustible. En la primera se observa que el sistema SCR+urea se comporta mejor, salvo en situaciones de circulación extraurbana. Un comportamiento opuesto se encuentra para la evolución de las partículas, las cuales son mejor controladas por el sistema EGR+DPF, que elimina los fuertes transitorios que aparecen en los procesos de aceleración con la tecnología SCR + urea.

Una comparación más exhaustiva se presenta en la tabla 1, que recoge los valores agregados a lo largo de toda la ruta para cada situación de ensayo.

Como se puede observar, las emisiones de CO se mantienen bajas, dado que los fabricantes de motores consiguen cumplir los límites con cierta facilidad. Estas emisiones se forman en las fases intermedias de la combustión y se reducen con un aumento de la concentración

de metil ester en la mezcla. Sin embargo, esta mayor proporción conlleva aumentos de los óxidos de nitrógeno. Por el contrario, a causa de las diferencias en cuanto a densidad y poder calorífico de los combustibles, el biodiesel presenta un mayor consumo, lo que conlleva un aumento de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>. Al comparar los valores promedio obtenidos para cada tecnología, el sistema EGR+DPF proporciona un mejor comportamiento en cuanto a emisiones de CO y partículas, mientras que la tecnología SCR + urea ofrece resultados más positivos en CO<sub>2</sub> y NOx.

Para realizar las mediciones bajo condiciones normales de uso, se empleó el equipo Horiba OBS 2200, que adquiere de forma continua las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, THC y NOx, así como el consumo de combustible y la velocidad de circulación en cada momento

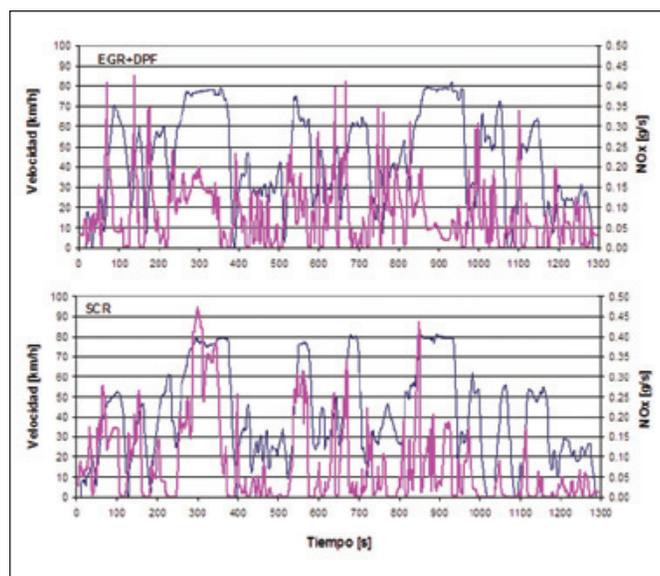


Figura 6: Comparación de las emisiones instantáneas de NOx entre los sistemas EGR+DPF y SCR+urea

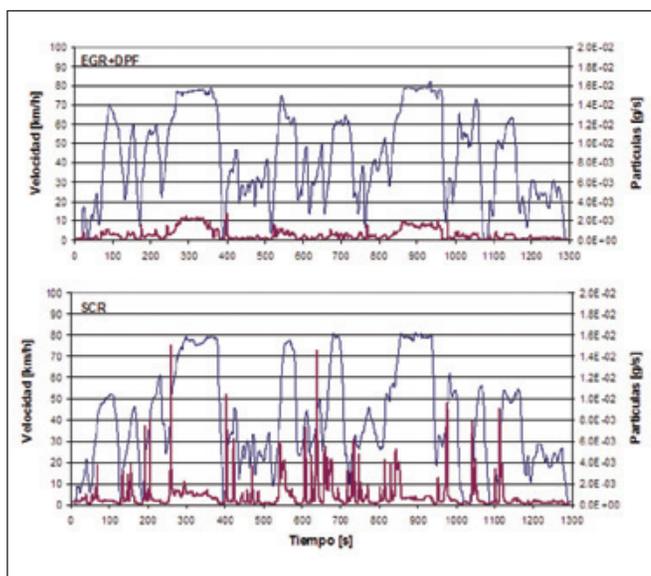


Figura 7: Comparación de las emisiones instantáneas de partículas entre los sistemas EGR+DPF y SCR+urea

	EGR + DPF			SCR + UREA		
	B20	B100	Diesel	B20	B100	Diesel
Diesel	B20	B100	Diesel	B20	B100	Diesel
CO (g/km)	0.250	0.154	0.069	1.716	1.477	1.041
CO2 (g/km)	913.822	926.301	954.932	864.98	886.841	889.117
THC (g/km)	0.068	0.042	0.044	0.053	0.054	0.043
NOx (g/km)	6.925	8.261	8.580	6.121	6.517	8.460
Partículas (g/km)	0.049	0.025	0.026	0.073	0.053	0.029
Combustible (l/100 km)	34.042	35.401	38.522	32.308	33.896	35.868

Tabla 1: Emisiones contaminantes agregadas en la ruta.

Los ensayos realizados en autobuses urbanos sobre ruta real corroboran que el biodiesel reduce las partículas emitidas, pero los óxidos de nitrógeno y el consumo se ven incrementados. A pesar de algunas de estas desventajas, los biocombustibles pueden contemplarse como una alternativa viable al ser no fósiles y presentar una combustión libre de óxidos de azufre.

#### 4.- CONCLUSIONES

Los ensayos realizados en autobuses urbanos sobre ruta real corroboran que el biodiesel reduce las partículas emitidas, pero los óxidos de nitrógeno y el consumo se ven incrementados. A pesar de algunas de estas desventajas, los biocombustibles pueden contemplarse como una alternativa viable al ser no fósiles y presentar una combustión libre de óxidos de azufre.

Por otra parte, la tecnología SCR + urea ofrece mejores resultados que la EGR + DPF en todos los indicadores excepto en las emisiones de CO y partículas, lo que prueba la dificultad de reducir todas las emisiones de forma simultánea. A pesar de las ventajas de la tecnología SCR como la economía de combustible y su insensibilidad a combustibles con alto contenido en azufre, debe hacer frente a problemas como la necesidad de disponer de una red de suministro de urea. Por último, se hace notar que, si bien la normativa Euro 4 ha marcado el inicio del control de las emisiones de NOx con EGR + DPF o SCR + urea, cabe preguntarse si estos sistemas de post-tratamiento son suficientes para cumplir la normativa Euro 5 (efectiva a partir de 2009) y, en este sentido, parece claro que la normativa Euro 6 (efectiva a partir de 2012) implicará el uso de EGR enfriado, acompañado de SCR y filtro de partículas.

#### 5.- AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido financiado por el Ministerio de Medio Ambiente de España, la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT) y el Ayuntamiento de Madrid.

#### 6.- BIBLIOGRAFÍA

- Canakci M, Erdil A, Arcaklioglu E. "Performance and Exhaust Emissions of a Biodiesel Engine". *Applied Energy*, 2006. Vol 83, num 6, pag 594-605.
- Chatferjes S, Conway R, Viswanathan S, Blomquist M, Anderson S. "NOx and PM control from Heavy Duty Diesel Engines using a combination of Low Pressure EGR and Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter". *SAE Series*. Paper Num. 2003-01-0048.
- Frey H, Christopher Roupail, Nagui M, Zhai Haibo, Farias Tiago L., Gonçalves, Gonzalo A.

"Comparing real-world fuel consumption for diesel-and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions". *Transportation Research Part D*, 2007. Vol 12, núm 4, pp 281-291.

- EUROPEAN COMMISSION (2001). *White Paper: European Transport policy for 2010: time to decide*. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities. 2001, 126 p. ISBN 92-894-0341-1.

- Fritz Nicole, Mueller Raimund, Zwerbig Juergen. Mathes Weiland. "On-Road Demonstration of NOx Emission Control for Diesel Trucks with SINOx™ Urea SCR System". *SAE Series*. Paper Num. 1999-01-0111.

- Martínez-Val Piera JM. "El Paso de la Combustión Convencional a la economía del Hidrógeno". *DYNA Ingeniería e Industria* Abril 2005. Vol. 80-3, p.13-22.

- Nylund Nils-Olof, Erkkilä Kimmo, Lappi Maija, Ikonen Markku. *Transit Bus Emission Study: Comparison of Emissions from Diesel and Natural Gas Buses*. Finlandia: VTT, 2004, 63 p.

- Pelkmans Luc, Debal Patrick. "Comparison of on-Road Emission with Emissions Measured on Chassis Dynamometer Test Cycles". *Transportation Research Part D* 2006. Vol 11, núm 4, pag 233-241.

- Roby F. "La motorización híbrida: el automóvil que recupera energía". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2006. Vol. 81-6, p. 17-19.

- Unión Europea. Directiva 2006/51/CE de 6 de junio de 2006 por la que se modifican, para adaptarlos al progreso técnico, el anexo I de la Directiva 2005/55/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y los anexos IV y V de la Directiva 2005/78/CE por lo que se refiere a los requisitos del sistema de supervisión del control de emisiones utilizable en los vehículos y a las exenciones aplicables a los motores de gas. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 7 de junio de 2006.

- Unión Europea Directiva 2003/30/CE de 8 de mayo de 2003 relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 17 de mayo de 2003.