

# Análisis comparativo de ciclo de vida de autobuses urbanos Euro 4 con sistema de postratamiento de gases de escape

**José María López Martínez**

Subdirector1, Instituto Universitario de investigación del Automóvil, España

**Juan Antonio García Sánchez**

Doctorando, Instituto de Investigación del Automóvil, México

**Francisco Javier Sánchez Alejo**

DDF 2 , Instituto de Investigación del Automóvil, España

**Nuria Flores Holgado**

IDIM3, Instituto de investigación del Automóvil, España

## RESUMEN

La normativa EURO 4 marca un límite de emisiones contaminantes respecto a la emisión de NO<sub>x</sub>, partículas que han obligado al fabricante y, en concreto, a la ingeniería del motor a realizar estudios del funcionamiento del motor y del sistema de tratamiento de gases de escape radicalmente diferentes. En concreto, los estudios realizados han sido dos; por un lado, en motores que reducen la temperatura en cámara mediante recirculación de gases de escape (EGR) para reducción de NO<sub>x</sub> e incorporan filtro de partículas en el escape, y por el otro lado en motores que trabajan a altas temperaturas para reducción de partículas e incorporan un sistema catalítico selectivo (SCR) para reducir el NO<sub>x</sub> utilizando urea.

En este trabajo se presenta un estudio comparativo de ambos sistemas para determinar el mejor comportamiento frente al requerimiento de energía, emisiones de gases efecto invernadero, contaminantes en un ciclo de vida global. Para ello, se tomarán los datos adquiridos del ciclo de conducción real de consumo y emisiones contaminantes, mediante un equipo de medidas embarcado a bordo del autobús. Completado el análisis del pozo a la rueda, se incluirá el análisis energético del cambio del gasóleo, de la urea.

Finalmente, utilizando el programa GaBi 4, de análisis del ciclo de vida, se evaluará el impacto medioambiental al proceso de fabricación y reciclado, de ambos sistemas de postratamiento de gases de escape.

**Palabras clave:** emisiones contaminantes, análisis de ciclo de vida, autobús urbano, EGR, filtro de partículas, SCR, Urea.

---

1 Director de la División de Impacto medioambiental (INSIA)

2 Director de la División de Formación (INSIA)

3 Investigadora de la División de Impacto Medioambiental (INSIA)

## **1. INTRODUCCION**

El impacto del transporte por carretera sobre el medio ambiente es un asunto complejo debido a que contribuye al cambio climático, al deterioro de la calidad del aire, suelo, agua, a la alteración del paisaje y los ecosistemas. Por lo que es importante evaluar el impacto medioambiental del transporte por carretera en base a un análisis de ciclo de vida.

El análisis de ciclo de vida es un estudio en el que se estima la energía consumida y emisiones de efecto invernadero generadas durante los procesos más relevantes de la vida útil de un producto y en este caso para el caso de un vehículo se divide en análisis de ciclo de vida del vehículo, análisis del pozo al tanque (Well to tank; WTT) y análisis del tanque a la rueda (Tank to well ; TTW).

En esta última etapa conocida como del tanque a la rueda se han desarrollado diversas tecnologías para el control de emisiones contaminantes en los motores debido a que los límites de emisiones globales de los motores diesel de vehículos industriales como en este caso un autobús urbano son cada vez más estrictos lo que provoca que se tienda hacia soluciones integradas que incluyan al motor, su control, el sistema de inyección y el post-tratamiento de gases de escape.

Las emisiones contaminantes más problemáticas en la combustión interna son la formación de partículas (PM) y los óxidos de nitrógeno (NOx) Para reducir estos existen dos soluciones alternativas que pueden adoptarse. En primer lugar se puede usar la reducción catalítica selectiva (SCR), con urea y la segunda alternativa es la recirculación de gases de escape (EGR) con filtro de partículas. Sin embargo se debe hacer un análisis de ciclo de vida del uso de cada tipo de tecnología de pos tratamiento de gases de escape para determinar en qué medida contribuye a la disminución del impacto medioambiental a lo largo de la vida útil del autobús.

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. Por otra parte la Directiva 2003/30/CE requiere que la cuota de biocarburantes medido sobre una base de contenido de energía debe alcanzar el 2% en 2005 y 5.75% para el año 2010 de combustible total consumido por los motores de transporte en la EU-25, por lo que es también interesante analizar la influencia del uso de tres tipos de combustibles: gasóleo profesional, B20 (20% de biodiesel) y B100 (100% biodiesel) en combinación con los sistema de post tratamiento de gases de escape antes mencionados.

## **2. METODOLOGIA DE CÁLCULO**

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una de las metodologías más aceptadas para evaluar la huella de carbono, pues analiza la categoría de impacto de “Cambio climático”, es decir el impacto que producen los gases de efecto invernadero.

La metodología propuesta está basada en un conocimiento global de las energías involucradas en el proceso entero. La metodología de Análisis de ciclo de vida en este estudio se divide en los siguientes segmentos:

(a) El análisis del pozo al tanque (well to tank WTT) toma en cuenta la energía usada y las

emisiones de gases de efecto invernadero resultantes asociadas a la producción de los combustibles hasta el suministro de estos a los vehículos en las estaciones de servicio.

(b) El análisis del tanque a la rueda (tank to Well TTW) evalúa la energía y emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el uso del combustible en el autobús. Dentro de esta etapa se agrega también la influencia que tiene en el impacto medioambiental el uso de dos tecnologías de pos tratamiento de gases de escape las cuales son reducción catalítica selectiva (SCR), con urea y recirculación de gases de escape (EGR) con filtro de partículas.

(c) El análisis del ciclo de vida del autobús toma en cuenta la energía usada para la producción de materiales (PM), ensamblaje del vehículo (EV), mantenimiento (MV) y final de vida útil (FVU) del autobús y el resultado de las emisiones de efecto invernadero asociadas a los diferentes procesos.

(d) Por último se hace el análisis global integrando los segmentos antes mencionados.

### **3. ANALISIS DEL POZO AL TANQUE (WTT)**

Para este análisis los siguientes combustibles serán analizados.

(a) Diesel; (b) B100 (biodiesel 100%); (c) B20 (biodiesel 20%, diesel 80%).

Para este estudio, los datos del análisis del pozo al tanque han sido seleccionados básicamente del estudio europeo del pozo a la rueda de General Motors y el estudio español de análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte CIEMAT 2006, siendo corregidos en los casos particulares en que ha sido necesario.

#### **3.1 Diesel**

Una mezcla representativa de crudo es transportado desde los países de origen hasta los puertos donde el crudo es cargado en barcos petroleros y después es transportado vía marítima a los puertos de España. Cerca del puerto el crudo es refinado para obtener diferentes compuestos de los cuales uno de ellos es el diesel. Para el cual se considera en su distribución una distancia media de 2 km desde las refinerías a las instalaciones de almacenamiento y una distancia media de 410 km para la distribución por camión (CIEMAT, 2006). hasta las estaciones de servicio.

#### **3.2 Bio-ester de la colza (biodiesel)**

La semilla de colza o de girasol es cultivada, colectada y transportada por camión 50 km a una planta de procesamiento de aceite ahí el aceite es extraído, refinado y esterificado con metanol. El ester del aceite de la planta es transportado 150 km para mezclarse con diesel.

### 3.3 Comparación de las vías de los combustibles

La tabla 1 muestra un resumen de las entradas de energía y las emisiones de efecto invernadero de los combustibles analizados.

	Entradas de energía MJ/MJ	Perdidas de energía MJ/MJ	Gases de efecto invernadero g/MJ
Diesel	1.1128	0.1128	9.45
Biodiesel	2.12	1.12	-18.3
B20	1.314	0.314	3.9

**Tabla 1 - Emisiones y energía requerida para los combustibles analizados**

Se puede observar de la tabla 1 que el biodiesel y la mezcla B20 (20% methyl-éster y 80% diesel) ofrece ventajas con respecto al diesel en cuanto a las emisiones de efecto invernadero esto es debido a que con la biomasa el CO<sub>2</sub> es absorbido de la atmósfera durante el proceso de crecimiento y no es entregado hasta el uso del vehículo sin embargo se observa que una mayor cantidad de energía es requerida en la vía del biodiesel con respecto al diesel.

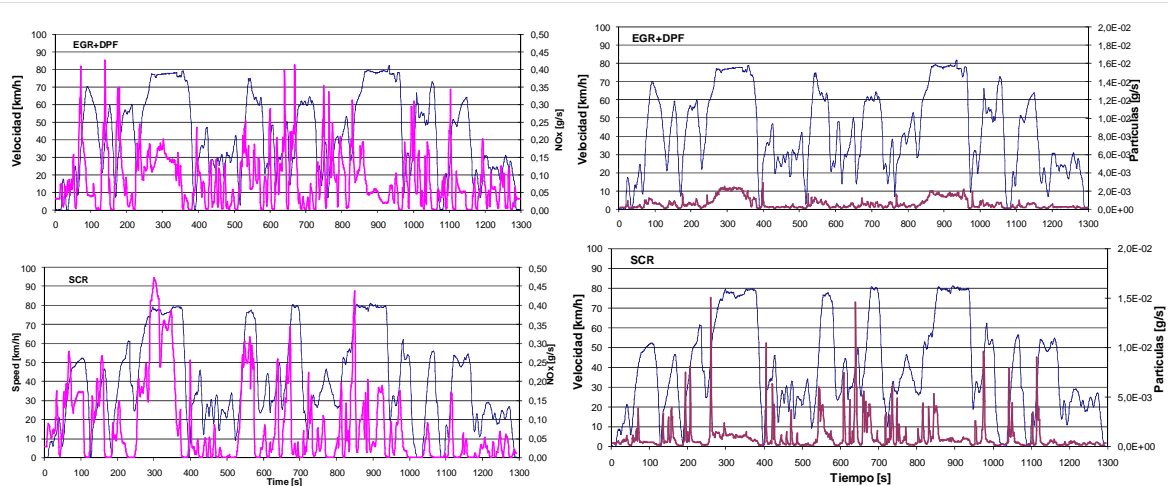
## 4. ANALISIS DEL TANQUE ALA RUEDA (TTW)

Para el análisis del tanque a la rueda se realizaron ensayos sobre una ruta de 15.5 km diseñada por la Empresa Municipal de Transportes de Madrid para la prueba de sus autobuses nuevos. 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).

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 NO<sub>x</sub>, así como el consumo de combustible y la velocidad de circulación en cada momento.

### 4.1 Resultados obtenidos

En la figuras 1 se comparan las emisiones instantáneas de NO<sub>x</sub> y partículas con los dos sistemas de post-tratamiento a lo largo de una 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 2, que recoge los valores agregados a lo largo de toda la ruta para cada situación de ensayo. 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 NO<sub>x</sub>.



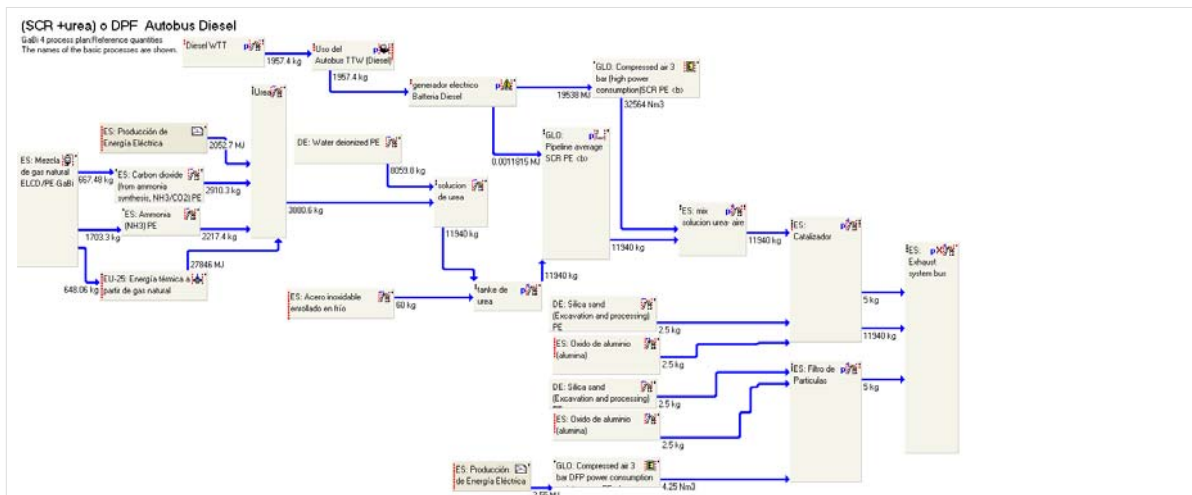
**Figura 1 - Comparación de las emisiones instantáneas de NOx y partículas entre los sistemas EGR+DPF y SCR+urea**

	EGR+DPF			SCR+UREA		
	Diesel	B20	B100	Diesel	B20	B100
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
PM (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 2 - Emisiones contaminantes agregados en la ruta**

#### 4.2 Análisis del ciclo de vida de las tecnologías utilizadas para el postratamiento de gases SCR +Urea y EGR+DPF

Para la producción de urea esta se forma a partir de amoníaco una vez obtenida se mezcla en un 32,5% con agua des ionizada lo cual da una solución conocida como AdBlue que es utilizada en el autobús y dosificada con aire comprimido para hacer reaccionar con los gases de escape y reducir las emisiones de NOx todo este proceso lleva un consumo energético y emisiones que se generan durante el proceso, también debe considerarse la energía que toma del vehículo para la continua aplicación dosificada de la urea a través de la compresión de aire. En el caso del filtro de partículas la energía y emisiones asociados a la producción de materiales y manufactura así como el mantenimiento del mismo es despreciable sin embargo se considera en este estudio, de esta manera para obtener el consumo de energía primaria y emisiones de gases de efecto invernadero totales del ciclo de vida de estas tecnologías de pos tratamiento de gases de escape se hace uso del programa GaBi 4 (figura 2) para realizar el balance general obteniéndose los factores de energía y emisiones de CO2 equivalente por kilometro recorrido que se muestran en la tabla 3 considerándose una vida útil del autobús de 850.000 km aproximadamente



**Figura 2 - Ciclo de vida de la urea y del filtro de partículas**

	Uso de (EGR+DPF)			Uso de (SCR+UREA)		
	Diesel	B20	B100	Diesel	B20	B100
CO2 equiv. (g/km)	0,00433	0,00433	0,00433	22,69	23,338	22,47
Energía primaria (MJ/km)	6,72E-05	6,72E-05	6,72E-05	0,326	0,3645	0,473

**Tabla 3 - Emisiones y energía requerida para el uso de EGR+DPF y SCR+UREA**

### 5. CICLO DE VIDA DEL AUTOBUS

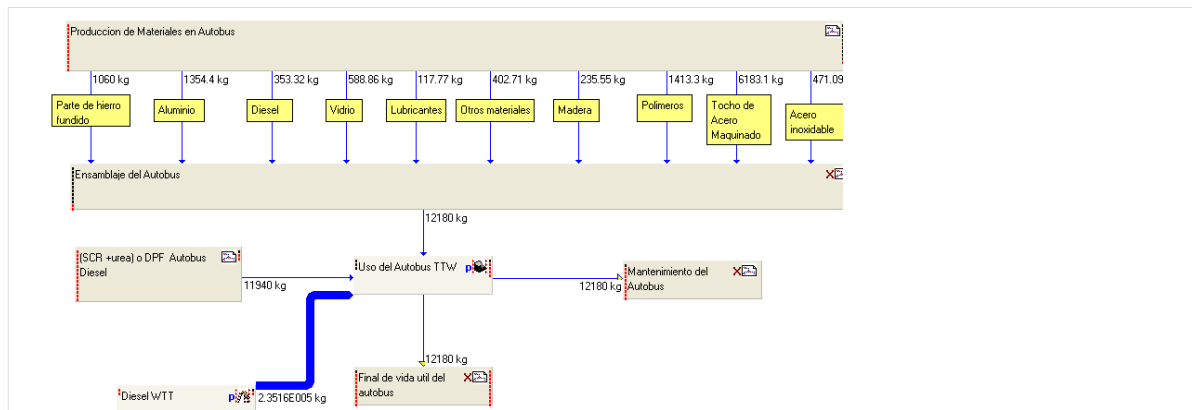
Por medio de la herramienta GaBi 4 se obtienen datos de consumo de energía primaria y emisiones de la producción de diferentes materiales que componen el autobús, así como del ensamblaje mantenimiento y final de vida útil de este, con los cuales se obtienen los factores de energía y emisiones que se muestran en la tabla 4.

	Autobús con tecnología (EGR+DPF) peso 12180 kg				Autobús con tecnología (SCR+urea) peso 12205 kg			
	PM	EV	MV	FVU	PM	EV	MV	FVU
CO2equiv (g/km)	49.25	19.663	9.553	5.753	49.352	19.703	9.5617	5.765
Energía (MJ/km)	0.852	0.410	0.203	0.073	0.854	0.411	0.2033	0.074

**Tabla 4 - Emisiones y energía requerida para el ciclo de vida del autobús**

### 6. CICLO DE VIDA GLOBAL

Por último se integran todos los procesos anteriormente descritos (el análisis WTT y TTW así como el análisis del ciclo de vida de las tecnologías de pos tratamiento de gases de escape SCR + urea y EGR+DPF) como se muestra en la figura 3.



**Figura 3 - Diagrama de ciclo de vida global**

Por medio de un balance general de energía y emisiones se obtienen los factores globales de la tabla 5 que integran todos los procesos con el fin de comparar el uso de cada uno de los combustibles utilizados junto con las tecnologías de pos tratamiento de gases de escape.

	Ciclo de vida global (EGR+DPF)			Ciclo de vida global (SCR+UREA)		
	Diesel	B20	B100	Diesel	B20	B100
CO <sub>2</sub> equiv. (g/km)	1116,38	1067,917	807,858	1076,30	1041,499	774,319
Energía primaria (MJ/km)	15,471	18,362	28,334	14,982	17,819	26,730

**Tabla 5 - Emisiones y energía requerida del ciclo de vida global**

## CONCLUSIONES

El análisis de ciclo de vida global muestra que el uso del combustible B100 en combinación con la tecnología (SCR+UREA) es la mejor alternativa desde el punto de vista de emisiones de gramos de CO<sub>2</sub> equivalentes no siendo así en cuanto a consumo de energía.

En general se observa que el uso de la tecnología de pos tratamiento de gases de escape SCR+UREA es la mejor alternativa en cuanto a emisiones y consumo de energía en comparación con la tecnología EGR+DPF.

El ciclo de vida de la tecnología de pos tratamiento de gases de escape (SCR+UREA) tiene un consumo energético y emisiones gCO<sub>2</sub> equivalentes mayor que el ciclo de vida de la tecnología EGR+DPF. Sin embargo el uso de la primera disminuye en mayor proporción que la segunda las emisiones y consumo de energía del autobús durante su vida útil por lo cual al final resulta ser más efectiva.

En cuanto al ciclo de vida del autobús en donde mayor consumo de energía y emisiones de gCO<sub>2</sub> equiv. se dan es en la producción de materiales siendo mayor en el autobús con tecnología SCR+urea debido a su mayor peso.

## REFERENCIAS

CIEMAT. Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diésel Energía y Cambio Climático Ministerio de Medio Ambiente 2006.

EUCAR. Well-to wheel analysis of future automotive fuels and powertrain in the european context. European Council for Automotive R&D; 2006. [www.ies.jrc.cec.eu.int/wtw.html](http://www.ies.jrc.cec.eu.int/wtw.html)

Europe GM. GM well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems – European study”. Report From General Motors; 2002. <<http://www.lbst.de/gm-wtw>>.

GaBi Software website, [www.gabi-software.com](http://www.gabi-software.com).

JAIME, A. y TREVOR, P. (2006) Life Cycle Assessment (LCA) of the Hydrogen Fuel Cell, Natural Gas, and Diesel Bus Transportation Systems in Western Australia Research Institute for Sustainable Energy Murdoch University Perth, Western Australia.

JOSE, M.L., ALVARO, G. y FRANCISCO, A. (2008) Comparison of GHG emissions from diesel, biodiesel and natural gas refuse trucks. *Applied Energy* 86 pp. 610-615

JOSE, M. L., FELIPE, J.A., FRANCISCO, A. y NURIA, F. (2009). On-road emissions from urban buses with SCR + Urea and EGR + DPF systems using diesel and biodiesel. *Transportation Research Part D* 14 pp. 1-5

MICHAEL, B. NIGEL, y C. SCOTT, W. An Investigation into the Emissions Reduction Performance of an SCR System Over Two Years In –Use Heavy-Duty Vehicle Operation SAE 2005-01-1861, April 2005.

NICOLE, F. y JUERGEN, Z. On Road Demonstration of NOx Emission Control for Diesel Trucks with SINOx Urea Systems, SAE 1999-01-0111, March 1999.

Norma internacional ISO 14044:2006(E): Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Define los pasos básicos para la realización de análisis de ciclo de vida.

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.

WILLIAM, R. M. y JOHN, T. K. The development of Urea-SCR Technology for US Heavy Duty Trucks SAE 2000-01-0190, March 2000.