

Análisis de Ciclo de Vida de autobuses urbanos Euro IV



Juan Antonio García-Sánchez *

José María López-Martínez *

Nuria Flores-Holgado *

Blanca Arenas-Ramírez **

Ingeniero Mecánico

Dr. Ingeniero Industrial

Ingeniero Industrial

Dra. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

* UPM. Instituto Universitario de Investigación del Automóvil(INSIA)
Campus Sur de la UPM, Carretera de Valencia, km. 7 – 28031 Madrid.
Tfno: + 34 913 365300. antonio.gsanchez@alumnos.upm.es

** UPM. ETSII. C/ José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid. Tfno: + 34 913 363060.
barenas@etsii.upm.es

Recibido: 15/06/2011 • Aceptado: 05/07/2011

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4280>

Life Cycle Analysis of Euro IV urban buses

ABSTRACT

• The Euro 4 standard sets a pollutant emissions limit respect to NO_x and particulate matter emissions that have forced to automobile manufacturers and, specifically, to engine manufacturers, at make studies about the engine performance and exhaust aftertreatment technology that have resulted in systems radically different. Specifically systems presented have been two, on one side, engines that reduce the temperature inside combustion chamber, by exhaust gas recirculation (EGR) for NO_x reduction and incorporate a particulate filter in the exhaust and, on the other side, engines operating at high temperatures to reduce particulate matter, and incorporate a selective catalytic system (SCR) for NO_x reduction using urea. This paper presents a comparative study about using both systems in an urban bus, to determinate the best behavior against the energy requirement and greenhouse gas emissions (GEI) by means a Life Cycle Analysis (LCA). Furthermore, the study includes a comparative analysis of different fuels: diesel, biodiesel (B100) and a blended biodiesel at 20% (B20) (Well to Tank analysis) and the environmental impact due to the use of these fuels in the bus (Tank to Wheel analysis). For this purpose, data on fuel consumption and pollutant emissions were acquired by tests in real driving cycle, using a measurement equipment on board the bus. Also has been evaluated the environmental impact of the manufacturing and recycling process of the urban bus tested, as well as, of the exhaust after treatment systems (where the production and recycling of precious metals that are used as a catalysts, has been considered). The data on energy requirement and GEI emissions of different process that are involved in the LCA stages of an urban bus, have been obtained from industry, scientific publication and data bases as GaBi 4 and GEMIS.

Among the most relevant results of this comparative analysis has found that the LCA of the SCR+Urea technology has an energy consumption and GEI emissions higher than the LCA of the EGR+DPF technology, mainly due to AdBlue production and supply (formed from deionized water and urea), that this technology requires for its continuing treatment of the exhaust gases. However, the bus that includes this technology generates, in use, lower environmental impact.

• **Keywords:** pollutant emissions, Life Cycle Analysis, urban bus, EGR, particulate filter, SCR, urea, AdBlue.

RESUMEN

La normativa Euro 4 marca unos límites de emisiones contaminantes respecto a las emisiones de NO_x y de partículas que han obligado a los fabricantes de automóviles y, en concreto, a los del motor térmico, a realizar estudios del funcionamiento del motor y del sistema de post-tratamiento de gases de escape que han concluido en sistemas radicalmente diferentes.

En concreto, los sistemas presentados han sido dos: por un lado, motores que reducen la temperatura en cámara mediante recirculación de gases de escape (EGR) para la disminución de los NO_x e incorporan filtro de partículas en el escape y, por el otro lado, motores que trabajan a altas temperaturas para reducción de las partículas e incorporan un sistema catalítico selectivo (SCR) para reducir los NO_x, utilizando urea.

En este trabajo se presenta un estudio comparativo de ambos sistemas en un autobús urbano, con el propósito de determinar el mejor comportamiento frente al requerimiento de energía y emisiones de gases efecto invernadero (GEI), mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Además, este estudio se completa con un análisis comparativo para diferentes combustibles: gasóleo, biodiésel (B100)

y una mezcla gasóleo-biodiésel al 20% (B20) (análisis del pozo al tanque) y su impacto medioambiental en el uso del autobús (análisis del tanque a la rueda). Para ello, se han adquirido los datos del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes, mediante ensayos realizados en ciclo de conducción real, con un equipo de medición embarcado a bordo del autobús.

También se ha evaluado el impacto medioambiental del proceso de fabricación y reciclado del autobús urbano ensayado, así como, de los sistemas de post-tratamiento de gases de escape (donde se ha considerado la producción y reciclado de los metales preciosos que se utilizan como catalizadores). Los datos de los requerimientos de energía y de emisiones de GEI de los diferentes procesos que intervienen en las etapas del ACV del autobús urbano, se han obtenidos a través de la información de los fabricantes y de datos procedentes de publicaciones científicas y de bases de datos como GaBi 4 y GEMIS.

Entre los resultados más relevantes de este análisis comparativo se ha encontrado que el ACV de la tecnología SCR+Urea tiene un consumo de energía y generación de emisiones de GEI mayor que el ACV de la tecnología EGR+DPF, debido, principalmente, a la producción y suministro del AdBlue (formada a partir de agua desionizada y urea) que dicha tecnología requiere para su constante tratamiento de los gases de escape; sin embargo, el autobús que incorpora dicha tecnología, genera, en su uso, un menor impacto medioambiental.

Palabras clave: emisiones contaminantes, Análisis de Ciclo de Vida, autobús urbano, EGR, filtro de partículas, SCR, urea, AdBlue.

1. INTRODUCCIÓN

El sector del transporte por carretera ha crecido rápidamente en los países desarrollados en los últimos años y ha originado, a la vez, un mayor agotamiento de los recursos energéticos fósiles, como el petróleo y el gas natural, entre otros. Añadiendo, además, baja eficiencia en el aprovechamiento de dichos recursos y generación de emisiones de gases de efecto invernadero que su uso conlleva, da como resultado que este sector tenga una importante influencia en el impacto medioambiental [1].

En el caso de España, el sector transporte origina un tercio de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI), que son principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), y estas emisiones crecen a un ritmo muy superior del resto de sectores [1]. Lo que hace sugerir la necesidad de plantear nuevas alternativas, como el uso de biocarburantes para disminuir la dependencia de la energía fósil. En ese sentido, la Directiva 2009/28/CE, requiere que la cuota de energía procedente de fuentes renovables utilizada en el sector transporte sea del 10% en la EU-25 para el año 2020 [2].

Por otra parte, en respuesta al límite de emisiones marcado por la Normativa Euro 4 y por la Directiva 88/77 CE (cuya última modificación es la Directiva 2006/51/CE, que en la actualidad regula las emisiones de los vehículos industriales por carretera) [3], se han implementado tecnologías de post-tratamiento de gases de escape que contribuyen al control de emisiones como los óxidos de nitrógeno (NOx), las partículas (PM) y las emisiones de CO_2 .

El planteamiento de dichas alternativas buscan como objetivo aumentar la eficiencia energética y la sostenibilidad, sin embargo, su implementación debe ir acompañada de un estudio detallado que proporcione información cuantitativa en un contexto global de impacto medioambiental, conocido como Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

El ACV consiste en la recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un producto [4], a través de todas sus etapas consecutivas e interrelacionadas, que abarca desde la “cuna hasta la tumba”, es decir, desde que se extraen las materias primas, se procesan, se fabrica el producto, se ensambla, se distribuye, se utiliza y finalmente se gestiona su residuo, proporcionando resultados numéricos que permiten cuantificar categorías de impacto medioambiental como el cambio climático, el agotamiento de la capa de ozono, la acidificación, el agotamiento de recursos energéticos fósiles, energía consumida, entre otros, con el fin de poder comparar diferentes escenarios de uno o varios productos en su camino de la cuna a la tumba en el contexto de cada categoría de impacto.

En este marco de la introducción de biocombustibles y tecnologías de post-tratamiento de gases de escape en el sector transporte, es interesante realizar un ACV sobre dos autobuses pertenecientes a la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT), que cumplen con la normativa de emisiones Euro 4, cada uno con su respectiva tecnología de post-tratamiento de gases de escape, las cuales son reducción catalítica selectiva con urea (SCR+Urea) y recirculación de gases de escape con filtro de partículas (EGR+DPF), en combinación con el uso de los tres tipos de combustibles que son gasóleo, B20 (20% de biodiésel) y B100 (100% biodiésel). Dicho análisis se llevará a cabo, en el contexto de categorías de impacto de gran relevancia como el calentamiento global (causado por las emisiones de GEI) y energía consumida primaria y fósil [5].

De esta manera, el principal objetivo de este estudio es proporcionar información que permita valorar de manera cuantitativa y comparativa el impacto medioambiental que genera cada una de las etapas del Ciclo de Vida de los autobuses, anteriormente descritos, y más concretamente, la contribución que aporta en dicho impacto, el uso y desempeño de cada tipo de tecnología de post-tratamiento de gases de escape en combinación con cada tipo de combustible, en el contexto de las categorías de impacto antes mencionadas.

2. ALCANCE DEL ESTUDIO

El alcance de este estudio se centra en el Análisis de Ciclo de Vida sobre dos autobuses urbanos de la EMT, (cuyas características técnicas figuran en la Tabla 1), alimentados con gasóleo, B20 y B100. Asimismo, la unidad funcional es la energía consumida en MJ de combustible por cada kilómetro recorrido.

AUTOBUSES URBANOS EURO 4		
Características	Autobús 1	Autobús 2
Tipo de motor	Motor diésel turbo alimentado con inter enfriador	Motor diésel turbo alimentado con inter enfriador
Sistema de inyección de combustible	Inyección "Common-rail"	Bombas de inyección
Sistema de postratamiento de emisiones	EGR+DPF	SCR+Urea
Peso	12.180 kg	12.205 kg

Tabla 1: Características de los autobuses analizados en este estudio [6]

3. METODOLOGÍA

La metodología ACV fue aplicada al Ciclo de Vida de autobuses urbanos Euro 4 y regulada por la norma ISO 14044 y es comúnmente utilizada en la evaluación del impacto medioambiental [7]. Para el caso de un vehículo el Ciclo de Vida consta del ciclo del combustible (extracción, producción y distribución) y del ciclo del automóvil (fabricación, funcionamiento/mantenimiento y reciclado) [8], como se muestra en la Figura 1.

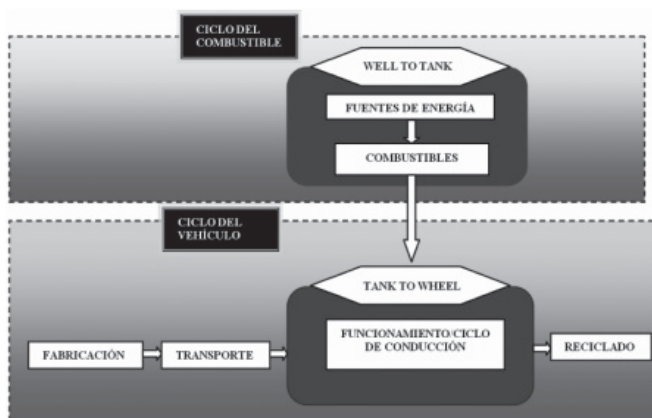


Figura 1: Esquema del ciclo de vida de un vehículo [8]

Las etapas mostradas en la Figura 1 se describen de la siguiente manera:

- Análisis del pozo al tanque (*Well to Tank*; WtT): evalúa la energía requerida y las emisiones de GEI resultantes, asociadas a la producción de los combustibles hasta el suministro de éstos a los autobuses en las estaciones de servicio.
- Análisis del tanque a la rueda (*Tank to Wheel*; TtW): evalúa la energía requerida y emisiones de GEI producidas por el uso del combustible en el autobús.

A la unión del análisis del pozo al tanque y del tanque a la rueda se le conoce como análisis del pozo a la rueda (*Well to Wheel*).

- Análisis de Ciclo de Vida de las tecnologías de post-tratamiento de gases de escape SCR + Urea y EGR+DPF: evalúa la energía requerida y emisiones de GEI producidas en cada uno de los procesos

que intervienen en las etapas de fabricación, mantenimiento, reciclado y uso de las tecnologías de post-tratamiento de gases de escape.

- Análisis de Ciclo de Vida del autobús: Evalúa la energía requerida y emisiones de GEI generadas en cada uno de los procesos que intervienen en las etapas de producción de materiales (PM), ensamblaje (EV), mantenimiento (MV) y final de vida útil (FVU) del autobús.
- Por último se hace el ACV Global integrando los segmentos antes mencionados.

Para la estimación del calentamiento global se ha utilizado la unidad de medición que es el CO₂ equivalente (CO₂ eq.) y que engloba el efecto total de las emisiones de GEI. Para la conversión de los GEI a CO₂ eq. se utiliza la siguiente ecuación [9].

$$\text{CO}_2 \text{ equivalente} = [\text{CO}_2] + 21 * [\text{CH}_4] + 310 * [\text{N}_2\text{O}] \quad (1)$$

La metodología anteriormente descrita se aplicará a cada uno de los escenarios que se muestran en la Tabla 2:

Combustible	Autobús 1	Autobús 2
Gasóleo	Escenario A1	Escenario B1
B20	Escenario A2	Escenario B2
B100	Escenario A3	Escenario B3

Tabla 2: Escenarios analizados en este estudio

4. ANÁLISIS DEL POZO AL TANQUE (WtT)

4.1. GASÓLEO

Una mezcla representativa de crudo es extraída y transportada desde los países de origen hasta los puertos, por medio de una red de oleoductos, donde el crudo es cargado en barcos petroleros y después es transportado vía marítima a los puertos de España. Cerca del puerto el crudo

Todos estos procesos del camino del pozo al tanque para el gasóleo se muestran de manera esquemática en la Figura 2 para un mejor seguimiento.

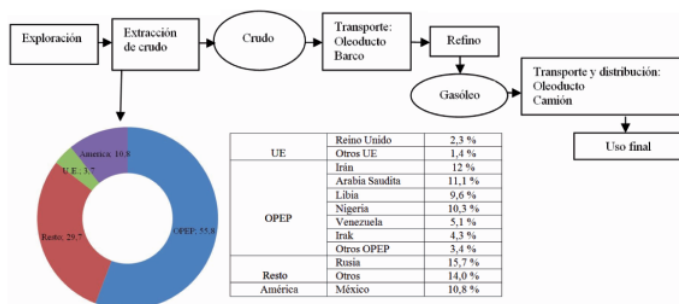


Figura 2: Cadena de producción de gasóleo e importaciones de crudo por países de origen año 2009 [10]

El origen de la materia prima para la producción de biodiésel es básicamente de oleaginosas, grasas vegetales y aceites usados como muestra la Figura 3 y se produce en los países que se muestran en la Figura 4, y para cada tipo se han hecho las siguientes consideraciones.

El camino de producción de biodiésel a partir de semillas oleaginosas se inicia con su cultivo y recolección. La materia prima se transporta por camión, barco o tren hasta las plantas de extracción de aceite vegetal crudo en España. Desde estas instalaciones el aceite es conducido vía transporte por carretera hasta los centros de producción de biodiésel. En las plantas de producción, el éster (ácido graso) es transesterificado para obtener el metiléster [1].

Para el camino del biodiésel obtenido a partir de aceite usado se inicia con la recogida de este residuo por gestores autorizados, que seguidamente transportan por carretera hasta la planta de producción de biodiésel. En estas instalaciones se transesterifica para obtener el metiléster [1].

Para la producción de biodiésel a partir de grasas animales se ha estimado los requerimientos de energía y generación de emisiones a partir de la base de datos GEMIS [11], una vez obtenidas las grasas animales estas se transportan a la planta de transesterificación para obtener el metiléster.

Una vez producido el metiléster, por cualquiera de las vías anteriormente descritas, se distribuye desde los puntos de fabricación a las estaciones de servicio vía transporte por carretera. Los datos de requerimiento de energía y generación de emisiones de GEI del transporte de la materia prima, aceites reciclados y combustibles, así como los procesos de cultivo, transesterificación, distribución y repostaje fueron obtenidos del estudio de Ciemat 2006 [1], EUCAR 2007 [12] y la herramienta informática GaBi 4 [13].

El diagrama de flujo superior ilustra el proceso de producción de biodiésel:

- Las **Producción de herbicidas**, **Producción de fertilizantes** y **Producción de semilla** contribuyen al **Cultivo de oleaginosas: colza, soja y palma**.
- El cultivo produce **Semilla**, que es transportada y sometida a **Extracción de aceite**.
- El aceite extraído es transportado a la **Producción de Biodiésel por Transesterificación**.
- Paralelamente, se realiza la **Extracción de grasas animales** y el **Reciclado de aceites usados** (que incluye la **Recogida de aceites usados**).
- Las grasas animales y los aceites reciclados son transportados y sometidos a **Transesterificación**.
- La **Transesterificación** produce **Biodiésel** y **Gasóleo fig. 2**.
- El **Biodiésel** y el **Gasóleo** se **Mezclan** para su **Uso final**.
- El **Biodiésel** también puede ser transportado y distribuido directamente.

El gráfico de pastel inferior muestra la **Composición de los aceites utilizados (%)**:

Componente	Porcentaje (%)
SOJA	48,49
PALMA	34,8
COLZA	3,21
ACEITE USADO	8,35
GRASA ANIMAL	2,87
OLIVA	0,45
GIRASOL	1,83

Figura 3: Cadena de la producción de biodiésel por tipo de materia prima, 2009 [14]

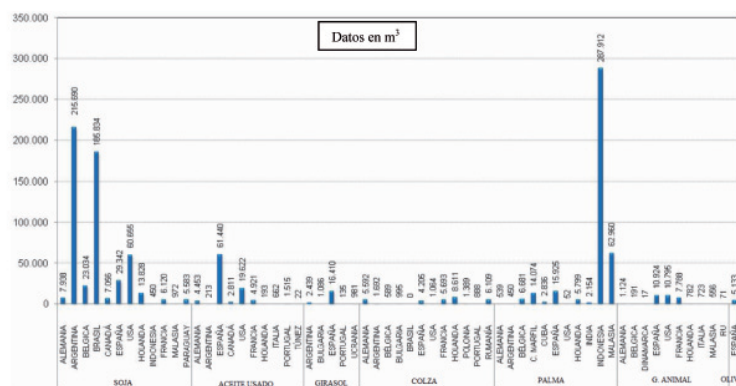


Figura 4: Tipos y orígenes de las materias primas de biodiésel consumido en España 2009 [14]

La Tabla 3 muestra un resumen del gasto de energía primaria externa total (MJep) y fósil (MJfo), así como, las emisiones de GEI en la producción de 1 MJ de cada tipo de carburante analizado en este estudio (MJc).

Combustible	WtT (MJep/ MJc)	WtT (MJfo/ MJc)	WtT GEI (gCO ₂ eq./ MJc)
Gasóleo	0,162	0,1576	13,630
B20 ^a	0,308	0,298	7,711
B100	0,896	0,848	-15,963

Tabla 3: Emisiones y energía requerida para los combustibles analizados (^a Calculado para mezcla 20% B100 y 80% Gasóleo).

De la Tabla 3 se puede observar que el biodiésel y la mezcla B20 ofrecen ventajas con respecto al gasóleo en cuanto a las emisiones de GEI. Esto es debido a que con la biomasa,

el CO₂ es absorbido por la atmósfera durante el proceso de crecimiento y no es entregado hasta el uso del vehículo, sin embargo, en cuanto a consumo de energía, se observa que en esta etapa el biodiésel es el que mayor cantidad de energía requiere seguido del B20 y gasóleo respectivamente. Esto es debido a las tareas agrícolas y menor rendimiento energético en el proceso de transesterificación en comparación con el refino de crudo.

Para transformar los valores de la tabla 3 de unidades de MJep/MJc, MJfo/MJc y gCO₂ eq./MJc a unidades de MJep/km, MJfo/km y gCO₂ eq./km respectivamente se utilizan las siguientes ecuaciones [12], para cada tipo de combustible y tecnología de post-tratamiento de gases de escape.

$$WtT \text{ (MJep/km)} = TtW \text{ (MJc/km)} \times WtT \text{ (MJep/MJc)} \quad (2)$$

$$WtT \text{ (MJfo/km)} = TtW \text{ (MJc/km)} \times WtT \text{ (MJfo/MJc)} \quad (3)$$

$$WtT \text{ GEI (gCO}_2 \text{ eq./km)} = TtW \text{ (MJc/km)} \times WtT \text{ GEI (gCO}_2 \text{ eq./MJc)} \quad (4)$$

Para obtener el término TtW (MJc/km) (el cual representa la energía en MJ del combustible consumida por el autobús por km recorrido), que requieren las ecuaciones 2, 3, 4 se utiliza la Ecuación 5.

$$TtW \text{ (MJc/km)} = \text{Densidad (kg/litro)} \times \text{PCI (MJ/kg)} \times \text{Combustible (l/100km)} / 100 \quad (5)$$

Los valores de consumo de combustible en l/100km se obtienen de la Tabla 7, las densidades y el PCI de cada tipo de combustible de la Tabla 4. Las características de PCI y densidad de la mezcla B20 se han calculado tomando en consideración las características del gasóleo y biodiésel puro y los porcentajes en que cada uno entra a la mezcla. De esta manera los valores transformados para cada escenario se muestran en la Tabla 5.

	Gasóleo	B20	B100
Densidad (kg/litro)	0,835	0,844	0,880
PCI (MJ/kg)	41,850	40,900	37,310

Tabla 4: Características de los combustibles estudiados [1]

	A1	A2	A3
WtT (MJep/km)	1,927	3,773	11,332
WtT (MJfo/km)	1,874	3,651	10,729
WtT GEI (gCO ₂ eq./km)	162,141	94,235	-201,897
	B1	B2	B3
WtT (MJep/km)	1,828	3,613	10,551
WtT (MJfo/km)	1,779	3,496	9,990
WtT GEI (gCO ₂ eq./km)	153,882	90,229	-187,987

Tabla 5: Factores de energía y emisiones obtenidos del análisis WtT para diferentes escenarios.

5. ANÁLISIS DEL TANQUE A LA RUEDA (TtW)

Para el análisis del tanque a la rueda se han utilizado valores obtenidos mediante ensayos sobre una ruta de 15,5 km de la EMT, utilizando los autobuses descritos anteriormente, bajo los escenarios mencionados en la metodología [6] (ver Tabla 7). El uso de estos valores está orientado a cuantificar la energía primaria y fósil requerida, así como, las emisiones de GEI generadas en el proceso WtT (ver Tabla 5) y TtW de los combustibles analizados, e integrar los resultados al ACV global de los autobuses. Para obtener la cantidad de energía fósil para cada tipo de combustible por kilómetro recorrido (MJfoc/km) en la etapa TtW, se multiplica el consumo de combustible TtW (MJc/km) (ver Tabla 7) por un parámetro λ (ver Tabla 6), que determina el ratio de energía fósil con respecto a la energía del combustible utilizado.

	Gasóleo	B20	B100
λ	1	0,8	0

Tabla 6: Factores de ratio de energía fósil [12].

Así los datos estimados de energía (a partir de los valores obtenidos mediante ensayos) en MJc/km y energía fósil en MJfoc/km, así como, las emisiones de GEI, en la etapa TtW de los combustibles analizados se muestran en la Tabla 7.

6. ACV DE LAS TECNOLOGÍAS SCR + UREA Y EGR+DPF

6.1. ACV DE LA TECNOLOGÍA SCR + UREA

El funcionamiento y el Ciclo de Vida de la tecnología SCR+Urea se ha analizado en base a las etapas que a continuación se describen.

	A1	A2	A3	B1	B2	B3
TtW GEI (gCO ₂ eq./km) [6]	913,822	926,301	954,932	864,980	886,841	889,117
Combustible (l/100 km) [6]	34,042	35,401	38,522	32,308	33,896	35,868
TtW (MJc/km) (estimado)	11,895	12,220	12,647	11,289	11,700	11,776
TtW (MJfoc/km) (estimado)	11,895	9,776	0,000	11,289	9,360	0,000

Tabla 7: Emisiones contaminantes agregados en la ruta [6]

6.1.1. ACV del AdBlue

El *AdBlue* es una solución acuosa de urea al 32,5%, que se aplica a los gases de escape antes de que pasen por el catalizador de reducción selectiva, para contribuir a disminuir los óxidos de nitrógeno (NOx) [15] como se muestra en la Figura 8. Para llevar a cabo el ACV de esta solución, se analiza cada una de las sustancias que la conforman, que son básicamente urea y agua desionizada [15].

De la fuente de datos GEMIS [11], se estiman los factores de requerimiento energético y generación de emisiones de GEI por tipo de energía empleada en la producción de 1 Kg. de urea y agua desionizada, los cuales se muestran en la Tabla 8.

	Electricidad (%)	Gas natural (%)	Fuelóleo (%)	Crudo (%)	Lignito (%)	Hulla (%)	Uranio (%)	Energía renovable (%)	Energía MJ€/kg	GEI gCO ₂ eq. /kg
Urea	0,327	90,670	3,559		0,8952	4,540			23,066	632,5
Agua desionizada		22,116		13,324	16,948	18,596	25,721	3,293	0,082	4,621

Tabla 8: Energía requerida y emisiones generadas en la producción de urea y agua desionizada [11]

Para la estimación del requerimiento de energía primaria, fósil y emisiones de GEI generadas en la producción y transporte de 1 MJ de cada tipo de energía (MJe) (de la Tabla 8) necesaria en la producción de urea y agua desionizada, se han considerado datos correspondientes al caso español y a la media europea como se describe a continuación. Para la producción de electricidad se considera que se ha utilizado el mix eléctrico español que se muestra en la Figura 5, y las pérdidas que conlleva su distribución que son alrededor del 16 % [16].

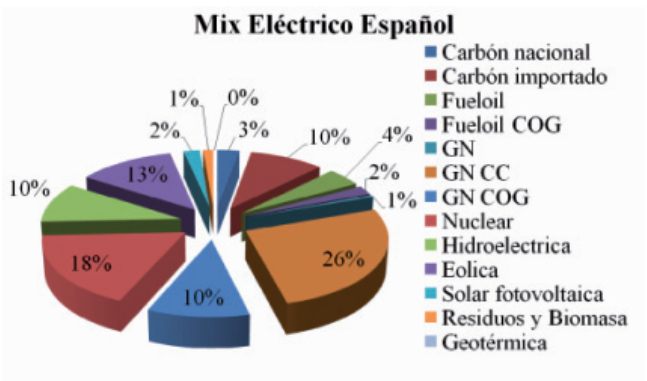


Figura 5: Mix eléctrico español año 2009 [16]

Para la producción y transporte de gas natural los datos más relevantes y pormenorizados se obtuvieron de los estudios EUCAR [12], MEET [17] y Enertrans [9]. Y han sido adaptados al caso español considerando los aprovisionamientos de gas natural que se muestran en la Figura 6.

Para los procesos de producción y transporte del fuelóleo, lignito y hulla, los datos se obtuvieron de la base de datos Gabi 4, referente a los procesos de producción y transporte de diferentes tipos de combustibles, en base a la media europea [13]. La Tabla 9 muestra los factores de requerimiento de energía (los cuales consideran el propio contenido energético de cada tipo de energía) y generación de emisiones, obtenidos

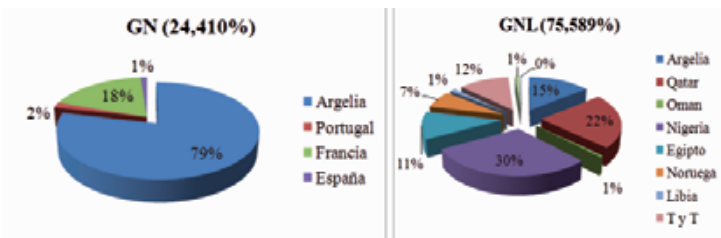


Figura 6: Aprovisionamientos de gas natural en el año 2010 [18]

del análisis de la producción y transporte de cada uno de los tipos de energía descritos anteriormente.

Así, con los datos de la Tabla 8 y 9 se estiman el requerimiento de energía primaria, fósil y generación de emisiones de GEI por kg de urea y agua desionizada que se muestran en la Tabla 10. Una vez que la urea y agua desionizada se han producido, se mezcla en una proporción del 32,5% y 67,5 respectivamente [19], para producir la solución *AdBlue*, que después es distribuida hasta que llega al depósito del autobús. El *AdBlue* se dispensa, generalmente, en las estaciones de servicio y, por tanto, se considera la misma distancia promedio que se ha tenido en cuenta en el estudio de Ciemat para la distribución del gasóleo, así como, el medio de transporte, que es un camión cisterna diesel Euro 4 (MMA 40t), carga nominal de 27 toneladas y una

	Electricidad	Gas natural	Fuelóleo	Lignito	Hulla
MJep/MJe	2,426	1,204	1,145	1,028	0,068
MJfo/MJe	1,770	1,196	1,141	1,020	0,065
GEI (gCO ₂ eq./MJe)	108,48	13,267	12,66	2,000	6,087

Tabla 9: Combustibles utilizados en la producción de urea y agua desionizada.

utilización del 85% [9], cuyo modelo se ha obtenido de la fuente de datos GaBi 4 referente a los procesos de transporte de mercancías.

Para el repostaje de AdBlue se ha considerado el mismo gasto de energía eléctrica que para el repostaje de gasóleo de 0,1422MJ/kg [12] y para la generación de electricidad se ha considerado el mix eléctrico español. La tabla 10 muestra el requerimiento de energía y generación de emisiones de GEI en cada una de las etapas del Ciclo de Vida del AdBlue.

	Urea	Agua desionizada	AdBlue	Distribucion de AdBlue	Repostaje de AdBlue	ACV AdBlue (Total)
MJep/kg	27,644	0,0884	9,044	0,285	0,345	9,675
MJfo/kg	27,416	0,0640	8,953	0,284	0,251	9,490
GEI (gCO ₂ , eq./kg)	935,301	5,036	307,372	22,131	14,646	344,149

Tabla 10: Factores de energía y emisiones en el Ciclo de Vida de la solución AdBlue

	B1	B2	B3
MJep/km	0,135	0,142	0,150
MJfo/km	0,133	0,139	0,147
GEI (gCO ₂ , eq./km)	4,825	5,062	5,357

Tabla 11: Factores de energía y emisiones por kilómetro recorrido del Ciclo de Vida de la solución AdBlue.

El requerimiento de AdBlue por el autobús en kilogramos por kilómetro recorrido, se estima a partir del dato de suministro de esta solución por el sistema de inyección, que es aproximadamente del 4% del volumen de combustible

consumido [15], y cuya densidad es de 1.085 kg/m³ [19]. Una vez que se tiene el consumo de AdBlue en kg/km y mediante los datos de la Tabla 10, se procede a calcular el requerimiento energético y generación de emisiones de GEI por kilómetro recorrido correspondientes a su Ciclo de Vida como se muestra en la Tabla 11.

En la Figura 7 se muestra cada una de las etapas del Ciclo de Vida del AdBlue.

6.1.2. Análisis WtW del combustible utilizado por el sistema de inyección de AdBlue

La cantidad de AdBlue utilizada por el autobús es dosificada con un flujo de 1,5 m³/h de aire comprimido a 3 bar proporcionado por el turbocompresor de aire [20], para que pueda reaccionar con los gases de escape. El sistema conformado por varios dispositivos electrónicos que se encargan de inyectar la cantidad adecuada de aire y AdBlue en el catalizador (como se muestra en la Figura 8), requiere de un suministro de energía eléctrica de 250 W a 24V [20], la cual toma de la batería del autobús. De esta manera, teniendo la energía eléctrica consumida por los dispositivos electrónicos, se estima la cantidad de carburante utilizado,

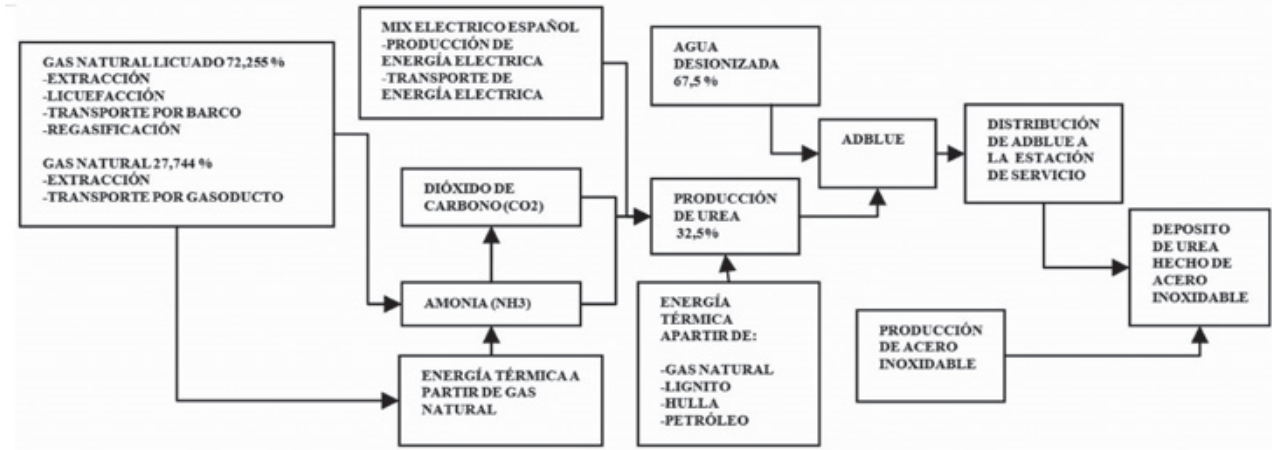


Figura 7: Ciclo de Vida de la solución AdBlue

	Batería (carga-descarga) (nb)	Generador eléctrico (ne)	Motor diésel (nt)	Rendimiento total (nT=nb * ne * nt)
Rendimiento (%)	72,25[8]	95 [8]	35[21]	24,02

Tabla 12: Rendimientos energéticos

considerando los rendimientos energéticos de cada etapa de transformación de la energía química del combustible a energía eléctrica como se muestra en la Tabla 12.

Una vez que se ha estimada la cantidad de combustible destinada al funcionamiento del dispositivo de inyección de urea se procede a realizar el análisis WtT y TtW de dicho combustible, siguiendo la metodología anteriormente descrita obteniéndose los factores de la Tabla 13.

	B1	B2	B3		B1	B2	B3
TtW (MJep/km)	0,093	0,097	0,103	WtT (MJep/km)	0,015	0,030	0,092
TtW (MJfo/km)	0,093	0,078	0,000	WtT (MJfo/km)	0,014	0,029	0,087
TtW GEI (gCO ₂ eq./km)	7,137	7,408	7,808	WtT GEI (gCO ₂ eq./km)	1,269	0,753	-1,651

Tabla 13: Factores de energía y emisiones TtW y WtT del combustible utilizado por el dispositivo de inyección de AdBlue

En la Figura 8 se muestra el sistema de inyección de AdBlue de la tecnología SCR+Urea.

hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos [25] y la energía de reciclado por cada tipo de extracción varía dependiendo

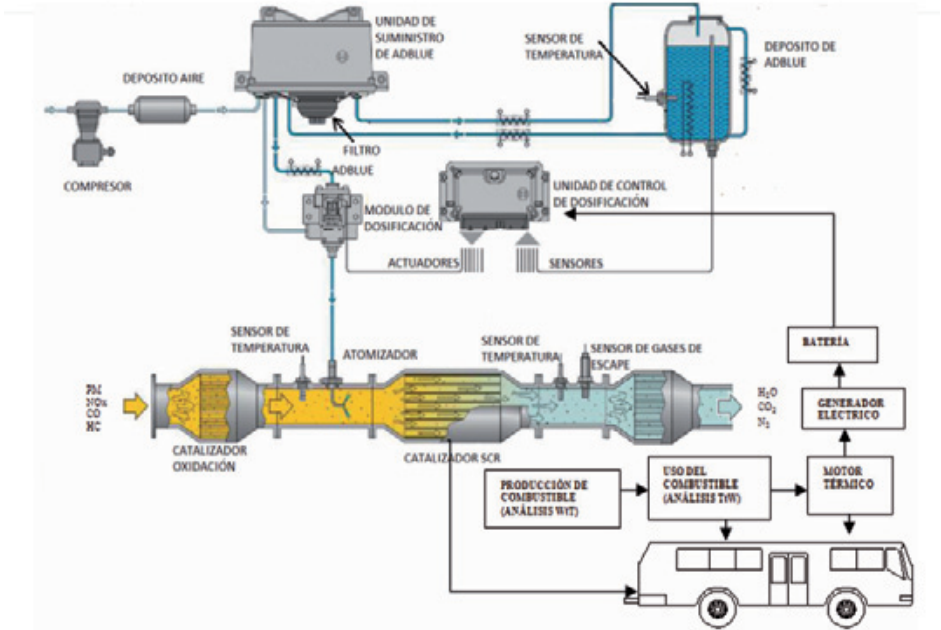


Figura 8: Esquema de funcionamiento de la tecnología SCR+Urea [22]

6.1.3. ACV de los materiales que componen los elementos más relevantes de la tecnología SCR+Urea

En esta etapa se analiza la energía requerida y emisiones generadas en la producción y reciclado de los materiales más relevantes que constituyen la tecnología SCR+Urea como se muestra en la Figura 9, así como, el depósito de acero inoxidable que sirve de contenedor de la urea. También se considera las veces que se recambia el convertidor catalítico el cual él tiene una vida útil de 160.000 km [23].

Los datos de requerimientos de energía primaria y fósil así como de las emisiones de CO₂ equivalentes generadas para la producción y reciclado de 1 Kg. de cada material se muestran en la Tabla 14.

COMPONENTES	MATERIALES	Kg
1 Soporte catalítico Estructura cerámica cubierta con una capa delgada (capa soporte) y diseñada para maximizar el área de contacto de la superficie del catalizador con la corriente de los gases de escape	lilita (fase cristal) -MgO 14% -Al ₂ O ₃ 36% -SiO ₂ 50%	2 x 0,7
2 Estera de hinchamiento Aísla, sella y provee un irrompible recinto al soporte catalítico	Fibra cerámica -Carburo de Silicio	2 x 0,25
3 Capa soporte (Al ₂ O ₃) con recubrimiento de metales preciosos	Oxido Metalico -Al ₂ O ₃ 100%	0,17
4 Metales preciosos Platino y paladio en el caso de ser catalizador de oxidación Platino y rodio en el caso de ser catalizador de reducción	Catalizador oxidación -Pt 3,125% -Pd 87,5 % Catalizador reducción -Pt 3,125 % -Rh 6,25 %	0,002
5 Carcasa del convertidor catalítico Mantiene a la estera de hinchamiento y al catalizador firmemente en su lugar	Acero inoxidable	5

Figura 9: Materiales que conforman el convertidor catalítico [23]

Fuente	Producción de materiales	Mep/kg	Mfo/kg	GEI (kgCO ₂ eq./kg)	Fuente	Reciclado de materiales	Mep/kg	Mfo/kg	GEI (kgCO ₂ eq./kg)
[11]	Carburo de silicio	169,051	139,975	4,901	[24]	Metales preciosos (MGP)	4.170,0	3.080,0	180,476
	Óxido de magnesio (MgO)	260,903	210,505	13,154					
	Metales preciosos (MGP)	41.691	30.835	1.804,7					
[13]	Acero inoxidable	72,919	51,060	5,2274	[11]	Acero inoxidable	7,220	4,603	0,5389
	Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	20,057	18,001	1,3963					
	Dióxido de silicio (SiO ₂)	0,7416	0,6904	0,0440					

Tabla 14: Factores de energía y emisión en la producción y reciclado de los materiales que componen el convertidor catalítico

de muchos factores. Sin embargo, se estima una media de consumo de energía de aproximadamente un 10%, de la energía empleada para su producción [24].

Así del análisis descrito anteriormente y los datos de la Figura 9 y la Tabla 14 se obtienen los factores por kilómetro recorrido de la Tabla 15, considerando una vida útil del autobús aproximadamente de 880.000 km [26].

	Producción (B1,B2,B3)	Reciclado (B1,B2,B3)	Total (B1,B2,B3)
MJep/km	2,1395E-2	4,6077E-4	2,1855E-2
MJfo/km	1,5006E-2	2,9470E-4	1,5301E-2
GEI (gCO ₂ eq./km)	1,5256	3,4093E-2	1,5597

Tabla 15: Factores de energía y emisiones de la producción y reciclado de los materiales que componen tecnología SCR+Urea

6.2. ACV DE LA TECNOLOGÍA EGR+DPF

La Figura 10 muestra, de manera esquemática, el funcionamiento y el Ciclo de Vida de la tecnología EGR+PDF, la cual se ha analizado en base a las etapas que a continuación se describen.

6.2.1. Análisis WtW del combustible utilizado para la regeneración del filtro de partículas

La regeneración es un proceso de auto limpieza que consiste en quemar periódicamente las partículas acumuladas

en el filtro, para lo cual, se necesita una temperatura alrededor de 500 °C [27]. Esto se logra mediante una post-inyección de combustible adicional al final de la carrera de expansión, y su oxidación ulterior en el catalizador de oxidación situado antes del filtro de partículas, como se muestra en la Figura 10.

La regeneración interviene, dependiendo del estado de obstrucción del filtro, cada 400 km [27] y su ciclo tiene una duración aproximada de 15 minutos [28]. Durante este periodo se genera un consumo de combustible excedente aproximado de 3,1% [28], de esta manera considerando una velocidad promedio de 40km/h para un autobús urbano y los datos de consumo de combustible y emisiones por kilómetro de la Tabla 7, se obtiene la cantidad de combustible excedente debido al ciclo de regeneración, de la cual, a su vez, se procede a realizar un estudio WtT, TtW obteniéndose los resultados de la Tabla 16.

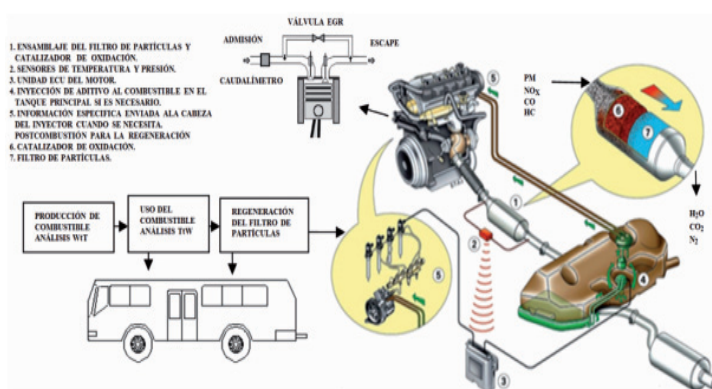


Figura 10: Esquema de funcionamiento de la tecnología EGR+DPF [27]

	A1	A2	A3		A1	A2	A3
WtT (MJep/km)	0,00149	0,00291	0,00878	TtW (MJep/km)	0,00921	0,00947	0,00980
WtT (MJfo/km)	0,00145	0,00282	0,00831	TtW (MJfo/km)	0,00921	0,00757	0,00000
WtT GEI (gCO ₂ eq./km)	0,12565	0,07302	-0,15647	TtW GEI (gCO ₂ eq./km)	0,70821	0,71788	0,74007

Tabla 16: Factores WtT y TtW del combustible utilizado para la regeneración del filtro de partículas

6.2.2. Análisis del requerimiento de energía primaria, fósil y de las emisiones de GEI

Para realizar la limpieza del filtro de partículas, éste debe desmontarse y someterse a un proceso de eliminación de cenizas cada 100.000 km [29], por medio de una máquina de limpieza de filtro de partículas que requieren de una toma de corriente de 110V, 15 AMP [30], en un periodo de tiempo de 30 minutos [31]. Sin embargo como la vida útil de un filtro de partículas es aproximadamente de 200.000 km [31], se ha considerado que este tipo de mantenimiento se realiza aproximadamente sólo una vez por cada recambio. De esta manera considerando el mix eléctrico español para la generación de electricidad y sus pérdidas por distribución, se ha estimado los factores de energía y emisiones de la Tabla 17.

	(A1,A2,A3)
MJep/km	0,00227
MJfo/km	0,00166
GEI (gCO ₂ eq./km)	0,09666

Tabla 17: Factores de energía y emisiones correspondientes a la limpieza del filtro de partículas

6.2.3. Materiales que conforman la tecnología EGR+DPF

En esta etapa se analiza la energía requerida y las emisiones de GEI generadas correspondiente a la producción y reciclado de los materiales más relevantes que constituyen la tecnología EGR+DPF, y que se muestran en la Figura 11. También se considera las veces que se recambia el conjunto

filtro de partículas y catalizador de oxidación (aproximadamente cada 200.000 km [31]) durante la vida útil del autobús.

Los factores de energía requerida y emisiones generadas de la producción y reciclado de materiales de la tecnología EGR+DPF por km recorrido se muestran en la Tabla 18.

7. ACV DE LOS AUTOBUSES

Una aproximación de los porcentajes de material que componen un autobús se ha obtenido de la bibliografía [32], como se muestra en la Figura 12, y de la base de datos GaBi 4 correspondiente a los procesos de producción de materiales se han obtenido datos de requerimiento de energía y generación de emisiones.

Para el ensamblaje se considera que el consumo de energía va desde 17.400 a 22.100 KJ/kg, por lo que se utiliza el promedio, dicha energía proviene de electricidad y energía térmica. El reparto es del 50/50 [33], [34].

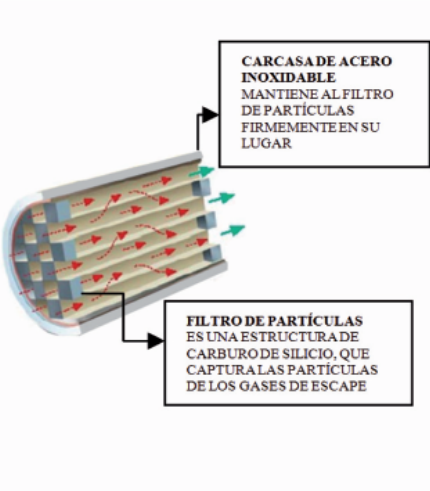
Para el mantenimiento se ha supuesto que se consume un 17% del total de energía requerida para la producción de los materiales y ensamblaje del vehículo [35].

En el caso del final de vida útil la energía gastada y emisiones generadas en los procesos de reciclaje de distintos materiales se obtuvieron de la Base de Datos GaBi 4 y los porcentajes así como el tipo de proceso por el que atraviesa cada tipo de material se han consultado de la literatura científica [33].

Con los datos de la Figura 12 se obtienen los factores

COMPONENTES	MATERIALES	Kg
Soporte catalítico	Iolita (fase cristal)	0,7 kg
	-MgO 14%	
	- Al ₂ O ₃ 36%	
	- SiO ₂ 50%	
Estera de hinchamiento	Fibra cerámica	0,25 kg
	-Carburo de Silicio	
Capa soporte	Oxido Metálico	0,17 kg
	- Al ₂ O ₃ 100%	
Metales preciosos	Catalizador oxidación	0,0018125kg
	-Pt 3,448%	
	-Pd 96,551 %	
Filtro de partículas	Fibra cerámica	0,7 kg
1	Estructura de carburo de silicio, que captura las partículas de los gases de escape	
Carcasa del DOC+DPF		
2	Mantiene al filtro de partículas firmemente en su lugar	Acero inoxidable
		5 kg

Figura 11: Materiales que conforman la tecnología EGR+DPF [15] [23].



	Producción (A1,A2,A3)	Reciclado (A1,A2,A3)	Total (A1,A2,A3)
MJep/km	7,1591E-4	4,9615E-5	7,6552E-4
MJfo/km	5,3192E-4	3,2498E-5	5,6442E-4
GEI (gCO ₂ eq./km)	4,0461E-2	3,4338E-3	4,3895E-2

Tabla 18: Factores de energía y emisiones de la producción y reciclado de los materiales que componen tecnología SCR+Urea

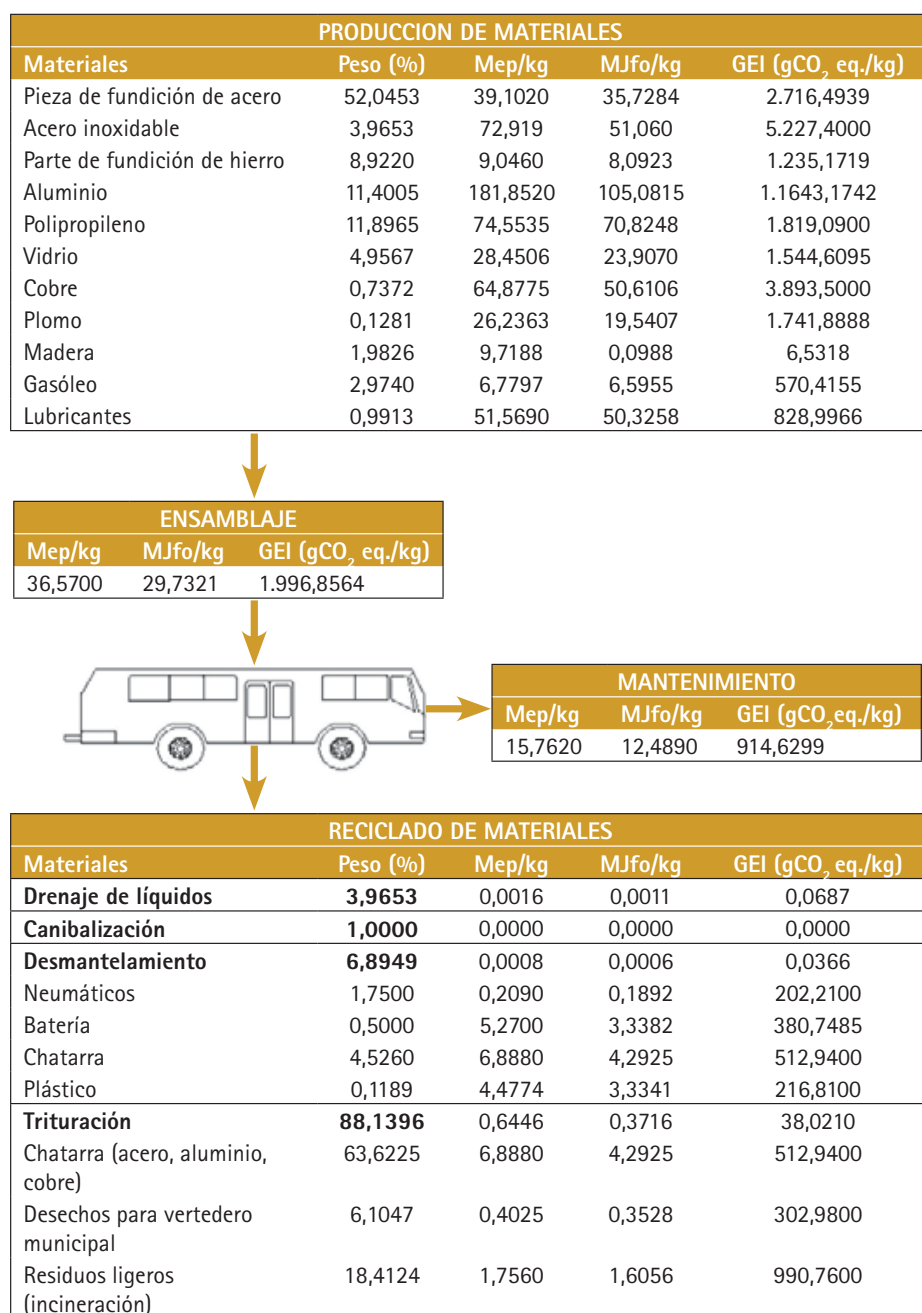


Figura 12: Etapas del Ciclo de Vida del autobús

de requerimiento de energía y generación de emisiones de GEI por kilómetro recorrido, como se muestra en la tabla 19, considerando el peso (sin las tecnologías de post-tratamiento de gases de escape) y vida útil de cada uno de los autobuses.

8. RESULTADOS OBTENIDOS

Se ha descrito en este estudio de manera detallada la forma en que se han obtenido los factores de energía y emisiones por kilómetro recorrido para cada escenario y cada una de las

etapas mencionadas en la metodología. Ahora, para una mejor presentación y descripción de los resultados, estos factores se integran sumándolos de manera directa por etapa y se obtienen los factores globales que se muestran en la tabla 20, que corresponden al ACV global. El porcentaje que representa cada una de las etapas con respecto de cada factor global se muestran en las Figuras 13, 14 y 15.

Los resultados del *Análisis de Ciclo de Vida Global* de la Tabla 20 muestran que el escenario B3 es la mejor alternativa desde el punto de vista de emisiones de GEI, y aunque el consumo de energía total es muy elevado, un bajo porcentaje de dicha energía es fósil, ya que durante el uso del autobús se utiliza B100 lo cual produce cifras de energía fósil nula en la etapa TtW como se muestra en la Figura 14.

En general los resultados de la Tabla 20 muestran que en los escenarios B1, B2 y B3 existe un menor requerimiento de energía y generación de emisiones de GEI en comparación con los escenarios A1, A2 y A3 cuando se utiliza el mismo tipo de combustible. Esto es debido a que, aún cuando el Ciclo de Vida de la tecnología de post-tratamiento de gases de escape SCR+Urea tiene un consumo energético primario y fósil, así como, una generación de emisiones de GEI mayor que el Ciclo de Vida de la tecnología EGR+DPF (como se aprecia en las Figuras 13, 14 y 15), 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 que al final resulta ser más efectiva.

En cuanto al ACV de los propios autobuses, se tiene mayor consumo de energía y generación de emisiones de CO₂ equivalente en la etapa de producción de materiales de cada autobús, siendo menor en el autobús con tecnología SCR + Urea, debido a que no se añade la contribución correspondiente de consumo energético y generación de emisiones que se genera en la producción de materiales de su tecnología de post-tratamiento, ya que si se considera el conjunto autobús y tecnología de post-tratamiento, resultan cifras mayores de gasto energético y emisiones en esta etapa para el autobús con tecnología SCR+Urea.

	A1	A2	A3	B1	B2	B3
MJep/km	15,4048	17,5750	25,5616	14,8549	17,0564	24,0784
MJfo/km	15,0124	14,6688	11,9706	14,4564	14,2501	11,3917
GEI (gCO ₂ eq./km)	1.171,3699	1.115,9429	848,4419	1.120,4822	1.078,9274	803,2819

Tabla 19: Emisiones y energía requerida en el Ciclo de Vida de los autobuses

	(A1, A2, A3)				(B1, B2, B3)			
	PM	EV	MV	FVU	PM	EV	MV	FVU
MJep/km	0,7766	0,5061	0,2180	0,0778	0,7750	0,5072	0,2184	0,0777
MJfo/km	0,6049	0,4120	0,1727	0,0495	0,6037	0,4123	0,1731	0,0494
GEI (gCO ₂ eq./km)	46,8019	27,6383	12,6522	8,1739	46,7049	27,6950	12,6779	8,1569

Tabla 20: Emisiones y energía requerida en el Ciclo de Vida Global

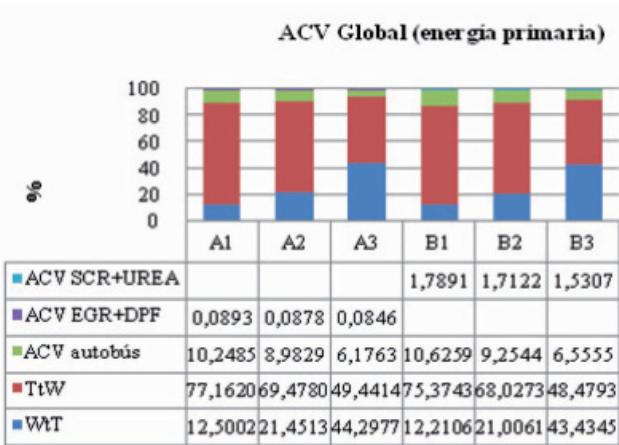


Figura 13: Requerimiento de energía primaria

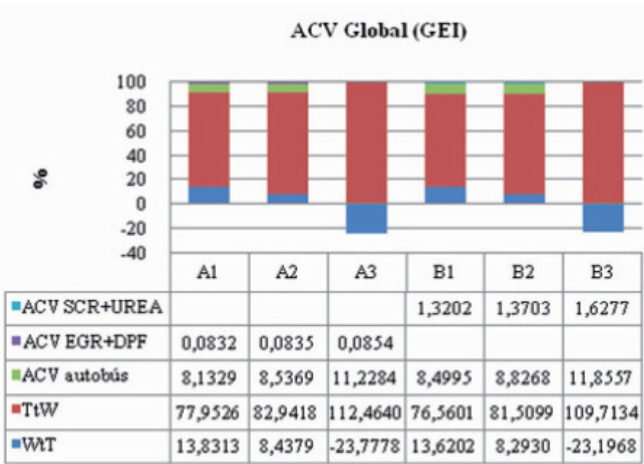


Figura 15: Emisiones generadas de GEI

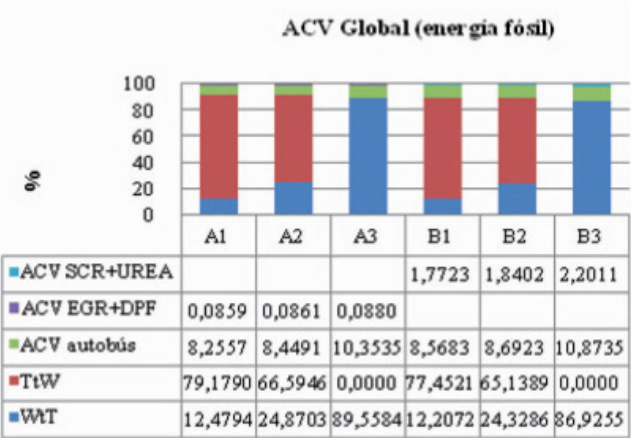


Figura 14: Requerimiento de energía fósil

9. CONCLUSIONES

El ACV aplicado a autobuses urbanos corrobora que el uso del biodiésel reduce las emisiones de GEI, pero el consumo de energía primaria se ve incrementado; sin embargo, un

bajo porcentaje de esta energía corresponde a energía fósil, ya que el biodiésel se obtiene a partir de recursos no fósiles (como son las plantas oleaginosas y/o grasas animales).

La totalidad de energía fósil consumida por el uso de biodiésel se da en la etapa WtT, siendo los procesos, como el cultivo y transesterificación, los más relevantes; por lo que en el primero se deberían buscar alternativas para reducir el consumo de fertilizantes que requieren de una importante cantidad de energía fósil en su producción, y, en el segundo, se podrían implementar sistemas de cogeneración que utilicen fuentes de energía renovable en las plantas de transesterificación para aumentar su eficiencia energética y disminuir el consumo de energía fósil.

En cuanto al ACV de las tecnologías de post-tratamiento de gases de escape, la tecnología SCR+Urea llega a tener un requerimiento de energía primaria y fósil hasta 20 veces mayor que la tecnología EGR+DPF, y, en cuanto a emisiones de GEI una generación 16 veces mayor, esto se debe, principalmente, al gran requerimiento de energía fósil en el proceso de producción de la urea que se forma básicamente a partir de Gas Natural, el cual representa cerca del 90,67% de la energía requerida total. Sin embargo,

esta tecnología contribuye enormemente durante el uso del autobús a disminuir las emisiones de GEI y, además, aumenta la eficiencia energética del uso del combustible por lo que su implementación compensa con creces el alto impacto ambiental de su Ciclo de Vida.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] España. Centro de Investigaciones Energéticas y Tecnológicas (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*. 1ª edición. Madrid: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2006. 146 p. ISBN 84-8320-376-6.
- [2] Unión Europea. Directiva 2009/28/CE de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 6 de junio de 2009.
- [3] 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.
- [4] International Organization for Standardization. *Life cycle assessment: Requirements and Guidelines*. ISO 14044, Geneva, Switzerland: ISO, 2005.
- [5] Wegener-Sleeswijk A, F C M-van Oers L, Guinée JB, et al. "Normalization in Product Life Cycle Assessment: An LCA of the Global and European Economic System in the Year 2000". *Science of the Total Environment*. 2008. Vol.390, p. 227-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.09.040>
- [6] López-Martínez JM, Jiménez Alonso F, Aparicio Izquierdo F, et al. "On-road emissions from urban buses with SCR + Urea and EGR + DPF systems using diesel and biodiesel". *Transportation Research Part D*. 2009. Vol.14, p. 1-5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2008.07.004>
- [7] Russo C, Cappelletti GM, Nicoletti GM. "Life Cycle Assessment (LCA) used to compare two different methods of ripe table olive processing" *Grasas y Aceites*. 2010. Vol. 61(2), p.136-142. <http://dx.doi.org/10.3989/gya.087509>
- [8] López-Martínez JM. *El medio ambiente y el automóvil. El reto del vehículo automóvil frente a la reducción global del CO2*. 1ª edición. Madrid: Ciedossat, 2007. 440p. ISBN: 978-84-96437-70-8.
- [9] López-Martínez JM, Sánchez J, Gómez A. *Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte*. 1ª edición. Madrid: Grupo Gestor del Proyecto Enertrans, 2009. 50p. Monografías Enertrans; 8. ISBN: 978-84-89649-29-3.
- [10] España. Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos (CORES). *Boletín Estadístico de Hidrocarburos. Resumen año 2009*. Madrid: MYTIC, 2009. 144p.
- [11] Öko-Institut, Institute for Applied Ecology e. V. *Global Emission Model of Integrated Systems (GEMIS)* [en línea]. Versión 4.6. [Berlín]: [s.n.], Febrero 2010, [ref. de 1 de Mayo de 2011]. Disponible en: <http://www.oeko.de/service/gemis/en/download.htm>
- [12] EUCAR. *Well-to-Wheel analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context* [en línea]. [Bruselas, Bélgica]: European Commission Joint Research Center, Marzo de 2007 [ref. de 1 de Mayo de 2011]. Disponible en: http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/WTW_Report_010307.pdf
- [13] PE International. *GaBi 4 Software* [CD-ROM], Versión 4.4 [Stuttgart]: [s.n.], Septiembre 2010.
- [14] *Informe anual sobre el uso de biocarburantes correspondiente al ejercicio 2009*. [Madrid]: Comisión Nacional de Energía, 2011. 75p.
- [15] Larsson G, Hansson P-A. "Environmental impact of catalytic converters and particle filters for agricultural tractors determined by life cycle assessment". *BYOSYSTEMS ENGINEERING*. 2011. Vol.30, p. 1-7.
- [16] España. Secretaría de Estado de Energía. *La energía en España 2009*. Madrid: MYTIC, 2010. 152p. ISBN: 978-84-96275-91-1
- [17] Transport Research Laboratory. *Methodology for Calculation Transport Emissions and Energy Consumption*, [Brussels, Belgium]: European Commission, 1999. 381p.
- [18] Enegas. *El Sistema Gasista Español informe 2010*. [Madrid]: Autor, 2011. 168p.
- [19] Miller WR, Klein JT. "The Development of Urea-SCR Technology for US Heavy Duty Trucks". *SAE Series*. 2000, Paper Num, 2000-01-0190
- [20] Fritz N, Mueller R, Zwerbig J, et al. "On-Road Demonstration of NOx Emission Control for Diesel Trucks with SINOx Urea Systems". *SAE Series*. 1999, Paper Num, 1999-01-0111.
- [21] Gilardi J. *Motores de combustión interna*. 1ª edición. San José, Costa Rica: IICA 1985. 135p. ISBN: 92-9039-027-1
- [22] Hesser M, Lüders H, Henning RS. "SCR Technology for NOx Reduction: Series Experience and State of Development" En: *Actas del 11º Congreso Diesel Engine Emissions Reduction (DEER)*, (Chicago, Illinois 21-25 de agosto). [s.l.]: [s.n.], 2005.
- [23] Amatayakul W, Ramnäs O. "Life cycle assessment of a catalytic converter for passenger cars". *Journal of Cleaner Production*. 2001. Vol 9, p. 395-403. [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526\(00\)00082-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526(00)00082-2)
- [24] Vanbellen F, Chitinne M. "Extreme Makeover:UPMR's Hoboken plant". En: *Actas del Congreso European Metallurgical Conference (Düsseldorf, Germany 11-14 de junio)*, v.l. Clausthal-Zellerfeld: GDMB Medienverlag, 2007. ISBN 978-3-940276-04-9
- [25] Jimenez de Aberasturi D, Pinedo R, Ruiz de Larramendi I, et al. "Recovery by hydrometallurgical extraction of the platinum-group metals from car catalytic converters". *Minerals Engineering*. 2011. Vol.24, p. 505-513. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2010.12.009>
- [26] Ally J, Pryor T. "Life Cycle Assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation system". *Journal of Power Sources*. 2007. Vol.170, p. 401-411. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.036>
- [27] Jeff D. *Tecnología del coche moderno*. 1ª edición. Barcelona: Ceac, 2005. 224p. ISBN: 84-329-1085-6
- [28] Prikhodko VY, Parks JE. "Implications of Low Particulate Matter Emissions on Systems Fuel Efficiency for High Efficiency Clean Combustion". *SAE Series*. 2009, Papers Num, 2009-01-2709.
- [29] Mayer A. *Particle filter retrofit for all diesel engines*. 1ª edición. Germany: Expertverlag, 2008. 443p. ISBN: 978-3-8169-2850-8
- [30] SPX Service Solutions. *Limpiador del filtro de partículas diesel* [en línea]. [s.l.]: [s.n.], Octubre de 2010 [ref. de 3 de Mayo de 2011]. Disponible en Web: http://www2.otctools.com/otctools.com/newcatalog/products/536119_ES.pdf
- [31] Manufacturers of Emission Controls Association (MECA). *Diesel Particulate Filter Maintenance: Current Practice and experience* [en línea]. Washington, D.C.: Autor, Junio de 2005 [ref. de 3 de Mayo de 2011]. Disponible en Web: http://www.meca.org/galleries/default-file/Filter_Maintenance_White_Paper_605_final.pdf
- [32] Ally Jaime. *Life Cycle Assessment (LCA) of the Hydrogen Fuel Cell, Natural Gas, and Diesel Bus Transportation Systems in Western Australia* [en línea]. [Australia Occidental]: Department for Planning and Infrastructure, Febrero de 2008 [ref. de 2 de Mayo de 2011]. Disponible en Web: http://www.transport.wa.gov.au/ACT_P_alt_LCAreport.pdf
- [33] Schweimer Georg W, Levin Marcel. *Life Cycle Inventory for the Golf A4* [en línea]. [s.l.]: [s.n.], ca. 2001 [ref: 9 de mayo de 2011]. Disponible en Web: http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info_center/en/publications/2007/01/Golf_A4_Life_Cycle_Inventory.-bin.acq/qual-BinaryStorageItem.Single.File/golfa4_english.pdf
- [34] Zamel N, Li X. "Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada". *Journal of Power Sources*. 2006. Vol. 155, p 297-310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.04.024>
- [35] Sullivan JL, Williams RL, Yester S, et al. "Life Cycle Inventory of a Generic U.S. Family Sedan-Overview of Results Usar Amp Project". *SAE Series*. 1998, Paper Num. 982160.