Comparativa de tecnologías de propulsión de sistemas de transporte público en españa

Elvira Maeso-González, Guadalupe González-Sánchez y Pablo Pérez-Cerón de la Cátedra de Gestión del Transporte de la Universidad de Málaga

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/5738

1. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el medio ambiente, el agotamiento progresivo del petróleo y la incertidumbre de su precio está generando cada vez una mayor concienciación a favor de una movilidad más sostenible. Son numerosos los argumentos que promueven el cambio de modelo de transporte actual.

Por un lado, el consumo diario mundial de petróleo asciende a 84 millones de barriles, siendo la dependencia de éste del sector del transporte de la Unión Europea de un 96% y estimándose en 40 años las reservas probadas del petróleo. Así pues, encontrar y desarrollar soluciones alternativas al mismo se convierte en una necesidad estratégica de futuro.

Por otra parte, el impacto en el medio ambiente del uso de combustibles fósiles por el sector del transporte representa el 33% del total de emisiones de CO_2 y, particularmente, el transporte urbano es responsable de casi el 25% de las emisiones totales.

Es por ello que actualmente en el marco político y legislativo se manifiesta una decidida voluntad de la Unión Europea por promover el cambio hacia un transporte más limpio, marcando objetivos de reducción de emisiones contaminantes y fomentando el uso de nuevas alternativas de combustibles a través de distintos reglamentos, directivas y planes.

Aunque los vehículos privados son cada vez más eficientes energéticamente, el transporte colectivo es una pieza clave para el desarrollo de la movilidad sostenible. El transporte público urbano constituye un segmento prioritario de mejora, ya que contribuye decisivamente a paliar los problemas que genera la movilidad desde las exigencias medioambientales, energéticas y económicas.

En este sentido estamos siendo testigos de los avances tecnológicos que se están poniendo en práctica en las diferentes ciudades.

1.1. ESTADO DEL ARTE DE LOS COMBUSTIBLES Y SISTEMAS DE PROPULSIÓN

Actualmente existen distintas alternativas de sistemas de propulsión y combustibles para los vehículos de transporte público. La principales son: Diésel, Biodiésel, Bioetanol, Gas Natural Comprimido (GNC), Gas Licuado de Petróleo (GLP), Eléctrico, Híbrido Eléctrico (diésel-eléctrico y GNC-eléctrico) e Hidrógeno (tecnología de celdas).

1.1.1. Diésel Estándar

Los motores diésel llevan ya una larga evolución de desarrollo continuo y se trata de una tecnología confiable y durable. Por ello, actualmente es la tecnología más utilizada junto con los motores de gasolina en los turismos y en autobuses ha sido la más extendida con diferencia durante muchos años.

Actualmente los vehículos diésel son mucho más limpios de lo que eran en el pasado, aunque la mayoría de ellos siguen emitiendo niveles más altos de óxidos de nitrógeno (NO_x) y de partículas (MP) que los vehículos de gasolina. Para controlar estas emisiones los fabricantes adoptan varias medidas, como el uso de catalizadores, tecnología de recirculación de los gases de escape (EGR), tecnología de reducción catalítica selectiva (SCR) o utilización de filtros diésel de partículas (DPF). Sin embargo, los motores diésel emiten algo menos de dióxido de carbono (CO_2) que los de gasolina para la misma potencia, por lo que en muchos casos se adopta el diésel con sistemas adecuados de reducción de emisiones de partículas y de NO_x como mejor alternativa desde un punto de vista medioambiental.

No obstante, gran parte de la responsabilidad de la contaminación derivada del transporte recae sobre los vehículos diésel. Por ello, es necesario meditar sobre combustibles y vehículos alternativos que, una vez alcanzada una economía de escala, disminuyan las emisiones de contaminantes a la atmósfera y la dependencia energética de los países.

1.1.2. Biodiésel

El biodiésel, biocombustible derivado de aceites vegetales que puede reemplazar al gasoil mineral, se obtiene mediante operaciones de transesterificación y refino de aceites vegetales puros (colza, girasol, palma y soja, por ejemplo) y también de aceites vegetales usados y de grasas animales. El producto así obtenido es empleado en motores diésel como sustituto del gasóleo, ya sea en mezclas con éste o como único combustible.

Las notaciones abreviadas, B20, B30, B50 o B100, indican el porcentaje por volumen de biodiésel en la mezcla.

El biodiésel aspira a ser una herramienta más dentro de la gama de combustibles y no persigue establecerse como única fuente alternativa a los combustibles fósiles, ya que para producir mediante biodiésel una cantidad de energía equiparable a la de los combustibles fósiles podría generar una crisis alimentaria global por sustitución de tierras de cultivo para la generación de energía y efectos ambientales perjudiciales derivados de la destrucción de ecosistemas y del uso de determinados fertilizantes y abonos.

El funcionamiento de la propulsión de vehículos con biodiésel no difiere del de los vehículos diésel estándar; de hecho, los motores son los mismos y cualquier vehículo que utilice diésel puede utilizar biodiésel. No obstante, el B100, producto muy ecológico, requiere modificaciones en los motores de vehículos anteriores a 1994.

En cuanto a las emisiones, son mucho menores que las del gasóleo fósil. El uso de biodiésel puro al 100% (bastante infrecuente) reduciría las emisiones

netas de CO_2 entre un 40% y un 50%, y el uso del 20% disminuye éstas entre un 8% y un 10%. Hay que reseñar que este cálculo se basa en el "ciclo de vida" completo del biodiésel, desde su cultivo hasta su uso en el vehículo. El biodiésel también reduce las emisiones de gases contaminantes, aunque las emisiones exactas de este biocarburante varían en función del tipo de vehículo diésel y de la especificación del combustible.

1.1.3. Bioetanol

El bioetanol es otro biocarburante fabricado a partir de materias primas ricas en azúcar o en almidón y de materiales celulósicos. En este caso se trata de un aditivo de la gasolina.

El bioetanol puede emplearse en una proporción de 5% de bioetanol y 95% de gasolina, con arreglo a la norma de calidad europea EN 228, sin que necesite modificación alguna del motor. Algunos fabricantes de vehículos especifican que esta mezcla no debe sobrepasar este 5% para no anular la garantía del vehículo, mientras que otros fijan como máximo el 10%. También puede mezclarse en porcentajes desde el 10 al 85%, pero en este caso sí que se requieren modificaciones en los vehículos.

La ventaja principal de emplear bioetanol como carburante es que reduce las emisiones netas de gases de efecto invernadero en comparación con el uso de la gasolina. El empleo de bioetanol puro al 100% reduciría las emisiones netas de CO_2 sobre la base de su "ciclo de vida útil" entre un 50% y un 60% dependiendo de las materias primas empleadas, con lo que el uso de una mezcla con el 5% de bioetanol disminuiría éstas entre un 2,5% y un 3%.

1.1.4. Gas Natural Comprimido (GNC)

El GNC es esencialmente gas natural almacenado a altas presiones, con valores de presión que varían en función de cada país. Este gas natural es principalmente metano, que al tener un alto índice de hidrógeno por carbono, produce menos CO_2 por unidad de energía entregada que otros hidrocarburos más pesados.

Los vehículos de gas natural (VGN) tienen menores emisiones atmosféricas que los diésel de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) y partículas (PM). Sin embargo, son mayores las emisiones de metano, importante gas de efecto invernadero. Para oxidar y eliminar estos niveles, relativamente altos, de metano libre, los VGN monocombustibles suelen llevar catalizadores específicos de tres vías, pero no pueden ser instalados en los VGN a doble combustible.

Las emisiones de CO_2 de un VGN funcionando a cargas razonablemente altas se reducen en un 20% respecto a las de sus equivalentes de gasolina, y entre un 5 y 10% de los diésel. Cabe señalar que en ámbito urbano esta ventaja de los VGN se ve invalidada, por el mejor rendimiento de los motores diésel a bajas cargas, que iguala las emisiones de CO_2 en este caso.

En cuanto a la contaminación acústica, el motor de GNC reduce ésta sustancialmente, de 5 a 8 dB, al funcionar de forma más suave y silenciosa.

1.1.5. Gas Licuado de Petróleo (GLP)

El GLP es una mezcla de propano (C_3H_8) y de butano (C_4H_{10}). La proporción de ambos gases es variable en función del país y del tipo de vehículo. Por ejemplo, en España para vehículos turismo de automoción, la composición volumétrica es de un 30% de propano y 70% de butano, mientras que para vehículos monocombustible, como los autobuses, es de un 70% de propano y 30% de butano. Los GLP son extraídos a partir de los procesos de refino y de los yacimientos de gas natural húmedo.

En condiciones normales de presión el GLP es un gas, no obstante, se licua al someterlo a una baja presión (en torno a los 10 bares). Así, el almacenamiento del GLP en los vehículos se hace en estado líquido y su combustión en el motor en estado gaseoso.

Las emisiones contaminantes de NO_x, CO, HC y partículas de los vehículos GLP son inferiores a las de los carburantes convencionales (gasolinas y gasóleos). En cuanto a las emisiones de CO_2 son inferiores a los de gasolina y similares a las del diésel.

1.1.6. Eléctrico

El vehículo eléctrico obtiene la tracción de los motores eléctricos. Dentro del concepto de vehículo eléctrico existen varias posibilidades en función de la fuente de energía eléctrica: funcionamiento con células de combustible, placas solares, etc. Este epígrafe se centra en los vehículos alimentados exclusivamente por baterías por ser la tecnología más desarrollada actualmente.

El vehículo eléctrico se compone de una batería que almacena la energía, uno o varios motores eléctricos y un sistema de gestión de la energía (controlador). El motor o motores eléctricos de tracción están conectados a las ruedas motrices, el ordenador controla, gestiona y regula la potencia y el cargador conectado a la red eléctrica permite la recarga de las baterías a través de un enchufe convencional doméstico.

Los vehículos eléctricos no tienen emisiones atmosféricas en el punto de uso, por lo que se trata de una buena alternativa a los vehículos de motor térmico en zonas urbanas donde el tráfico es intenso [5]. Sin embargo, un análisis exhaustivo de los beneficios medioambientales de estos vehículos debe incluir las emisiones derivadas de la producción y el suministro de la electricidad para la recarga de las baterías. Dichas emisiones varían en función del modo de producción de la electricidad (centrales térmicas de combustibles fósiles, energías renovables, etc.). No obstante, la contaminación global asociada a los vehículos eléctricos siempre es inferior a la de los vehículos térmicos que utilicen combustibles convencionales como gasolina o diésel.

En algunos casos disponen de sistemas de frenado regenerativo, que permiten recuperar parte de la energía cinética propia del movimiento del vehículo durante la frenada, pudiendo suponer hasta un 30% de la energía consumida.

1.1.7. Híbridos Eléctricos: Diésel-eléctrico y GNC-eléctrico

Los vehículos híbridos poseen, además del motor de combustión interna, un motor eléctrico (en serie o en paralelo). El funcionamiento de estos vehículos se basa en el manejo eficiente de las energías mecánicas y eléctricas en el sistema de propulsión, conjugando un motor térmico, un motor eléctrico, un generador eléctrico y un sistema de acumulación de electricidad (baterías). Muchos de ellos también están provistos de frenos regenerativos.

La propulsión de las ruedas es accionada tanto por el motor térmico como por el eléctrico, simultáneamente o no según las necesidades. En las paradas del vehículo se detiene el motor térmico, en los arranques y aceleracio-

nes el motor eléctrico ayuda al térmico y en las frenadas y retenciones el generador eléctrico recarga las baterías. Normalmente el motor térmico es un motor Otto o Atkinson, que puede ser diésel o de gas natural.

El funcionamiento del vehículo es el mismo independientemente del combustible utilizado, la variación del uso

	Ventajas	Inconvenientes
Diésel	Tecnología confiable y durable. Menor precio combustible. Menor coste adquisición vehículo.	Deterioro de la calidad del aire por elevadas emisiones de NO_x y PM.
Biodiésel	Reducción de contaminantes (gaseosos y partículas), según proporción de biodiésel en la mezcla. Producto biodegradable. Mayor seguridad en el almacenamiento (punto de inflamación mayor). Alarga vida del motor. Reciclaje aceite usado. Menor coste de adquisición vehículo (similar al diésel).	Menor potencia vehículo. Mayor consumo que diésel. Problemas a bajas temperaturas. Necesidad de adaptación de algunos motores convencionales. Inversión en las instalaciones de suministro.
Bioetanol	100% biodegradable (siempre conforme a la proporción en que se utilice). Menor contenido de azufre y metales pesados. Menores emisiones, hasta un 30% menos de CO_2 con proporción del 85%. Mejora las prestaciones del motor y aumenta el rendimiento. Potencial ahorro de 36% de energía fósil.	Producción más cara que el procedente del crudo. Poder calorífico más bajo (incrementa un 70% el consumo). Agresivo para algunos plásticos. Irritante en piel y mucosas. Necesidad de modificar el motor para mezclas superiores al 10%.
GNC	Reducciones importantes de todas las emisiones. Menor ruido. Accesibilidad y comodidad en el suministro (red de gas).	Necesidad de infraestructura de repostaje. Mayor coste de adquisición vehículo. Menor autonomía. Mayor dificultad en distribución y almacenamiento. Mayor tiempo de llenado.
GLP	Rendimiento y potencia de los vehículos similares a sus equivalentes en gasolina. Fiabilidad técnica similar al motor diésel. Reducción de emisiones contaminantes. Reducción de niveles de ruido hasta un 50%. No contiene azufre ni plomo ni partículas.	Mayor coste del combustible. Mayor peso de los vehículos. Menor autonomía que vehículos diésel, sólo apto para servicio urbano. Necesidad de infraestructura de suministro, almacenamiento, bombeo y equipos surtidores.
Eléctrico	No requiere combustible. Cero emisiones en el punto de uso. Mínimo ruido y mayor confortabilidad (vibraciones mínimas). No consume energía cuando se encuentra parado (paradas, semáforos, atascos). Freno regenerativo. Bajos costes de mantenimiento. Menores gastos de funcionamiento.	Coste de adquisición de vehículo. Autonomía limitada (unos 120 Km entre operaciones de recarga). Carga lenta. Velocidad máxima de 50 Km/h. Problemas de potencia en rampas pronunciadas. Baterías grandes y pesadas. Reciclaje de las baterías. Vida de las baterías limitada (de 2 a 3 años).
Híbridos	Menores emisiones que motores convencionales. Buenas prestaciones de velocidad (similares a vehículos convencionales). Aceleración potente y regular. Menor ruido (un 30% menos). Menores costes de mantenimiento y funcionamiento. Alcance del combustible un 25-50% mayor. Mayor autonomía que eléctrico (hasta 500 Km al recargar las baterías mediante el motor Diésel/GNC). Freno regenerativo.	Coste adquisición vehículo. Escasa oferta de vehículos en el mercado. Consumo adicional de energía. Posibles problemas de potencia en rampas pronunciadas. Baterías pesadas. Reciclaje de las baterías. Si es de GNC, necesidad de infraestructura.
Pila Hidrógeno	Impacto ambiental en marcha nulo (sólo emite vapor de agua). Buen rendimiento. Muy silencioso. Buena autonomía (unos 300 Km con velocidad máxima de 80 Km/h). Supera pendientes de hasta el 8%. Reducción peso batería. Materia prima ilimitada para producción de H_2.	Alto coste aplicación y mantenimiento. Necesidad de estación de repostaje para producción y/o almacenamiento de H_2, así como compresión y carga. Necesidad de optimizar producción de H_2. Emisiones de CO_2, si no se utilizan energías renovables en la producción de H_2.

Tabla 1: Resumen de características de los combustibles

		Barcelona			Madrid			Málaga			Valencia		
		2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Diésel		670	548	439							44		
Biodiésel	B10										361	44	
	B20				1.610	1.419	1.291	187	186	186		361	405
	B30	120	120	120									
Bioetanol	E95				5	5							
GNC		295	375	410	465	651	688	4	4	4	75	75	75
Eléctrico					20	20	20	1	1	1			
Híbrido	Diésel-eléctrico	4	20	90									
	GNC-eléctrico	1	1	1			7						
Total flota		1.090	1.064	1.060	2.100	2.095	2.006	192	191	191	480	480	480

Tabla 2: Evolución de las flotas de autobuses urbanos según tecnología y combustible (2010-2012)

de Gas Natural viene dada en términos económicos, de consumo, de contaminación y de ruido.

Los vehículos híbridos son capaces de reducir las emisiones de CO_2 en un 30% respecto a los diésel. En cuanto a las otras emisiones reguladas (CO, HC, NO_x y partículas), los vehículos híbridos son muy atractivos para su empleo en el espacio urbano por su reducción potencial de la contaminación.

1.1.8. Hidrógeno: tecnología de celdas

El funcionamiento de los vehículos con pila de combustible de H_2 se basa en la combinación de dicho combustible con el oxígeno, generando electricidad. Únicamente emiten a la atmósfera vapor de agua, lo que implica grandes beneficios medioambientales.

Sin embargo, aunque el H_2 se encuentra presente en todo organismo viviente, rara vez aparece en estado libre, por lo que hay que extraerlo y este proceso de extracción del H_2 genera emisiones contaminantes. Este proceso puede realizarse a través de diversas tecnologías, como la electrolisis del agua, el reformado de hidrocarburos, la gasificación de biomasa y de hidrocarburos y otras tecnologías aún no desarrolladas. A día de hoy, la de electrolisis del agua a partir de electricidad generada mediante fuentes renovables es la única tecnología sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

A partir de lo expuesto y de la consulta directa a los operadores de transporte público urbano de ciudades españolas con importante flota de autobuses se llevó a cabo una comparativa de las ventajas e inconvenientes de cada una de las tecnologías planteadas y se analizaron las experiencias de estos operadores en el uso de los distintos sistemas de propulsión.

2. RESULTADOS

2.1. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS Y COMBUSTIBLES DE LAS FLOTAS DE AUTOBUSES URBANOS

El análisis sobre las flotas de autobuses se ha realizado comparando las experiencias de Barcelona, Madrid, Málaga y Valencia.

En primer lugar se describe la composición actual de la flota de cada una de las ciudades, según tipo de combustible y su experiencia con la tecnología utilizada.

En la Tabla 2, se observa en el conjunto de las ciudades estudiadas un claro predominio de los autobuses que utilizan biodiésel, seguidos de los que utilizan GNC con tendencia creciente y en último lugar los vehículos diésel que progresivamente van siendo sustituidos. En menor proporción se encuentran autobuses híbridos y eléctricos. Ninguna de las ciudades consultadas posee autobuses de GLP ni de pila de hidrógeno.

La Fig.1 representa el porcentaje de autobuses respecto al total de la flota en función de la tecnología y combustible utilizado.

Respecto a la experiencia con los distintos combustibles, Barcelona aún posee un porcentaje importante de autobuses diésel aunque se han empezado a incorporar filtros de alto rendimiento para reducir las emisiones de óxidos de

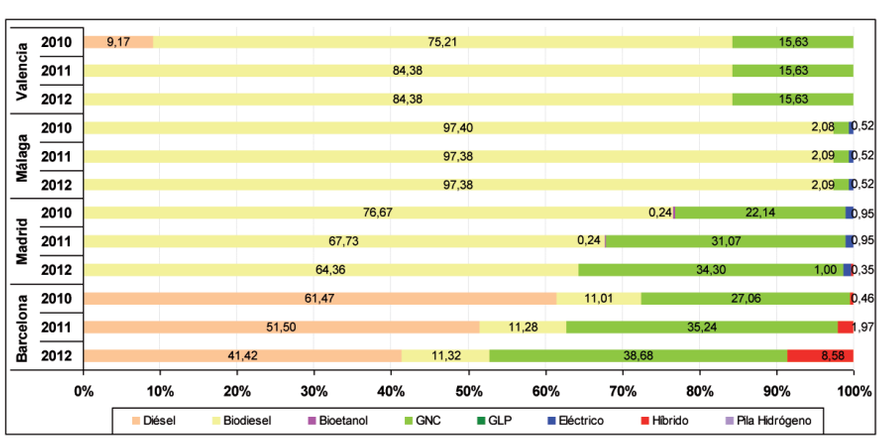

Fig. 1: Evolución de la distribución de las flotas según tecnología y combustible

nitrógeno y partículas en suspensión con calificación Euro I-II-III (anteriores a 2005).

En el uso del biodiésel destaca Málaga, donde más del 97% de la flota lo utiliza. En el otro extremo se encuentra Barcelona, con el 11% de su flota. Las mezclas de biodiésel son diversas: en Barcelona es B30, en Madrid y Málaga B20, y en Valencia han pasado de utilizar B10 en 2010 a B20 en 2012.

Tan sólo Madrid contaba con autobuses de bioetanol en 2010 y 2011 aunque su presencia en la flota era minoritaria, 0,24%. Estos autobuses eran fruto del proyecto BEST (Bioethanol for Sustainable Transport), la mezcla se componía de 95% bioetanol puro y 5% producto desnaturalizante, los autobuses utilizados eran de motor ciclo diésel con algunas modificaciones. No obstante, en 2012 dejan de funcionar debido a que no eran económicamente rentables.

Los autobuses de GNC también se encuentran presentes en todas las ciudades, siendo en Barcelona donde más se utilizan. En Málaga el uso de estos autobuses es sólo del 2%.

En relación a los autobuses de GLP no se han utilizado en ninguna de las ciudades consultadas.

Actualmente, Madrid y Málaga cuentan con microbuses eléctricos en sus flotas. En Madrid empezaron a introducirse a finales de 2007 cuando adquirieron 20 unidades por las vías del centro histórico y más adelante se quiere dotar así de líneas pequeñas a barrios con calles muy estrechas donde no cabrían otros vehículos. Málaga posee un microbús eléctrico con el que se han realizado dos experiencias piloto, en diciembre de 2008 se puso en servicio la línea "Centro" que recorría las calles del casco antiguo de la ciudad con el objeto de incentivar las compras en el periodo navideño, dejando de funcionar el servicio en enero de 2009. De dicha experiencia, y a través de la consulta a los comerciantes de la zona para conocer sus necesidades, se volvió a poner en marcha a finales de 2009 con un nuevo recorrido adaptado hasta enero de 2010, en el que deja de utilizarse principalmente por criterios económicos.

Barcelona dispone de autobuses híbridos y además participa en varios proyectos para el impulso de estos vehículos, como el Proyecto Retrofit, que plantea la hibridación del motor diésel.

***Microbús de 7m de longitud y capacidad para 30 pasajeros. Incluye coste de la batería (50.000€)**

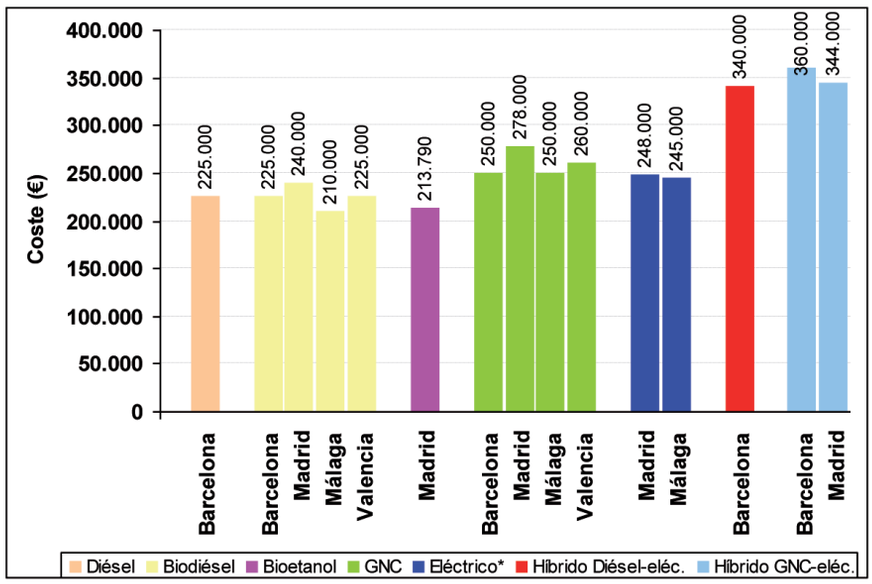

Fig. 2: Coste de los autobuses según tecnología y combustible

En Madrid en junio de 2012 se han puesto en servicio 7 unidades. En Málaga, en septiembre de 2011 con motivo de la Semana Europea de la Movilidad se realizó una prueba piloto con dos autobuses híbridos, Volvo y Castrosua, para comprobar su comportamiento en servicio urbano. En términos de funcionamiento presentaron resultados muy positivos, similares a los autobuses convencionales, sin embargo, desde el punto de vista económico, aunque los costes de explotación fueron un 15% menores que los diésel, tienen mayor coste de adquisición y de mantenimiento, sobre todo por la necesidad de sustitución de las baterías, lo que supone un sobrecoste de alrededor de 40.000 € cada 5 años.

No se han encontrado autobuses de pila de hidrógeno en las ciudades estudiadas, aunque en Madrid y Barcelona se realizaron algunas experiencias piloto con autobuses de hidrógeno dentro del Proyecto HyFleet CUTE (Clean Urban Transport for Europe) de la Unión Europea. Este proyecto, con siete años de duración y cerrado definitivamente en 2009, hizo el seguimiento y demostración de la viabilidad de la operación de 47 autobuses propulsados por hidrógeno (33 de pila de combustible y

***Microbús de 7m de longitud y capacidad para 30 pasajeros.**

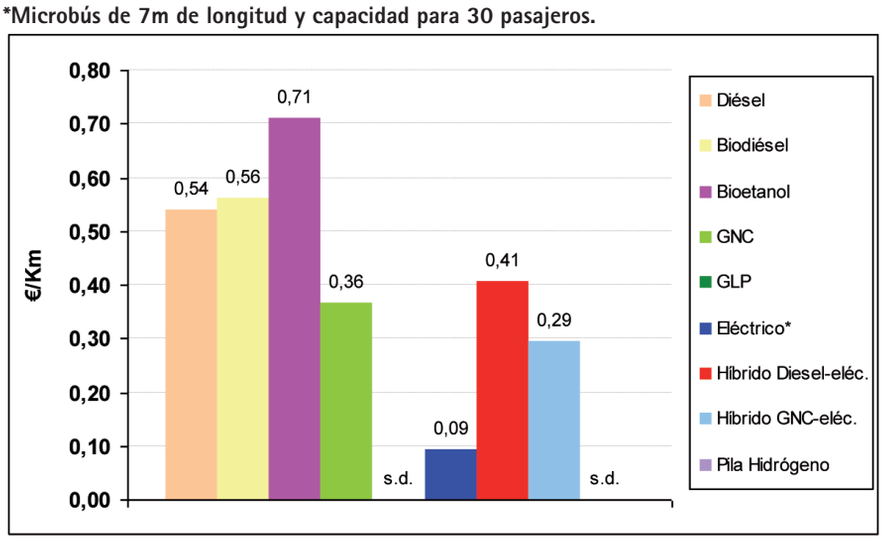

Fig. 3: Coste del combustible o energía equivalente/Km

		Barcelona			Madrid			Málaga			Valencia		
		CO_2	NO_x	PM	CO_2	NO_x	PM	CO_2	NO_x	PM	CO_2	NO_x	PM
Diésel		47,000	0,220	0,002									
Biodiésel	B10										265,000	s.d.	s.d.
	B20				47,247	0,320	0,007	136,000	13,000	0,200	260,000	s.d.	s.d.
	B30	48,000	0,230	0,002									
Bioetanol	E95				53,567	0,340	0,010						
GNC		55,000	0,017	0,001	46,600	0,047	0,000	124,000	5,000	0,050	215,000	s.d.	s.d.
Eléctrico					0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
Híbrido	Diésel-eléctrico	35,000	0,165	0,002									
	GNC-eléctrico	38,500	0,012	0,001									

Tabla 3: Emisiones de CO2, NOx y PM según el combustible y tecnología utilizados

14 de motor de combustión interna) en el servicio regular de transporte público en 10 ciudades de tres continentes. Tanto Madrid como Barcelona participaron con la puesta en servicio durante tres años de tres autobuses accionados por pila de hidrógeno en cada ciudad operando en líneas regulares. Además Madrid también participó anteriormente, en 2003, en otra iniciativa europea denominada City Cell y liderada por IVECO en la que dispuso de un primer autobús propulsado por hidrógeno, pero mientras en el proyecto CUTE toda la energía era suministrada por la pila de combustible en el City Cell sólo proporcionaba un tercio. Las experiencias con estos autobuses en general arrojaron unos resultados positivos en términos de funcionamiento, no obstante, económicamente no resultaron viables debido al requerimiento de infraestructuras específicas para la producción y suministro del hidrógeno y al alto coste de adquisición de los vehículos.

En cuanto a los costes de los autobuses según los distintos sistemas de propulsión y combustibles utilizados en las ciudades anteriores, ver Fig. (2), hay que tener en cuenta que el tamaño de los autobuses considerados ha sido estándar (de 8-12 m de longitud y con capacidad para 70-120 pasajeros) a excepción del eléctrico que se trata de un microbús, por no ser viable un vehículo más grande y pesado actualmente con tal tecnología.

Según los datos proporcionados, el vehículo más económico es el que utiliza bioetanol, unos 213.790 €, esto es así debido a que se considera un motor de combustión convencional. Le siguen los que utilizan diésel o biodiésel, con 225.000 € de media. El vehículo eléctrico sube a 246.500 €, a continuación el de GNC con 259.500 € y los híbridos diésel-eléctrico en 340.000 € y GNC-eléctrico en 352.000 €. Las ciudades consultadas no poseen vehículos GLP ni propulsados mediante pila de hidrógeno, no obstante sus costes se estiman en 300.000 y 600.000 €, respectivamente.

Los precios aportados son los actuales según las operadoras de transporte. Lógicamente variarán con el paso del tiempo cuando maduren ciertas tecnologías y se produzca a gran escala.

Atendiendo al coste del combustible o energía equivalente por Km. según la tecnología del motor, ver Fig. (3), destaca que el autobús más económico de adquirir (bioetanol) tiene mayor coste de funcionamiento, ya que además de ser más caro el combustible tiene también mayor consumo, mientras que el más económico es el eléctrico. Los autobuses con sistema de propulsión híbrido tienen costes de funcionamiento menores que los convencionales aunque su adquisición es más cara. En general, a mayor coste de adquisición menores costes de funcionamiento, sin embargo cabe esperar que a medida que maduren las nuevas tecnologías se reduzcan los precios de adquisición por la mayor escala de producción.

Desde una perspectiva medioambiental, la Tabla 3 recoge las emisiones de CO_2, NO_x y PM en g./pasajero Km. según el combustible y tecnología utilizados. Aunque las emisiones de CO_2 en el punto de uso del motor con biodiésel son mayores que con diésel, considerando el ciclo de vida completo del biodiésel, desde su cultivo hasta su uso, las emisiones son prácticamente nulas ya que se compensan. También hay que tener en cuenta que la ocupación media por Km. del autobús y los litros consumidos por cada Km. varían de una ciudad a otra, de ahí las diferencias existentes entre las emisiones un mismo combustible.

3. COMENTARIOS

Como hemos visto, existe un amplio abanico de alternativas de tecnologías de vehículos y combustibles capaces de reducir la dependencia del petróleo y los problemas medioambientales derivados de su consumo. La elección de una u otra depende principalmente del estado de desarrollo de la tecnología y de las condiciones específicas que se requieran de movilidad. En particular, deben evaluarse aspectos como el flujo de pasajeros, la disponibilidad del combustible y volatilidad del precio, el costo del vehículo, mantenimiento, fiabilidad, las políticas gubernamentales y el impacto ambiental.

En numerosos casos, la elección del tipo de vehículo viene marcada por las limitaciones de las tecnologías existentes para un determinado servicio de transporte. Es el caso del vehículo eléctrico puro, que sólo es viable para tra-

yectos cortos principalmente por razones de autonomía y peso de las baterías. La electrificación completa de vehículos mayores con la tecnología actual es prácticamente inviable. Es por ello que las ciudades están avanzando hacia la tecnología híbrida como solución intermedia a corto y medio plazo.

En referencia al costo de las distintas tecnologías, aunque el autobús más económico es el que utiliza bioetanol, por poder utilizarse con motor convencional para porcentajes inferiores al 10%, la producción es más cara que la de los combustibles procedentes del crudo y también es mayor su consumo por su menor poder calorífico, lo que hace que las ciudades no estén apostando por esta tecnología. En GLP y GNC, ante el mismo precio del vehículo, las ciudades prefieren los autobuses de GNC por sus mejores resultados de funcionamiento. El alto coste de los autobuses de hidrógeno junto con todos los obstáculos que presentan a día de hoy debido a su bajo nivel de desarrollo, hacen que no sea una opción actualmente. Pese a que el alto coste de adquisición de ciertos vehículos sea una de las grandes barreras para la diversificación sostenible de las flotas de autobuses, hay que tener en cuenta que en muchos casos presentan menores gastos de funcionamiento que los autobuses convencionales con motor de combustión interna y también la existencia en algunos casos de incentivos para fomentar el uso de tecnologías limpias.

Todas las ciudades analizadas, en su evolución hacia una movilidad más sostenible, están trasformando sus flotas de autobuses mediante la introducción de vehículos con combustibles alternativos al tradicional gasóleo. Las tecnologías preferidas a día de hoy son el biodiésel y el GNC debido a su elevada fiabilidad por ser tecnologías maduras y a su rentabilidad económica. La tecnología híbrida se está introduciendo y se apuesta por ella como la mejor alternativa a corto y medio plazo. Destacar que todas ellas han participado o están inmersas en proyectos de investigación en este ámbito, obteniendo resultados bastante positivos en su experiencia con el uso de autobuses eléctricos e incluso de hidrógeno, lo que hace tener esperanza en su potencial.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos realizados forman parte de la aportación de la Cátedra de Gestión del Transporte de la Universidad de Málaga al Proyecto *E-Mobility Accelerator*, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y encuadrado en el Programa Interregional POWER *Low Carbon Economies* (INTERREG IVC).

A Transports Metropolitans de Barcelona, a la Empresa Municipal de Transportes de Madrid, a la Empresa Municipal de Transportes de Valencia por proporcionar los datos necesarios para llevar a cabo este trabajo y, en particular, a la Empresa Malagueña de Transportes por su continua colaboración.

PARA SABER MÁS

- ATUC/IDAE. Gestión Eficiente del Transporte Colectivo: Guía Técnica. Madrid: ATUC, 2009. ISBN: 978-84-613-4065-1
- Contreras V. "Los autobuses del futuro" [en línea]. Diario Sur. 25 septiembre 2011. http://www.diariosur.es/v/20110925/malaga/autobuses-futuro-20110925.html [consulta: 24 octubre 2011].
- EMTMADRID. Informe anual 2010: Un enfoque desde la responsabilidad social corporativa. Madrid: EMTMADRID, 2011.
- Ente Vasco de la Energía. "Biocombustibles: una alternativa sostenible" DYNA Ingeniería e Industria. Noviembre 2004. Vol. 79-8 p.73-76
- IDAE. Combustibles y vehículos alternativos: Combustibles y nuevas tecnologías de vehículos que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes. Madrid: IDAE, 2005.
- López-Martínez J, Jiménez-Alonso F. "Requerimientos energéticos de los vehículos híbridos de transporte urbano de alto tonelaje" DYNA. Abril 2011. Vol. 86-2 p.182-189. http://dx.doi.org/10.6036/3875
- Maeso-González E, González Sánchez G. "Soluciones Sostenibles para el Transporte Público Urbano en Autobús". En: Jornadas Técnicas Greencities, (Málaga, 6-8 octubre 2011), [S.l.]: [s.n.], 2011.
- Terrón J A. "El punto de vista del gestor de transporte público: Vehículos eléctricos e híbridos" [en línea]. Seminario de Gestión Ambiental: El coche eléctrico, (Valladolid, 9 de junio de 2010), [S.l.]: [s.n.], 2010. http://www.fundacionGasNaturalFenosa.org/SiteCollectionDocuments/Actividades/Seminarios/VALLADOLID%202010%2006%2009/5_Juan%20Angel%20Terron.pdf [consulta: 31 octubre 2011].
- Tricas A. "La acción de la Comisión en el área de la movilidad urbana y en el transporte limpio". En: Primeras Jornadas sobre Avances en el Transporte de Carga en Área Urbana, (Santander, 6-7 de abril de 2011),[S.l.]: [s.n.], 2011.
- TUSSAM. Proyecto de Microbuses Eléctricos [en línea]. Sevilla: TUSSAM, s.d. [ref. 26 octubre 2011]. Disponible en Web: http://www.tussam.es/index.php?id=158

DYNA Ingeniería e Industria

PROMOCIÓN: Suscripción a DYNA por 29,70 €/año

Reciba la revista dyna impresa en su domicilio por solo 29,70 €/año

La revista DYNA ha llegado a un acuerdo de colaboración con algunos Colegios de Ingenieros Industriales para ofrecer a sus colegiados la revista impresa con un 35% de descuento.

Promoción válida para los Ingenieros Industriales colegiados en:

Araba, Asturias, León, Bizkaia, Burgos y Palencia, Canarias, Cantabria, Extremadura, Galicia y Murcia.

Si está interesado, envíe un email a **dyna@revistadyna.com** mencionando que se acoge a la promoción e indicando su nº de colegiado y el nombre de su Colegio de Ingenieros Industriales.