

LA PILA DE COMBUSTIBLE EN LOS VEHÍCULOS AUTOMÓVILES: UN RETO TECNOLÓGICO

Recientemente se viene observando cómo la pila de combustible se está posicionando como una candidata firme para la propulsión de los vehículos automóviles de las próximas generaciones. La contaminación atmosférica, tanto global como local, está presionando cada vez más en los diseños actuales de los motores de combustión interna alternativos (MCIA), obligando a los fabricantes a encontrar soluciones tecnológicas encaminadas a la reducción del consumo y de las emisiones de los vehículos automóviles. Por otro lado, la fuente de energía que se emplea para la propulsión de los vehículos actuales no es renovable, sus reservas son limitadas y, además, produce CO_2 como producto de la combustión. Con este panorama, ¿por qué la pila de combustible se presenta como una alternativa a los MCIA?



José Mª López Martínez
Profesor Titular de motores Térmicos.
Doctor Ingeniero Industrial.
Director de la División
de Homologaciones y Ensayos del INSIA.

AUTOMOTIVE FUEL CELLS: A TECHNOLOGICAL CHALLENGE

Recently it takes a serious look at fuel cell vehicles, a leading candidate for next-generation vehicle propulsion systems. The green house effect and air quality are pressing to the designers of internal combustion engine vehicles, owing to the manufacturers to find out technological solutions in order to increase the efficiency and reduce emissions from the vehicles. On the other hand, energy source used by currently propulsion systems is not renewable, the well are limited and produce CO_2 as a product from the combustion process. In that situation, why fuel cell is an alternative of internal combustion engine?

INTRODUCCIÓN

La tendencia global del incremento del transporte por carretera va en contradicción con los criterios de control del efecto invernadero, la contaminación local y la explotación de los recursos de combustible. La sostenibilidad del sector transporte dependerá fuertemente de la introducción de tecnologías que reduzcan las emisiones contaminante y el consumo de petróleo.

El objetivo de la Comisión Europea es lograr que las emisiones medias de dióxido de carbono de los vehículos nuevos se sitúen en 120 gramos por kilómetro en el año 2005, o, a más tardar, en 2010. Los tres instrumentos principales para la consecución de dicho objetivo son: compromisos de la industria del automóvil, etiquetado de los vehículos e instrumentos fiscales (Comisión Europea, 2000).

En cuanto a los compromisos de reducción de consumo adquiridos por las industrias europea, japonesa y coreana, el objetivo es lograr unas emisiones medias de los vehículos nuevos de 140 g/km en el año 2008, en el caso de ACEA, y en 2009, en el caso de JAMA y KAMA. Como parte de este compromiso se establece un punto de

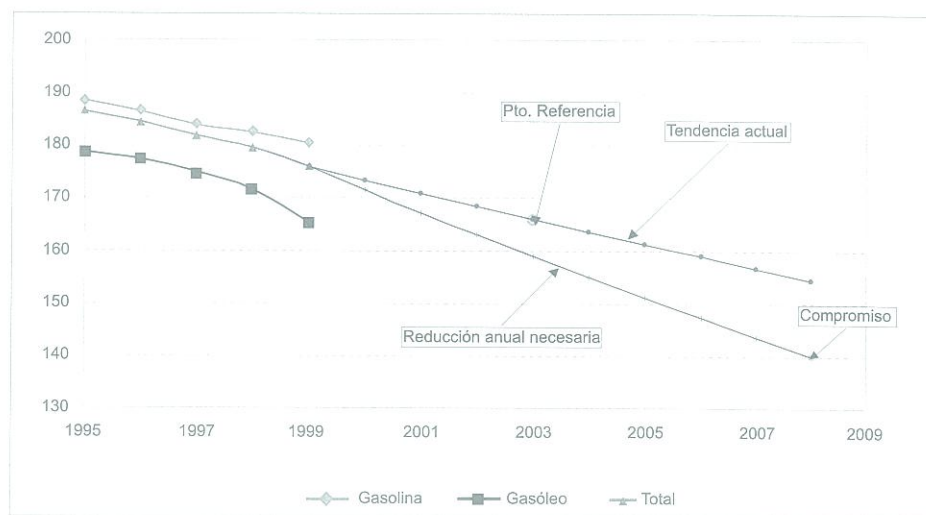


Figura 1.- Emisiones medias de los turismos nuevos en la Unión Europea (gCO₂/km).
Fuente: Comisión Europea (2000)

referencia intermedio, de forma que las emisiones medias deben ser, en el caso de ACEA, 165-170 g/km en el año 2003, en el caso de JAMA, 165-175 g/km en 2003, y en el caso de KAMA, 165-170 g/km en 2004.

El compromiso de reducción de consumo va acompañado de un seguimiento anual de las emisiones de los

vehículos vendidos en la Unión Europea por los fabricantes adheridos a las tres Asociaciones. La figura 1 muestra las cifras del periodo 1995-99, junto con la tendencia actual y la tendencia que sería necesaria para llegar al valor del compromiso (basadas en un tanto por ciento de reducción anual constante).

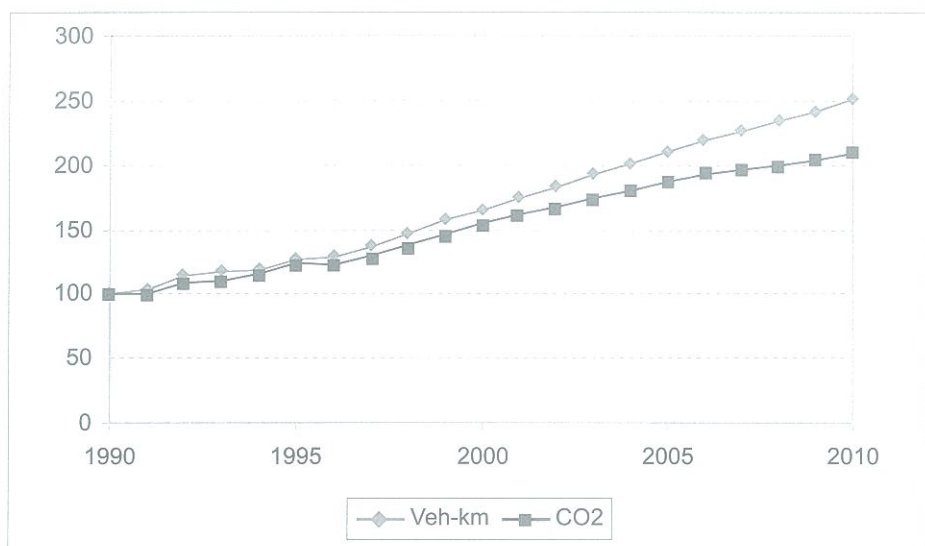


Figura 2.- Tráfico y emisiones de dióxido de carbono del transporte por carretera en España (1990=100). Fuente: Aparicio y otros (2002).

Para cumplir el compromiso adquirido, los fabricantes deberán recurrir tanto a medidas tecnológicas como a cambios en las tendencias del mercado, por ejemplo, orientación hacia la venta de vehículos de menor tamaño y cilindrada.

Un aspecto importante en la reducción del consumo medio de los vehículos nuevos puede ser la generaliza-

ción de los motores de gasolina de inyección directa, tecnología que permitirá reducir el consumo medio hasta en un 20% (Kwon y otros, 1999). Para ello se deberá reducir el contenido de azufre de las gasolinas que se comercializan en nuestro continente. La industria considera esta reducción imprescindible para lograr el objetivo global de reducir el consumo de combustible y las

emisiones de óxidos de nitrógeno de los nuevos vehículos, objetivos en ocasiones contrapuestos.

El escenario tendencial del proyecto SETISMO tuvo en cuenta el compromiso adquirido por la industria automovilística respecto a las emisiones de dióxido de carbono de los turismos. La figura 2 presenta la evolución prevista de los kilómetros recorridos por el conjunto del parque español de vehículos y las emisiones de dióxido de carbono.

Las emisiones de CO₂ van a aumentar a un ritmo inferior al de crecimiento de la movilidad, gracias a la mejora de la eficiencia energética. Frente a un incremento de los vehículos-kilómetro de un 53% en dicho periodo, el aumento de emisiones sería de un 35%, es decir, inferior en casi veinte puntos porcentuales. Por otra parte, este crecimiento del 35% debe compararse con el correspondiente al periodo 1990-2000, un 55%; esta comparación pone de manifiesto que, de cara al cumplimiento del Protocolo de Kyoto (y teniendo en cuenta que este es un compromiso global que se refiere a la totalidad de las fuentes emisoras), el eventual no cumplimiento por parte del transporte se debería más a su evolución a lo largo de la década pasada que a su crecimiento previsible en 2000-2010.

Después de más de cien años de investigación, las perspectivas de un mayor grado de optimización de los MCIAs son limitadas a pesar de los enormes y continuos esfuerzos de la industria automovilística. La pila de combustible ofrece un nuevo punto de partida, con un elevado rendimiento energético y bajas emisiones (emisiones cero en el punto de uso), la posibilidad de utilizar varias fuentes de energía y el potencial de alcanzar niveles de coste de mercado.

ALREDEDOR DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma la energía química, asociada a la materia (combustible), directamente en energía eléctrica (corriente continua). Una pila de combustible elemental (celda elemental) consiste en dos electrodos porosos, ánodo y cátodo, y el electrolito (ver figura 3). Las celdas elementales se conectan en serie a través de placas separadoras (placas bipolares) para formar la pila (stack).

A diferencia de la batería, que es un dispositivo de almacenamiento de energía (su máxima energía disponible depende de la cantidad de reactivos

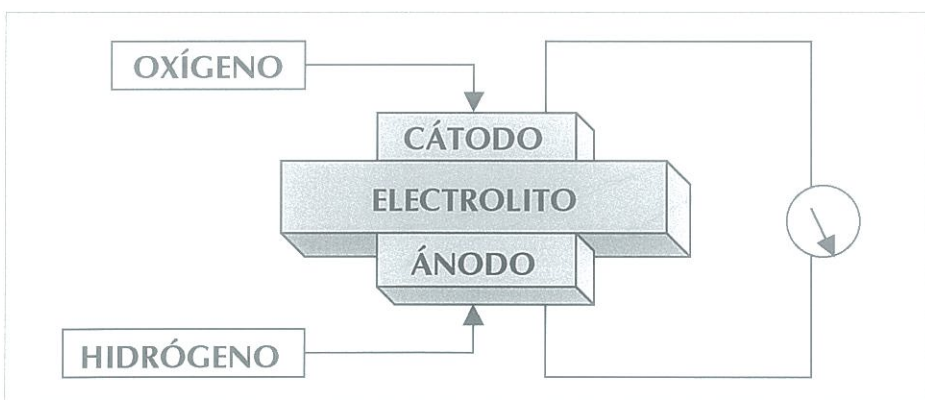
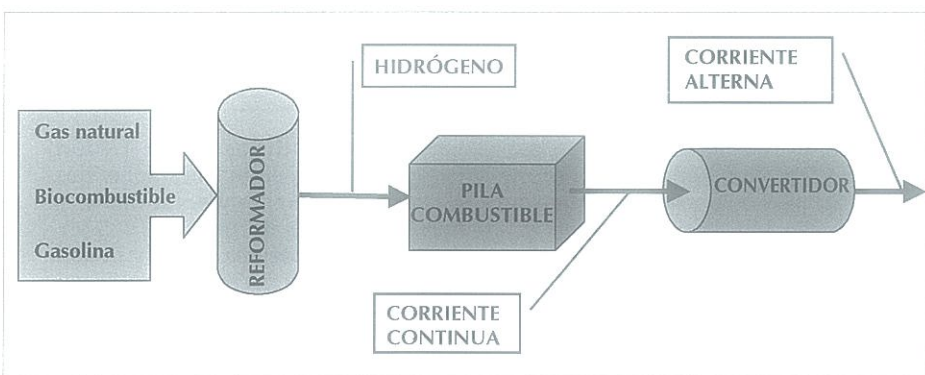


Figura 3.- Pila de combustible elemental.

Figura 4.- Esquema simplificado de un sistema propulsor con pila de combustible.



químicos almacenados en su interior y, por tanto, cesará de producir energía cuando estos se agoten), la pila de combustible tiene capacidad de generar energía siempre que se le suministre combustible y oxidante a la misma.

El sistema propulsor basado en la pila de combustible está constituido básicamente por (ver figura 4):

- Procesador de Combustible (reformador)
- Generador de Potencia (pila de combustible)
- Acondicionador de Potencia (convertidor)

En el procesador de combustible tiene lugar un proceso de reforming en el que el combustible suministrado (gas natural, metanol, biocombustibles, gasolina reformulada, etc.) se convierte en un gas rico en hidrógeno que alimenta el ánodo. En el generador de potencia se convierte la energía química en corriente continua. La potencia generada depende del área y número de celdas conectadas en serie (stack). El acondicionador de potencia regula la tensión de la corriente continua y convierte la corriente continua en corriente alterna.

Los dos tipos de pila de combustible que se perfilan como mejores candidatas para su aplicación en el automóvil son la pila de electrolito polimérico (PEMFC) y la pila de óxido sólido (SOFC). Esta última como sistema auxiliar de potencia, mientras que la primera, la PEMFC, como sistema propulsor, principalmente, y también como sistema auxiliar de potencia.

Las reacciones electroquímicas típicas que ocurren se presentan en la tabla 1.

Tabla 1

TIPO	REACCIÓN ANÓDICA	REACCIÓN CATÓDICA
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2 e^-$ $CH_4 + 4 O^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 8 e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$

En el ánodo tiene lugar la oxidación del combustible produciéndose los electrones que fluyen a través de las placas bipolares, mientras que los iones pasan a través del electrolito al electrodo opuesto. Mientras que en el cátodo tiene lugar la reducción del oxígeno consumiéndose los electrones procedentes del ánodo. En las pilas de baja temperatura, PEMFC, los iones protones son los principales transportadores de carga en el electrolito, mien-

Tabla 2						
	I+D		DEMOSTRACIÓN		ENTRADA MERCADO	PENETRACIÓN MERCADO
	COMPONENTE	PROTOTIPO INICIAL	PROTOTIPO REDEFINIDO	PROTOTIPO COMERCIAL		
PEMFC _{H2}				2004/05	2007/09	2010/...
PEMFC _{Metanol}			2003/04	2006/07	2008/10	2010/...
PEMFC _{Gasolina}			2004/05	2007/08	2008/10	2010/...
SOFC _{Gasolina}						
 Situación actual Fuente: Arthur D. Little (2002)						

tras que, en las pilas de alta temperatura, SOFC, los iones oxígeno son los transportadores de carga.

PEMFC: La pila PEMFC se caracteriza por tener como electrolito una matriz polimérica conductora de protones. La membrana debe tener una alta conductividad protónica, estabilidad química y debe ser impermeable a los gases de reacción. El material que mejor cumple estas condiciones es el Nafion (polímero perfluorinado con cadenas laterales terminadas en ácido sulfónico y perfluorosulfónico). El espesor típico está entre 50 y 175 µm. Trabaja a baja temperatura (40 – 80 °C) y debe estar humidificada para su correcto funcionamiento. Esta baja temperatura hace del catalizador un elemento muy sensible al CO y al azufre. Estas exigencias hacen que el combustible empleado sea hidrógeno puro o se tenga que utilizar un reformador que genere hidrógeno humidificado de aceptable calidad. El hidrógeno ni está ampliamente disponible ni conviene inherentemente almacenarlo a bordo, por otro lado los reformadores añaden peso y coste al sistema. Aunque los reformadores de metanol son algo más simples que los de gasolina, el incremento en complejidad del sistema, comparado

temperaturas (600 - 850 °C) para alcanzar una conductividad adecuada. Esta alta temperatura de funcionamiento conlleva considerables retos en el diseño termomecánico y desarrollo de materiales tanto como en la gestión térmica. Sin embargo presenta la ventaja de admitir cualquier tipo de combustible directamente en la pila, incluyendo hidrógeno, monóxido de carbono y metano. El elemento básico, celda, es siempre el mismo en todas las configuraciones. Consiste en una capa de electrolito sólido entre dos electrodos porosos uno de aire para el oxidante y el otro para el combustible, y una cuarta capa de interconexión que transporta los electrones desde el combustible hasta el electrodo del aire, y que conecta en serie las celdas. Hay tres configuraciones geométricas que se han desarrollado en stack: tubular, plan y monolítica. Actualmente, sólo los diseños de las configuraciones tubular y plana se están investigando.

ESTADO ACTUAL DE DESARROLLO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

En los últimos diez años las densidades de potencia de las tecnologías PEMFC y SOFC han mejorado para exceder de los 500 mW/cm² bajo condiciones normales de operación en aplicaciones automovilísticas, con puntas de densidades bajo condiciones ideales de más de 1.000 mW/cm². Tal densidad de potencia se traduce en una potencia específica alta de 1 kW/l para la PEM. La pila de óxido sólido tiene menor potencia específica debido a su mayor espesor de las interconexiones y a su mayor volumen del sistema de aislamiento requerido para soportar la alta temperatura de operación. Sin embargo, los sistemas de pila de combustible están todavía en una etapa de desarrollo según se especifica en la tabla 2.

En estos últimos años se han construido varios prototipos de pila de combustible para aplicaciones de vehículos automóviles. Mientras que estos vehículos han demostrado experiencias

con la utilización directa del hidrógeno, es todavía sustancial. Con las pilas de metanol directo (DM) se eliminan los reformadores así como los dispositivos de almacenamiento a bordo de hidrógeno, aunque por el momento están en una etapa de desarrollo muy preliminar.

SOFC: Aunque conceptualmente el diseño del sistema SOFC considerado para aplicaciones automovilísticas es similar al de la PEMFC, sus condiciones operativas son considerablemente diferentes. Los electrolitos cerámicos de estas pilas deben funcionar a altas

aceptables en la integración pila – vehículo y en el funcionamiento, estos apenas son comercialmente viables. Dichos sistemas requieren demasiado espacio, son muy pesados y la vida y fiabilidad son todavía cuestionables. A continuación se exponen algunos aspectos de su naturaleza constructiva y operativa:

Elección del combustible

Los actuales prototipos utilizan hidrógeno como combustible, bien comprimido o líquido. Unos pocos utilizan metanol. Debido a la menor simplicidad de los sistemas que trabajan con hidrógeno, estos vehículos conllevan menos riesgos y, por tanto, se están desarrollando mejor. Mientras que los desafíos del reformado son buenos, la elección de combustibles líquidos facilitan los aspectos de infraestructura y de comercialización de los vehículos con pila.

Presión de operación

Los prototipos trabajan con pilas presurizadas. En principio esto ayuda a la cinética de reducción del oxígeno en el cátodo y podría conducir a una mayor densidad de potencia. Sin embargo, otros factores del sistema pueden contrarrestar este, al menos parcialmente.

Peso del vehículo

La mayoría de los vehículos con pila de combustible pesan más que los correspondientes que embarcan MCIA. La principal diferencia se encuentra en el mayor peso de la pila y del sistema de almacenaje y/o conversión. Este mayor peso es una de las razones por la que la aceleración y velocidad punta son también menores. La pila de combustible también tiene menor potencia para evitar tener mayor peso, que agravaría el sistema. En otras palabras la densidad de potencia de la pila debe mejorarse significativamente para alcanzar una mejor característica peso/comportamiento. Ballard ha anunciado picos de potencia en el rango de 1,5 y 2,2 kW/l.

Autonomía

La autonomía de los vehículos con pila de combustible no es adecuada para los conductores actuales que están acostumbrados a autonomías de 500 km aproximadamente para vehículos de gasolina. La clave de este problema está en la densidad de energía del combustible almacenado. La densidad de energía de la gasolina es de 35 MJ/l. El metanol tiene 18 MJ/l. La densidad de energía del H₂ es de 10 MJ/l,

comprimido a 350 bar aumenta en 4 MJ/l. Debido a esta baja densidad de energía del hidrógeno almacenado, debe adoptarse una solución de compromiso entre la autonomía y en espacio del maletero. Últimamente este problema se está minorando utilizando nanotubos o almacenándolo a bordo como un metal hidruro.

Gestión térmica

A pesar del alto rendimiento de la pila de combustible (30 - 60% dependiendo de la elección del combustible, sistema de integración y condiciones operativas) debe eliminarse una cierta cantidad de calor. A causa de la baja temperatura (típicamente entre 75 - 90 °C para aplicaciones automovilísticas) de funcionamiento de la pila, que es donde tiene lugar la mayoría de las pérdidas térmicas, solamente una pequeña porción de calor se extrae por el colector de escape. Como consecuencia, para evitar el sobrecalentamiento de la pila, ésta debe refrigerarse, y el calor extraído por el fluido refrigerante debe cederse al exterior a través de un radiador. Debido a la baja temperatura, el gradiente de temperatura entre el fluido refrigerante y el ambiente puede ser bastante pequeño si la temperatura exterior es elevada, por lo que la superficie de intercambio de calor (área del radiador) puede ser considerable, varias veces mayor que la de un MCIA convencional.

Vida del sistema

A causa de que estos prototipos son recientes no se disponen de datos de ensayo de larga duración. Existen experiencias con pilas PEMFC con aplicación estacionarias. Debido a que la pila es lo más caro del vehículo es crítico realizar un ensayo de larga duración con vehículo, una sustitución periódica de la pila sería inaceptablemente cara.

Comportamiento del vehículo

El elevado peso y potencia moderada de los actuales vehículos con pila de combustible limita su aceleración y velocidad máxima. Sin embargo al

igual que los vehículos eléctricos (toda la potencia a las ruedas procede directamente del motor eléctrico, excepto en un sistema en paralelo en el que parte viene del MCIA vía caja de cambios) los de pila proveen una razonable buena aceleración inicial desde la posición de parado.

Funcionamiento silencioso

Los vehículos de pila de combustible son generalmente silenciosos en funcionamiento. Lo que más ruido produce es el compresor del aire de admisión.

Coste

El coste de fabricación siempre es un conflicto en debate y todavía está lejos de resolver. El objetivo sugerido por la CARB (California Air Resources Board) es de 60\$/kW, que se puede aceptar para una producción limitada de los primeros vehículos, pero es improbable que compita con los MCIA, cuyo coste está entre los 15 - 20 \$/kW. El coste actual de una pila de combustible es de 5.000 \$/kW. Se considera que una reducción de 10 veces se puede conseguir con una economía de escala mediante una producción en masa. Esto deja al que desarrolla la pila con un adicional de 10 a 20 veces de reducción de coste mediante una redefinición del diseño. El valor de 20 veces se está aceptando como un coste de reducción factible en un desarrollo de producto normal. El procesador de combustible es una tecnología bien conocida. El coste objetivo de 20\$/kW parece razonable.

EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para el cálculo de la eficiencia energética se suele aplicar la siguiente metodología estructurada en tres etapas. La primera etapa calcula la energía en el transporte de la fuente original de energía al centro de estación y su transformación en una forma de energía utilizable. Por ejemplo, la electricidad que desde un enchufe se utiliza para cargar una batería de un vehículo con un cierto rendimiento, comienza

Tabla 3

Tabla resumen de las 3 etapas.

	MCIA	HÍBRIDO	GN	ELÉCTRICO	PILA-H ₂	PILA-GASOLINA
ETAPA 1	0,86	0,86	0,86	0,36	0,86	0,65
ETAPA 2	0,16	0,27	0,27	0,80	0,32	0,47
ETAPA 3	---	0,90	0,91	0,26	0,79	0,77
TOTAL	0,14	0,21	0,21	0,07	0,22	0,24

Fuente: Matthew Brekken (1998)

como hidrocarburo. Este combustible se transporta a una planta de potencia con una determinada pérdida de rendimiento, se convierte en electricidad con una gran pérdida de rendimiento y se envía por la red de distribución con otra pérdida de rendimiento. En la etapa segunda, se calcula el rendimiento de conversión de la energía del combustible a bordo del vehículo en trabajo útil de rodadura, definido como el movimiento del vehículo, con su carga, a una cierta distancia. En la última etapa, se calcula el incremento de energía requerido para llevar componentes pesados en el vehículo tales como, cilindros presurizados para combustibles gaseosos o batería pesadas.

Como se puede observar en la tabla el rendimiento final de sistema con pila de combustible de hidrógeno es similar al alcanzado por el sistema híbrido. Es llamativo el rendimiento final del vehículo eléctrico de 0,07, debido en gran parte al peso desmedido de las baterías, a pesar de tener un rendimiento motor de 0,8.

PERSPECTIVAS DE FUTURO

El desarrollo tecnológico es la llave del éxito de la pila de com-

bustible en aplicaciones automovilísticas. Además deben de acometerse mejoras en lo que al coste se refiere para alcanzar una paridad con los sistemas de propulsión convencionales. Para el mercado europeo, la tabla 4 muestra un estudio comparativo de tres diferentes tecnologías de propulsión, vehículo eléctrico, vehículo híbrido y vehículo con pila de combustible. Las perspectivas apuntan hacia una penetración casi nula en el año 2010, y una cuota de mercado en 2020 de entre el 5 y el 10%, para los vehículos eléctricos, y el 10 y el 20% para los vehículos híbridos. Los vehículos con pila de combustible no muestran una penetración en el mercado hasta el año 2020, entre un 5 y 10%.

Tabla 4

Perspectivas de penetración de distintas tecnologías en el mercado de turismos en la Unión Europea.

TECNOLOGÍA	AÑO 2010		AÑO 2020	
	Baja	Alta	Baja	Alta
Eléctricos	0,5	1	5	10
Híbridos	1	2	10	20
Pila de combustible	0	0	5	10

Fuente: Hickman (1999).

REFERENCIAS

Fig. 1.- European Automobile Manufacturers Association and European Commission (2000) "Monitoring of ACEA's commitment on CO₂ Emission Reduction from Passenger Cars (1995-1999)".

Fig. 2.- Francisco Aparicio y otros. "Estudio del sector transporte en España. Desarrollo y aplicación de modelos y análisis de las condiciones para su incremento sostenible de la movilidad". 5 VOL. INSIA. Proyecto SETISMO (2002)

Tabla 2.- Arthur D. Little Inc. "Long-Term Prospects for PEMFC and SOFC in Vehicle Applications". SAE 2002-01-0414. (2002)

Tabla 3.- Matthew Brekken. "An Analysis of the Time Efficiency of Alternative Vehicle Powerplants and Alternative Fuels". SAE 981399. (1998).

Tabla 4.- Hickman. "Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption". TRL Report N° SE/491/98. MEET Project, 1999.



XI Congreso Internacional de la Asociación Internacional de Protección Radiológica

El contexto idóneo para insertar publicidad en:

- El programa de mano
- La revista IRPA 11
- El libro de abstracts

Conseguirá notoriedad, presencia y prestigio



Sociedad Nuclear Española



Sociedad Española de Protección Radiológica



Sociedad Española de Física Médica

Más información:

91 373 47 50

marketing@gruposenda.net