

# SET-TE: Pilas de combustible

## 1.- Descripción general

Las pilas de combustible son dispositivos que utilizan hidrógeno (o un combustible rico en hidrógeno) dentro de un proceso electroquímico para producir electricidad y calor. Generalmente, la célula de combustible está compuesta por dos electrodos (ánodo y cátodo) dentro de un electrolito, en la cual el ánodo es alimentado por hidrógeno y el cátodo por oxígeno. Un catalizador separa los electrones de los protones en la molécula de hidrógeno, cogiendo cada tipo de partícula un camino distinto en dirección al cátodo. Así, los electrones se mueven a través de un circuito externo (dando lugar a electricidad), mientras que los protones se desplazan a través del electrolito. En el cátodo los electrones y protones se reúnen con el oxígeno produciendo agua y calor.

Las células de combustible generalmente se conectan en serie hasta lograr la potencia de salida deseada. De esta forma se crea lo que se denomina una pila (stack) de combustible.

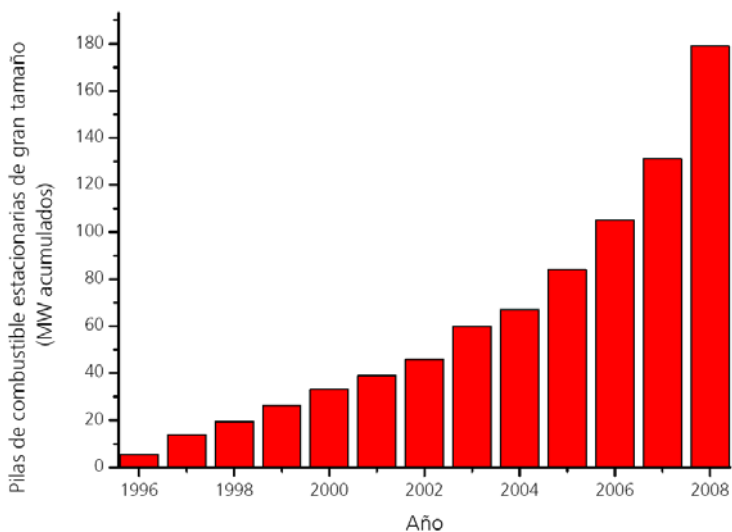
Las pilas de combustible se pueden utilizar para accionar motores eléctricos para automoción, maquinaria eléctrica, aparatos electrónicos e incluso en instalaciones modulares para la producción de energías eléctrica y térmica. La aplicabilidad, en este último caso, resulta especialmente atractiva dado que la suma de eficiencias en producción de electricidad y calor acerca más los costes a los precios de mercado, además de cubrir un segmento de instalaciones de potencia media para aplicaciones en edificios que se sitúa entre los sistemas convencionales de cogeneración de gran potencia y las pequeñas calderas para uso más individual.

En el caso de la automoción, puesto que los motores eléctricos presentan una muy elevada eficiencia en la transformación de energía eléctrica en mecánica (superior al 90%)<sup>[1]</sup> y las pilas de combustible mantienen eficiencias de producción de electricidad también considerables, la eficiencia energética que representaría la utilización de hidrógeno para producir electricidad prácticamente doblaría a la de la utilización de combustibles fósiles en motores de explosión para vehículos en autopista y lo triplicaría en condiciones de tráfico urbano denso. Sin embargo, como aspecto negativo de las pilas de combustible, su coste actual es excesivo (como veremos más adelante), esperándose que disminuya de manera muy sustancial cuando se alcancen los adecuados volúmenes de producción.

Para analizar la producción de pilas de combustibles en los últimos años, hay que hacer una primera distinción<sup>[2]</sup> entre pilas de combustible estacionarias de gran tamaño (> 10kWh)<sup>[3]</sup>, estacionarias de pequeño tamaño<sup>[4]</sup>, y portátiles<sup>[5]</sup>.

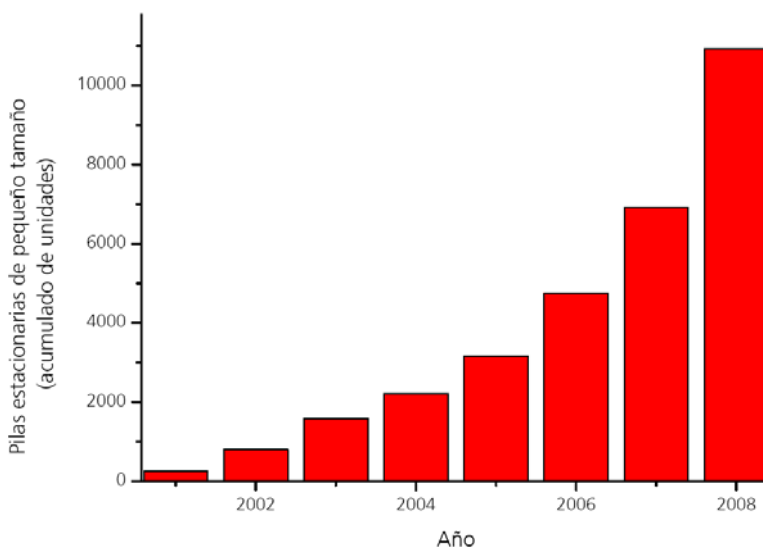
En el caso de células de combustible estacionarias de gran tamaño, éstas se utilizan tanto conectadas a la red eléctrica como aisladas, como generadoras exclusivamente de energía eléctrica o generando electricidad y calor simultáneamente. En el año 2008 se alcanzó la cifra de 180 MW acumulados de potencia instalada a nivel mundial<sup>[3]</sup> (figura 1), siendo la tecnología de carbonato fundido (MCFC) la más utilizada actualmente (~ 40%), seguida de la ácido

fosfórico (PAFC, ~ 35%), la de óxido sólido (SOFC, ~ 15%) y la de membrana de intercambio de protones (PEMFC, ~ 10%).



**Figura 1.-** Evolución de la producción anual de pilas de combustible estacionarias y de gran tamaño en el período 1996-2008 (Fuel Cell Today<sup>[3]</sup>).

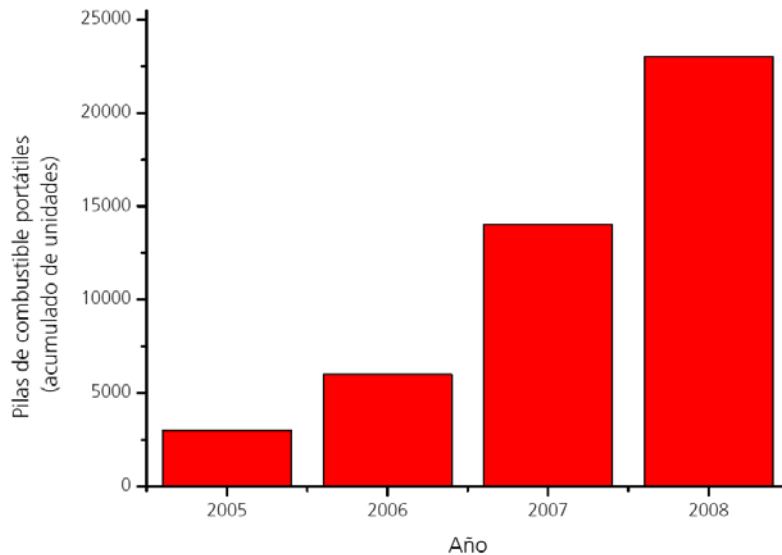
En el caso de células de combustible estacionarias de pequeño tamaño, la aplicación principal está siendo para sistemas de suministro eléctrico ininterrumpible (UPS). En el año 2008 se llegaba casi a las 11.000 unidades acumuladas instaladas a nivel mundial<sup>[4]</sup> (figura 2), siendo la tecnología de membrana de intercambio de protones (PEMFC) la utilizada prácticamente en la totalidad de las instalaciones, y compartiendo casi a partes iguales la utilización de hidrógeno, gas natural y otros combustibles para su funcionamiento.



**Figura 2.-** Evolución de la producción anual de pilas de combustible estacionarias de pequeño tamaño en el período 2001-2008 (Fuel Cell Today<sup>[4]</sup>).

En el caso de pilas de combustible portátiles, los nichos de mercado en los que se está aplicando de forma más intensa esta tecnología es en los juguetes y en unidades militares; también se aplica en teléfonos móviles, ordenadores portátiles

y cámaras, aunque en modelos aún pre-comerciales. En el año 2008 se alcanzaban las 23000 unidades acumuladas instaladas a nivel mundial<sup>[5]</sup> (figura 3), siendo la tecnología PEMFC la más utilizada actualmente (~ 70%), seguida de la DMFC (~ 24%), y el resto repartido entre el resto de tecnologías (~ 6%). El combustible mayoritariamente utilizado en estas pilas de combustible es el hidrógeno, aunque también se utiliza metanol y, en menor medida, propano/butano y otros alcoholes.



**Figura 3.-** Evolución de la producción anual de pilas de combustible portátiles en el período 2005-2008 (Fuel Cell Today<sup>[5]</sup>).

## 2.- Estado actual de la tecnología

Debido a que los SET tratan tecnología favorecedora o basada en fuentes de energía renovable, a continuación se tratarán sólo las pilas de combustible que utilizan, o pueden utilizar, hidrógeno como combustible, descartando las que sólo utilizan combustibles fósiles.

### **Pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC):**

Su componente más característico lo constituye su electrolito, formado por una membrana polimérica formada de grupos sulfónicos  $CF_2$ , entre los cuales saltan por un mecanismo de "hopping" los protones ( $H^+$ ) al atravesar el electrolito (figura 4.a). El polímero de base se llama nafion y lo fabrica la empresa Dupont. Su sensibilidad al monóxido de carbono y a compuestos de azufre requiere hidrógeno puro (por ejemplo, obtenido mediante electrólisis del agua) para no envenenar el catalizador de platino.

La penetración de estas pilas de combustible en el mercado está impulsada por lo avanzado de su tecnología y la baja relación entre peso y volumen respecto a la energía producida. Encuentra el inconveniente de que sus electrodos de platino nanodispersado, material que también actúa de catalizador, resultan muy costosos, por lo que se están realizando muchos esfuerzos para encontrar

materiales alternativos que permitan hacer esta tecnología más competitiva. Sin embargo, no requiere de productos corrosivos, como otras pilas de combustible. Opera a temperaturas relativamente bajas ( $\sim 80^\circ \text{C}$ ), lo que le permite arrancar rápido y tener una mayor durabilidad que otras pilas de combustible, aunque le exige sistemas de refrigeración para no superar dicha temperatura. Esto último le impide a la tecnología PEMFC ser atractiva para aplicaciones de cogeneración de electricidad y calor. Por último, hay que señalar que dos terceras partes de las pilas de combustible móviles<sup>[6]</sup>, se utilizan para aplicaciones distintas de la automoción.

Existen también pilas de combustible de membrana polimérica que funcionan directamente con metanol, por lo que se denominan DMFC, las cuales no son tratadas en este SET por las razones expuestas anteriormente.

### **Pilas de combustible de óxido sólido (SOFC):**

Estas pilas de combustible pueden ser alimentadas por varios tipos de combustible, entre ellos hidrógeno, generalmente obtenido por reformado, así como combustibles fósiles como el gas natural, etc (figura 4.b). El electrolito sólido está formado por una dura membrana cerámica no porosa de óxido de zirconio,  $\text{ZrO}_2$ , dopado con ytrio. Operan a temperaturas cercanas a los  $1000^\circ \text{C}$ , de modo que los iones de oxígeno del comburente crucen rápidamente la membrana cerámica. Debido a esta elevada temperatura no requieren la utilización de metales preciosos en procesos de reformado, siendo el tipo de pila de combustible que mejor resiste los compuestos de azufre y el monóxido de carbono. Trabajar a altas temperaturas también tiene inconvenientes para este tipo de pilas de combustible como, por ejemplo, lo lentas que son para producir energía, la necesidad de aislarlas térmicamente y para proteger al personal. Aparte de esto, la fabricación de estas pilas de combustible es muy costosa.

Las SOFC se suelen utilizar en plantas relativamente grandes para cogenerar electricidad y energía térmica, debido a su alta temperatura de funcionamiento. En estas plantas se alcanzan eficiencias eléctricas cercanas al 60%.

### **Pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC):**

Estas pilas de combustible no utilizan hidrógeno como combustible, sino  $\text{CO}_2$ , generalmente procedente de gas natural o carbón (figura 4.c), lo que indica que no se envenenan con compuestos de óxido de carbono, siendo también muy resistentes a las partículas y al azufre. Utilizan un electrolito compuesto por una sal de carbonato fundido, suspendido en una matriz cerámica de óxido de aluminio y litio ( $\text{LiAlO}_2$ ) inerte. Operan a temperaturas bastante elevadas ( $> 650^\circ \text{C}$ ), por lo que no necesitan catalizadores basados en metales preciosos, aunque tampoco se emplean en automoción. Por todo ello, su aplicación más importante es en generación eléctrica de gran potencia (del orden de los MW) y en edificios, en los cuales se aprovecha tanto la electricidad como la energía térmica.

Al contrario que en las pilas de combustible alcalinas, de ácido fosfórico y de membrana de intercambio de protones, las pilas de combustible de carbonato

fundido no requieren un reformador externo para convertir combustibles energéticamente densos en hidrógeno. Esto es debido a que a las altas temperaturas que este tipo de pila de combustible opera, estos combustibles se descomponen en hidrógeno por sí mismos dentro de la pila de combustible, mediante un proceso denominado reformado interno, lo cual también reduce costes.

La mayor desventaja de las pilas de combustible de carbonatos fundidos es su durabilidad, debido a las altas temperaturas a las que operan y el corrosivo electrolito utilizado para acelerar la ruptura de los compuestos.

### **Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC):**

Estas pilas de combustible suelen emplear como combustible un hidrocarburo, como el gas natural o la gasolina, que posteriormente es reformado, aunque también pueden utilizar hidrógeno directamente (figura 4.d). Se basan en un electrolito de ácido fosfórico contenido en una matriz de carburo de silicio operando cerca de los 200°C (el punto de ebullición es de 250°C). Utiliza electrodos de carbono poroso que contienen platino. Estas pilas de combustible fueron las primeras en ser comercializadas, pero no se utilizan en automoción por ser bastante costosas y muy pesadas. Sin embargo, están muy desarrolladas tecnológicamente, por lo que se emplean abundantemente en plantas estacionarias de generación eléctrica distribuida.

### **Pilas de combustible de electrolito alcalino (AFC):**

Estas pilas de combustible constituyen una de las primeras tecnologías en ser desarrolladas, principalmente para producir energía eléctrica y agua a bordo de naves espaciales. Su nombre proviene del hecho de que el electrolito es un álcali, principalmente el hidróxido de potasio, y pueden utilizar una variedad de metales no preciosos como catalizadores en el ánodo y el cátodo (figura 4.e). Operan a temperaturas entre 23° C y 70° C.

La mayor desventaja de este tipo de pilas de combustible es que se envenena muy fácilmente con CO<sub>2</sub>, lo que disminuye su durabilidad. Incluso una pequeña cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera puede afectar la operatividad de la pila de combustible, lo que obliga a purificar tanto el hidrógeno como el oxígeno que se inyectan en la misma. Esto hace que no pueda tomar el oxígeno directamente de la atmósfera, ya que necesita oxígeno puro. Además los tiempos de vida de estas pilas de combustible (8.000 horas) son muy inferiores a lo que se estima como objetivo para aplicaciones estacionarias (40.000 – 60.000 horas ó 5 – 8 años de operación)<sup>[7]</sup>.

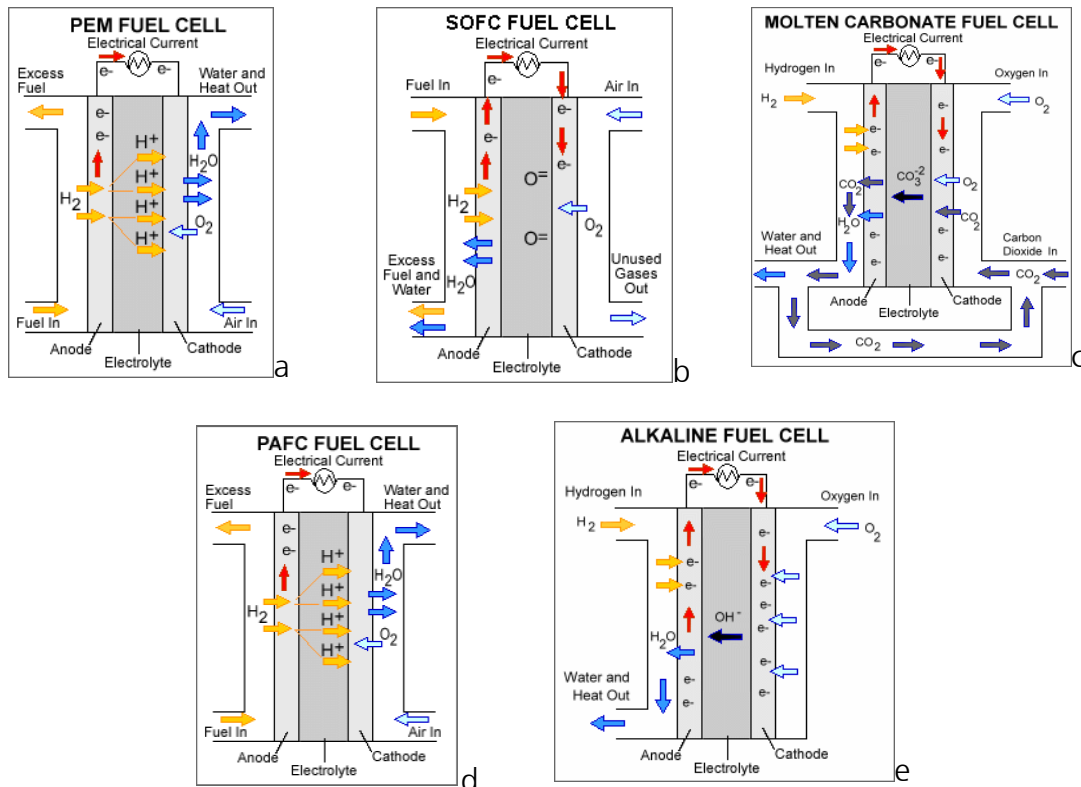


Figura 4.- Esquema de los distintos tipos de células de combustible (EERE-DOE).

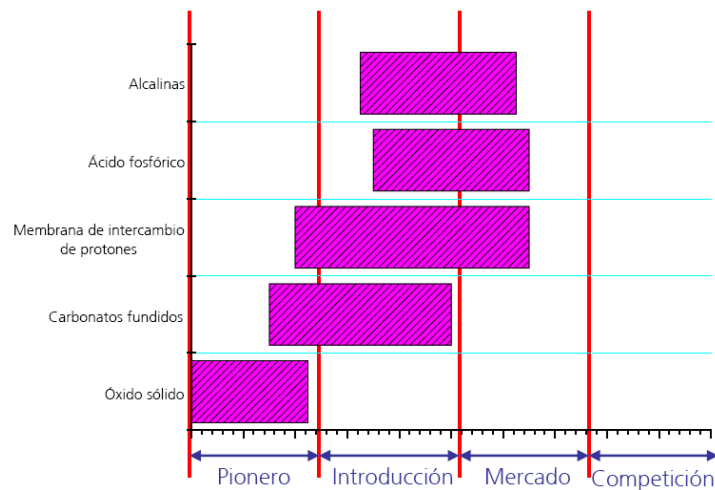
De forma resumida, y considerando que las fuentes de información aún se encuentran en un proceso en el que es necesario homogeneizar la forma en la que se definen los distintos parámetros, se pueden mostrar las especificaciones técnicas de cada tecnología (tabla 1):

Tabla 1.- Especificaciones técnicas de los distintos tipos de pilas de combustible.

	SOFC	MCFC	PEMFC	PAFC	AFC
<b>Aplicación principal</b>	Estacionaria	Estacionaria	Estacionaria/ portátil/móvil	Estacionaria	Estacionaria/ móvil
<b>Temperatura de operación (°C)</b>	800-1000	> 650	80-150	150-200	23-70
<b>Combustible</b>	H <sub>2</sub> , hc	ng, hc	H <sub>2</sub>	ng, H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
<b>Eficiencia eléctrica (%)</b>	50-55	50-55	35-40	37-42	60
<b>Tiempo de vida móvil (h)</b>	-	-	2000	-	8000
<b>Tiempo de vida estacionaria (h)</b>	20000	20000	30000	40000	8000
<b>Electrolito</b>	Óxido cerámico	Carbonatos fundidos	Membrana polimérica	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> -SiC	Alcalis
<b>Catalizador</b>	Tipo perovskita	Niquel	Pt	Pt-C	Metales no preciosos

IEA Energy Technology Essentials: Fuel Cells; EERE-DOE. NEEDS.  
ng: natural gas; hc: hydrocarbons.

En función del grado de penetración en el mercado, las distintas tecnologías de pilas de combustible se pueden encuadrar en distintas etapas de desarrollo (Figura 5). De este modo, se observa que aunque la mayoría de las tecnologías ha entrado en el mercado, todas ellas aún están lejos de poder competir de forma libre en el mismo. Por otro lado, las tecnologías MCFC y PAFC ya se encuentran relativamente desarrolladas, mientras que las PEMFC son las que abarcan más etapas dado que están bastante introducidas en el mercado pero, a la vez, se sigue desarrollando mucha investigación para mejorar su comportamiento. Por otro lado, la tecnología MCFC se puede considerar que ya ha desbancado a la tecnología PAFC, aunque tiene dificultades para entrar en el mercado, mientras que la tecnología SOFC sería la que se encontraría en una etapa más inicial de desarrollo. La tecnología AFC se puede considerar ya como obsoleta.



**Figura 5.-** Estado del desarrollo de cada una de las subtecnologías dentro de la tecnología de pilas de combustible (elaboración propia).

### 3.- Costes actuales y futuros escenarios<sup>1</sup>

Respecto al coste de las pilas de combustible existen muy pocos datos fiables, en parte debido a que para potencias medias o altas las pilas de combustible se suelen fabricar bajo encargo y, en parte, porque al ser una tecnología con mercados muy reducidos se suelen fabricar manualmente, lo que dificulta la comparación de costes.

La evaluación de costes se hace, generalmente, en términos de capital invertido por unidad de potencia instalada (\$/kW o €/kW), dado que las células pueden utilizar distintos tipos de combustible e, incluso, en el caso del hidrógeno, este vector energético puede ser producido por distintas tecnologías que hacen variar su coste de forma sustancial.

Algunos estudios sitúan el coste actual de las PEMFC para automoción alrededor de los 1,800 \$/kW<sup>[7]</sup>. Los costes más importantes se deben a las membranas poliméricas que suelen ser de nafion, los electrodos de compuestos de platino que

implican aproximadamente 1,4 g de Pt por kW, y las placas bipolares fabricadas de materiales compuestos grafito-polímero. Las perspectivas futuras indican que en un plazo de unos 15 a 20 años los precios se reducirán a algo menos de 100 \$/kW<sup>[7]</sup>.

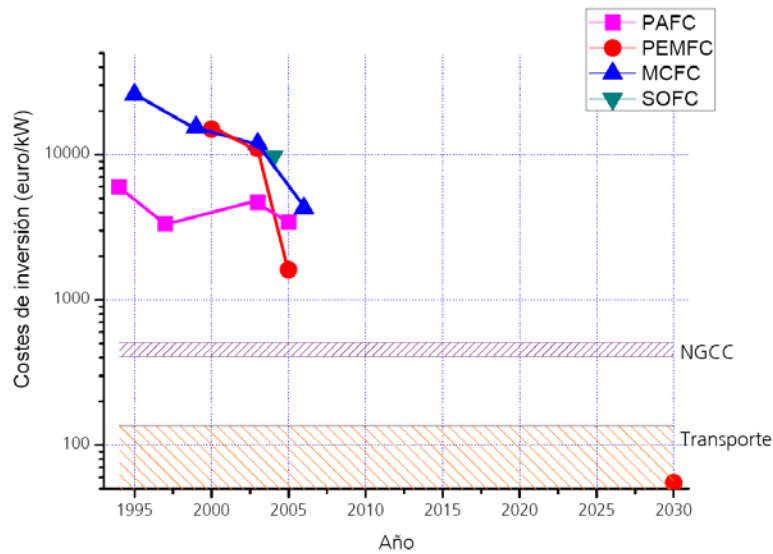
En el caso de sistemas estacionarios basados en SOFC y MCFC, otros estudios sitúan el coste de unidades con potencias de 200-300 kW en unos 12,000 \$/kW<sup>[5]</sup>, aunque otros trabajos referencian valores más bajos<sup>[8]</sup>. Aquí de nuevo se espera que en el futuro, con el desarrollo de nuevas tecnologías, así como la implementación de técnicas de producción a gran escala, los precios se reduzcan de manera substancial.

Las PAFC tienen problemas para reducir sus costes (señalados en algunos trabajos en el entorno de los 4000 – 4500 \$<sub>2005</sub>/kW<sup>[5]</sup>), especialmente por basarse en una tecnología muy madura y por los requerimientos de platino, por lo que alguna empresa que fabricaba estas células ha optado por cambiar a otra tecnología con un mayor potencial de reducción de costes<sup>[7]</sup>.

El objetivo para hacer competitiva la tecnología de pilas de combustible es lograr bajar de los 50 - 100 \$/kW los costes de inversión<sup>[7]</sup>, pensando principalmente en aplicaciones en automoción, aunque se considera que por debajo de los 200 \$/kW ya podría empezar a ser competitiva para aplicaciones en algunos nichos como el de autobuses<sup>[7]</sup>. En este sentido, se estima que las PEMFC podrían alcanzar los 35 – 75 \$/kW de costes de inversión hacia el año 2030<sup>[7]</sup>. Una razón para esta importante bajada de precios es que, actualmente, las PEMFC se fabrican manualmente, por lo que una producción automática a gran escala debería bajar los precios de forma sustancial.

Resulta ilustrativo realizar una comparación de costes de inversión entre distintos tipos de tecnología de pilas de combustible publicados en años recientes y perspectivas hacia el año 2030<sup>[8]</sup>, así como los valores en los que se alcanzaría la paridad de costes, tanto en relación a centrales eléctricas convencionales como en aplicaciones en automoción<sup>[8]</sup> (figura 6). Para realizar una primera aproximación sobre paridad, se puede comparar el coste de inversión en pilas de combustible y en centrales de ciclo combinado alimentadas por gas natural, teniendo éstas unos costes de inversión en el entorno de los 600 – 700 \$/kW y con eficiencias en el entorno del 60%<sup>[9]</sup>. Las centrales de ciclo combinado alimentadas con gas natural se estima que son las principales competidoras de esta tecnología en aplicaciones estacionarias. Como se ha comentado más arriba, para aplicaciones móviles se estima que el rango para ser competitivo con el motor convencional en automoción se sitúa en los 50 – 200 \$/kW.





**Figura 6.-** Evolución de costes de inversión de instalaciones estacionarias y móviles con distintos tipos de pilas de combustible, rangos de costes de inversión en los que se alcanza la paridad con centrales de gas natural en ciclo combinado y en motores para vehículos, y previsiones de costes de inversión para el año 2030 (elaboración propia).

Con la información recogida hasta este punto, y utilizando también algunos datos del SET de producción de hidrógeno, se puede hacer una estimación de costes de producción del kWh de electricidad en sistemas centralizados y descentralizados utilizando hidrógeno obtenido de fuentes de energía renovable. Para ello vamos a considerar el coste más bajo de producción de hidrógeno en sistemas centralizados, que resulta ser el que se extrae por gasificación de la biomasa, así como el coste más bajo en sistemas descentralizados, que resulta ser el que se extrae de los biocombustibles. Consideramos una instalación estacionaria típica de 100 kW tomando los costes más bajos para las tecnologías referenciadas en la figura 6 para instalaciones estacionarias. Tomamos unos costes de operación y mantenimiento de un 5% de los ingresos por producción de energía eléctrica, una tasa de retorno del 7% y unas eficiencias y tiempos de vida recogidos en la tabla 1. De esta forma resultan los costes de producción de electricidad en sistemas centralizados y descentralizados que se exponen en la tabla 2.

**Tabla 2.-** Costes de producción de electricidad para distintos tipos de pilas de combustible.

	SOFC	MCFC	PEMFC	PAFC
Coste (€/kW)	9700	4300	11000	3400
Coste H <sub>2</sub> centralizado a partir de biomasa (€/kWh)	0,0452	0,0452	0,0452	0,0452
Coste H <sub>2</sub> descentralizado a partir de biofuel (€/kWh)	0,1034	0,1034	0,1034	0,1034
Eficiencia eléctrica (%)	52,5	52,5	37,5	40
Años	5	5	5	5
Tiempo de vida estacionario (h)	20000	20000	30000	40000
Costes de electricidad centralizado (€/kWh)	0,785	0,414	0,623	0,235
Costes de electricidad descentralizado (€/kWh)	0,938	0,566	0,775	0,388

1e = 1,39\$ (2009)

Así, se puede concluir que los costes de electricidad más bajos resultan los de tecnología PAFC, mientras que los más elevados son los de tecnología SOFC. De los resultados obtenidos también se observa que la producción de electricidad en instalaciones de pilas de combustible descentralizadas implica un sobrecoste de 0,15 €/kWh para todas las tecnologías, lo que viene dado por el sobrecoste en la producción de hidrógeno en estas condiciones. También se puede advertir, de estos resultados, la importancia de los tiempos de vida de las instalaciones en la disminución de los costes de producción.

#### **4.- Payback energético, emisiones de CO<sub>2</sub> y costes externos<sup>3,4</sup>**

En el caso de las pilas de combustible, los valores de payback energético, emisiones de CO<sub>2</sub> y costes externos dependen, principalmente, del tipo de combustible utilizado y, en el caso de utilizar hidrógeno, de la forma en la que este vector energético ha sido obtenido, por lo que es muy difícil analizar este tipo de parámetros en este caso. No obstante, existe ya algún estudio que analiza el ciclo de vida de tecnología PEMFC, SOFC y MCFC en aplicaciones estacionarias<sup>[8]</sup>.

Así, se comprueba que los sistemas pequeños son los que tienen el peor comportamiento (figura 7). Si se comparan dos pilas de combustible pequeñas, las PEMFC muestran generalmente mejor comportamiento que las SOFC, excepto en el caso de las emisiones SO<sub>x</sub>. Esto es debido principalmente a la fase de construcción de las PEMFC. Las diferencias en CO<sub>2</sub> y, en general, en la emisión de gases de efecto invernadero, es atribuible principalmente a las diferencias en eficiencia eléctrica.

Con respecto a sistemas grandes, actualmente la tecnología SOFC (250 kW) muestra un peor comportamiento en comparación con la tecnología MCFC (250 MW), en relación con las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub> y NMVOC (compuestos orgánicos volátiles distintos del metano). Sin embargo, se prevé que en el futuro este comportamiento se invierta a partir de que la eficiencia eléctrica de las SOFC se incremente en relación con las MCFC.

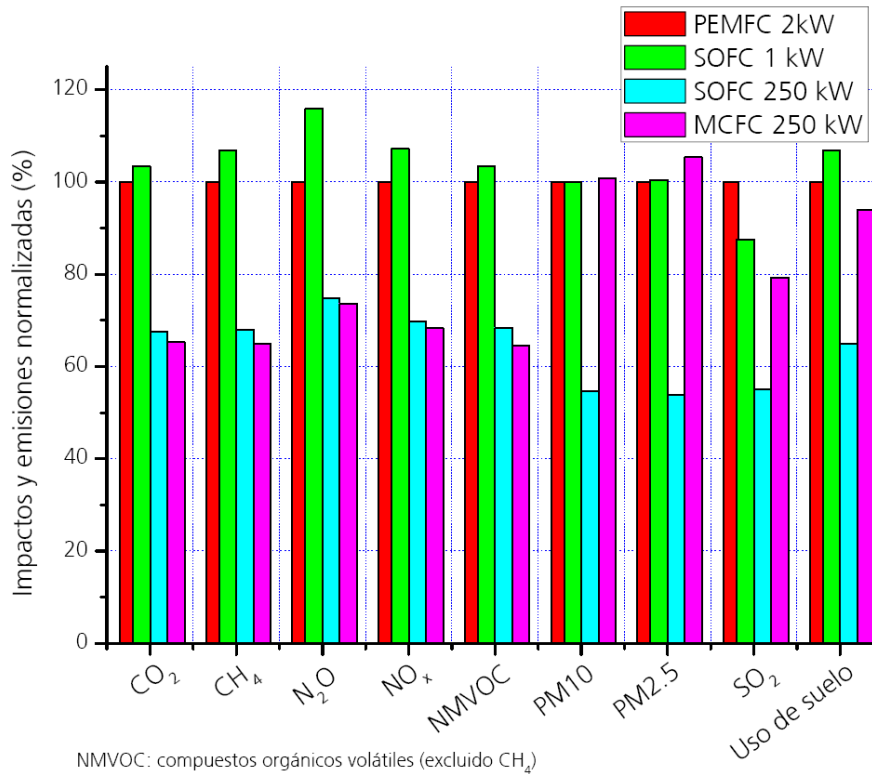


Figura 7.- Comparación de emisiones y uso de suelo para distintas tecnologías de pilas de combustible (proyecto NEEDS<sup>[8]</sup>).

## 5.- Tendencias tecnológicas futuras

### Pilas de combustible de Membrana de Intercambio de Protones (PEMFC):

En el caso de las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones se está haciendo especial esfuerzo en el desarrollo de nuevos catalizadores entre protones, electrones y oxígeno para dar agua, que substituyan a los de platino, debido a su alto precio. Por ejemplo, se está tratando de introducir nuevos catalizadores de platino/rutenio, los cuales parecen más resistentes al envenenamiento por CO. También se están planteando ensayos con otras aleaciones de Pt con cobalto y cromo.

Otro aspecto en el que se está investigando es en la creación de nuevos materiales de membrana que reemplacen al nafion, que puedan funcionar hasta temperaturas de unos 180°C, que sean menos propensos al envenenamiento, que no tengan la necesidad de sistemas de refrigeración y que se puedan utilizar más adecuadamente en aplicaciones móviles. El nafion tiene las desventajas de ser costoso y, a temperaturas por encima de los 80° C, se produce la pérdida de conductividad protónica debido a la deshidratación. Por ejemplo, se están introduciendo termoplásticos de alta temperatura denominados polyfthalazinones, silicatos orgánicamente modificados y otros polímeros.

También se trabaja en el desarrollo de nuevos tipos de placas bipolares, actualmente fabricadas a partir de grafito o de acero inoxidable recubierto de oro.

Se pretende ir sustituyendo estos materiales por polímeros o aleaciones de acero más económicas.

### **Pilas de combustible de óxido sólido (SOFC):**

En las pilas de combustible de óxido sólido se plantea, principalmente, el desarrollo de membranas alternativas a las de óxido de zirconio que presenten conductividades eléctricas más altas, de modo que puedan operar a temperaturas más bajas, en el entorno de los 500° C, aproximadamente, en lugar del entorno de los 1000° C actuales. Trabajar a menores temperaturas implica utilizar materiales más económicos.

Estas pilas de combustible también requieren mayor investigación y desarrollo de materiales que aguanten las altas temperaturas de operación y les permitan tener una mayor durabilidad. Es necesario también desarrollar nuevos electrodos para mejorar la eficiencia de las reacciones redox y la tolerancia a los compuestos de azufre. También se plantea conseguir nuevos cátodos y electrolitos para mejorar la densidad de potencia por unidad de área de la pila de combustible a temperaturas más bajas. También se plantea utilizar el calor del proceso para mover turbinas de vapor y mejorar la eficiencia eléctrica.

### **Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC):**

Los esfuerzos de desarrollo tecnológico de este tipo de pilas de combustible se centran, principalmente, en la búsqueda de materiales resistentes a la corrosión que aumenten los tiempos de vida de las pilas de combustible, ya que los materiales deben aguantar un mínimo de 40.000 horas a 650° C en presencia de una sal fundida en condiciones oxidantes o reductoras. Además, hay que resolver el problema de degradación por el níquel de los electrodos, el cual penetra en el carbonato fundido y causa cortocircuitos.

También se plantea la simplificación del sistema y utilizar el calor del proceso para mover turbinas de vapor y mejorar la eficiencia eléctrica. También se plantea el diseño de pilas de combustible que utilicen otros combustibles, como otros hidrocarburos líquidos, biocombustibles, gases procedentes de biodigestores o residuos, etc., ya que este tipo de pilas de combustible tiene la ventaja de no verse afectada por la cantidad de CO<sub>2</sub> que porta el combustible. De hecho, ya se están ensayando pilas de combustible que funcionan con metanol y biogás.

### **Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC):**

Este tipo de pilas de combustible se considera basado en una tecnología madura con pocas posibilidades de reducir costes, por lo que, como se ha dicho anteriormente, se está abandonando la actividad en su desarrollo tecnológico.

### **Pilas de combustible de electrolito alcalino (AFC):**

Los problemas técnicos derivados de su escaso tiempo de vida y los costes de tener que utilizar hidrógeno y oxígeno purificado están haciendo que no se detecte mucho esfuerzo en su desarrollo tecnológico.

### **Otros aspectos de futuro:**

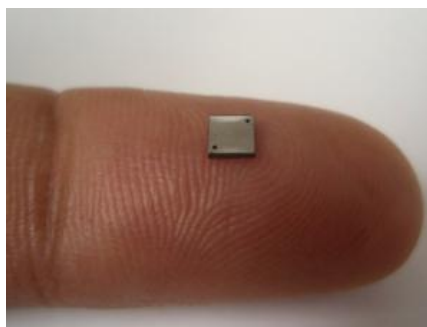
Son de destacar los recientes esfuerzos que se vienen realizando en la fabricación de micropilas de combustible ( $< 1$  W), principalmente catalizadas por medio de enzimas biológicas. Estas pilas de combustible se plantean para aplicaciones médicas, en entornos en los que se requiera aporte de energía eléctrica y sea difícil acceder de forma periódica a recargar la fuente de alimentación. Así, se busca que este tipo de pilas de combustible aproveche los compuestos químicos de su entorno para abastecerse de combustible biológico para poder producir energía.

Otro aspecto a destacar es el poder hacer que las pilas de combustible puedan alimentarse de biogás procedente de biomasa sólida o de digestión anaeróbica de residuos. Como se ha mencionado anteriormente, ya se están ensayando algunos prototipos. Estos sistemas tendrían la ventaja de producir electricidad con mayores eficiencias que los sistemas de producción convencionales, especialmente si se aplican en instalaciones descentralizadas.

## **6.- Highlights en preproducción 2008-2009**

### **Sistemas con la pila de combustible más pequeña del mundo<sup>[10]</sup>:**

Esta pila de combustible ha sido desarrollada por tres ingenieros en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y mide 3 milímetros de lado. Este tipo de sistemas tienen la ventaja, frente a las baterías convencionales, que almacenan mayor cantidad de energía por unidad de volumen. Los primeros diseños generan un voltaje de 0,7 V y una corriente de 0,1 mA durante 30 horas hasta que el hidruro metálico se agota. Estas pilas de combustible podrían ser utilizadas para dar energía a dispositivos médicos que la requirieran durante cortos períodos de tiempo.



**Figura 8.-** La nueva micropila de combustible mide sólo 3 mm de lado (Image: Saeed Moghaddam).

### **Pila de combustible alimentada con el azúcar de la sangre<sup>[5]</sup>:**

Desarrollada por la Universidad de British Columbia, genera electricidad sintetizando el azúcar de la sangre humana. Produce una potencia de 40 nW y está pensada para aplicaciones médicas que pudieran exigir suministro de energía prolongada, lo que evitaría las periódicas intervenciones quirúrgicas para renovar las baterías.

## **7.- Highlights en innovación 2008-2009**

### **Avances en el desarrollo de catalizadores para pilas de combustible<sup>[11]</sup>:**

Con el fin de abaratar costes en la producción de pilas de combustible, ha habido varios avances en la substitución de catalizadores de platino por otros materiales, o bien se ha trabajado con compuestos de platino con una baja proporción de este metal. Así, se ha conseguido que los catalizadores basados en Fe/N/C hayan aumentado su actividad catalizadora en un factor 5 en relación a la que presentaban hace tan solo unos pocos años. Por otra parte, en catalizadores de compuestos de platino, tales como el Pt<sub>3</sub>Ni(111), se ha conseguido aumentar tanto la velocidad de producción de electrones como la fracción de átomos de Pt en la superficie, con lo que la actividad catalizadora global ha aumentado en un factor 100 aproximadamente.

### **Impacto de la microestructura del ánodo en las propiedades de las pilas de combustible de óxido sólido<sup>[12]</sup>:**

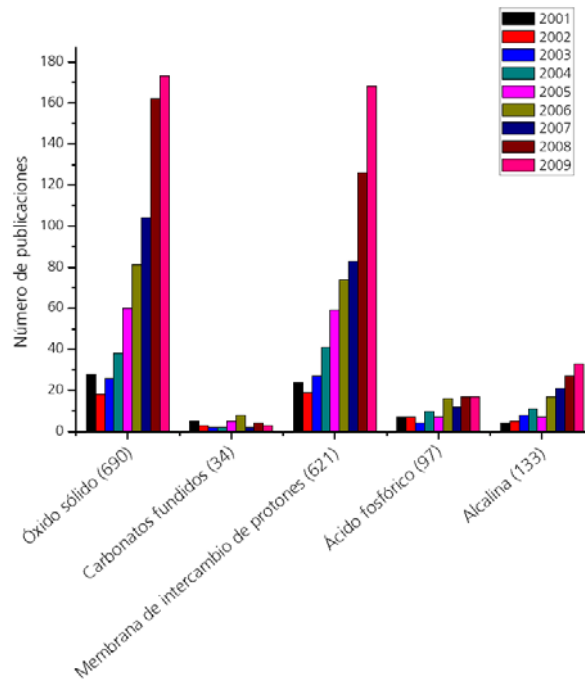
Muy recientemente, se ha demostrado que la eficiencia de las SOFC mejora notablemente cuando las partículas que forman el ánodo se reducen en tamaño hasta formar una nanoestructura muy porosa. Así, la densidad de potencia se ha visto aumentada hasta más de 1 watio por centímetro cuadrado, a temperaturas de menos de 600°C, utilizando un electrolito convencional de zirconio, un ánodo basado en un cermet de níquel y un cátodo de ferrita. Simultáneamente se logró mejorar la velocidad de flujo del hidrógeno en el interior de la pila de combustible.

### **Un catalizador económico para pilas de combustible poliméricas<sup>[13]</sup>:**

Este catalizador produce electricidad a partir del hidrógeno en células de combustible. El electrodo se basa en un material poroso recubierto con polietilendiotiofeno (poly-ethylenedioxythiophene, PEDOT), que actúa como catalizador en la reducción del oxígeno. Este catalizador puede operar continuamente durante 1500 horas según se ha demostrado. Las velocidades de conversión con el oxígeno fueron comparables a las de los catalizadores de platino.

## **8.- Estadística de publicaciones**

La figura 9 muestra el número de publicaciones científicas durante el período 2001-2009 para los distintos tipos de pilas de combustible<sup>[14]</sup>.



**Figura 9.-** Número de publicaciones científicas durante el período 2001-2009 para los distintos tipos de tecnologías de hidrógeno y células de combustible.

De la figura 9 se deduce fácilmente que en la actualidad las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones y las de óxido sólido son las que mayor número de publicaciones producen, destacando significativamente las de óxido sólido. Este resultado ratifica muchas de las consideraciones expuestas en los apartados anteriores con respecto a estas tecnologías, especialmente en lo relacionado con el potencial de reducción de costes, relación potencia-peso, aplicabilidad con biocombustibles y en sistemas de automoción.

La evolución del número de publicaciones en la tecnología de carbonato fundido nos indica que se trata de una tecnología con pocas opciones de cara al futuro en el dominio del mercado de las pilas de combustible, aunque se sigue trabajando en mejorar sus características. La evolución en cuanto al número de publicaciones es prácticamente plana, lo que demostraría que se trata de una tecnología madura, como ya se ha indicado anteriormente. El ser una tecnología descartada para aplicaciones en automoción también puede estar definiendo esta tendencia.

De la figura 9 también se puede deducir lo señalado en apartados anteriores sobre la consideración de que las pilas de combustible de ácido fosfórico se considera una tecnología ya madura en la que es muy difícil reducir los costes de forma sustancial para hacerlas competitivas en el largo plazo, lo que está haciendo que el volumen de trabajos en esta tecnología resulte reducido y bastante estabilizado.

Algo similar se puede decir las pilas de combustible de electrolito alcalino, donde las exigencias de pureza en los gases y los bajos tiempos de vida de los dispositivos las hacen poco atractivas de cara al futuro.

## 9.- Referencias

- 1.- G. W. Crabtree, M. S. Dresselhaus, en "The Hydrogen Fuel Alternative", MRS Bulletin vol 83, No. 4, p. 421.
- 2.- Online Surveys. Fuel Cell Today. <http://www.fuelcelltoday.com/online/surveys>
- 3.- 2008 Large Stationary Survey, Dr. Kerry-Ann Adamson. Fuel Cell Today (August 2008). <http://www.fuelcelltoday.com/online/survey?survey=2008-08%2F2008-Large-Stationary-Survey>
- 4.- Small Stationary Survey 2009. Dr. Kerry-Ann Adamson. Fuel Cell Today (March 2009). <http://www.fuelcelltoday.com/online/survey?survey=2009-03/Small-Stationary-2009>
- 5.- Portable Fuel Cell Survey 2009. Dr. Jonathan Butler. Fuel Cell Today (April 2009). <http://www.fuelcelltoday.com/online/survey?survey=2009-04%2F2009-Portable-Survey>
- 6.- G. Crawley. Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Fuel Cell Today (March 2006).
- 7.- Prospects for hydrogen and fuel cells. Energy Technology Analysis. International Energy Agency (2005).
- 8.- "Final report on technical data, cost and life cycle inventories of fuel cells". New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS). (2008).
- 9.- "Energy Technology Perspectives 2008", Chapter 7. International Energy Agency.
- 10.- S. Moghaddam, E. Pengwang, K.Y. Lin, R.I. Masel, M.A. Shannon, Journal of Microelectromechanical Systems 17 (2008) 1388 – 1395.
- 11.- H. A. Gasteigner, N. M. Markovic, Science vol. 324, p 48. 2009.
- 12.- T. Suzuki et al, Science vol. 325, p 852, 2009.
- 13.- Science, vol. 321, p.671, agosto 2008.
- 14.- Current Contents. ISI Web of Knowledge.