



## Índice

1- Introducción.....	3
¿Qué es una celda de combustible?.....	3
1-1 Historia.....	3
2- Descripción.....	5
2-1 Principios de funcionamiento.....	5
Rendimiento.....	6
2-2 Tipos de celdas de combustible.....	7
2-3 Clasificación.....	7
Celdas de Ácido Fosfórico (PAFC).....	8
Celdas con Membrana de Intercambio de Protones (PEMFC).....	10
Celdas de Carbonato Fundido (MCFC).....	11
Celdas de Óxidos Sólidos (SOFC).....	12
Celdas de Combustible Alcalinas (AFC).....	13
Celdas de Combustible de Metanol Directo (DMFC).....	13
2-4 Consideraciones de diseño.....	14
3 – Combustibles.....	15
3-1 Hidrógeno.....	15
Procesos de obtención.....	15
Economía del Hidrógeno.....	18
¿Cuánto costaría el hidrógeno?.....	19
3-2 Metanol.....	20
Proceso de obtención.....	20



3-3 Etanol.....	21
Fuentes y proceso de fabricación.....	21
Etanol e hidrógeno.....	23
 4- Ámbitos de aplicación.....	24
4-1 El uso residencial del sistema de celdas de combustible.....	25
4-2 Vehículos , barcos, aviones y estaciones de servicio.....	26
<i>Un producto del mercado automotor, General Motor Sequel.....</i>	27
 5- Impacto ambiental.....	27
5-1 Potencial reducción de emisiones.....	27
 6- Tecnologías Actuales.....	28
6-1 Comparación con otras tecnología.....	28
6-2 Beneficios de la tecnología de celdas de combustible.....	30
6-3 Situación en la Argentina.....	30
Proyectos Nacionales.....	32
 7- Referencias.....	35



## 1- Introducción

### *¿Qué es una celda de combustible?*

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico cuyo concepto es similar al de una batería. Consiste en la producción de electricidad mediante el uso de químicos, que usualmente son hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno puede ser obtenido directamente del aire. También pueden ser usados otros tipos de combustibles que contengan hidrógeno en su molécula, tales como el gas metano, metanol, etanol, gasolina o diesel entre otros.

Una diferencia importante entre una batería y una celda de combustible es que esta última no se “gasta”, es decir, no dejará de producir energía mientras se le esté suministrando el combustible necesario para producirla, a diferencia de una batería, la cual tiene una vida útil determinada.

### 1-1 Historia

El principio de funcionamiento de la célula de combustible fue descubierto por el científico Christian Friedrich Schönbein en Suiza en 1838 y publicado en la edición de enero de 1839 del "*Philosophical Magazine*". De acuerdo con este trabajo, la primera celda de combustible fue construida en 1843 por Sir William Grove, un juez y científico galés que demostró que la combinación de hidrógeno y oxígeno generaba electricidad además de agua y calor, utilizando materiales similares a los usados hoy en día para la célula de ácido fosfórico. No fue hasta 1959 cuando el ingeniero británico Francis Thomas Bacon desarrolló con éxito una célula estacionaria de combustible de 5 kilovatios.

En 1959, un equipo encabezado por Harry Ihrig construyó un tractor basado en una célula de combustible de 15 kilovatios para Allis-Chalmers que fue expuesto en EE.UU. en las ferias del estado. Este sistema utilizó hidróxido de potasio como electrolito e hidrógeno y oxígeno comprimidos como reactivos.

Más adelante, en 1959, Bacon y sus colegas fabricaron una unidad de 5 kW capaz de accionar una máquina de soldadura, que condujo, en los años 60 a que las patentes de Bacon licenciadas por Pratt y Whitney en los Estados Unidos (al menos la idea original) fuesen utilizadas en el programa espacial de Estados Unidos para proveer a los



astronautas de electricidad y de agua potable a partir del hidrógeno y oxígeno disponibles en los tanques de la nave espacial.

Paralelamente a Pratt & Whitney Aircraft, General Electric desarrolló la primera pila de membrana de intercambio de protones (PEMFCs) para las misiones espaciales Gemini de la NASA. La primera misión que utilizó PEMFCs fue la Gemini V. Sin embargo, las misiones del Programa Apolo y las misiones subsecuentes Apolo-Soyuz, del Skylab, y del transbordador utilizaban celdas de combustible basadas en el diseño de Bacon, desarrollado por Pratt & Whitney Aircraft.

UTX, subsidiaria de UTC Power fue la primera compañía en fabricar y comercializar un sistema de células de combustible estacionario a gran escala, para su uso como central eléctrica de cogeneración en hospitales, universidades, y grandes edificios de oficinas. UTC Power continúa comercializándola bajo el nombre de PureCell 200, un sistema de 200 kilovatios, y sigue siendo el único proveedor para la NASA para su uso en vehículos espaciales, proveyendo actualmente al transbordador espacial. Además está desarrollando celdas de combustible para automóviles, autobuses, y antenas de telefonía móvil. En el mercado de automoción, UTC Power fabricó la primera capaz de arrancar a bajas temperaturas: la célula de membrana de intercambio de protones (PEM).

Los materiales utilizados eran extremadamente caros y las celdas de combustible requerían hidrógeno y oxígeno muy puros. Las primeras celdas de combustible solían requerir temperaturas muy elevadas que eran un problema en muchos usos. Sin embargo, se siguió investigando en celdas de combustible debido a las grandes cantidades de combustible disponibles (hidrógeno y oxígeno).

A pesar de su éxito en programas espaciales, estos sistemas se limitaron a aplicaciones especiales, donde el coste no es un problema. No fue hasta el final de los años 80 y principios de los 90 que las celdas de combustible se convirtieron en una opción real para uso más amplio. Varias innovaciones, catalizador con menos platino y electrodos de película fina bajaron su coste, haciendo que el desarrollo de sistemas PEMFC (para, por ejemplo, automóviles) comenzara a ser realista.

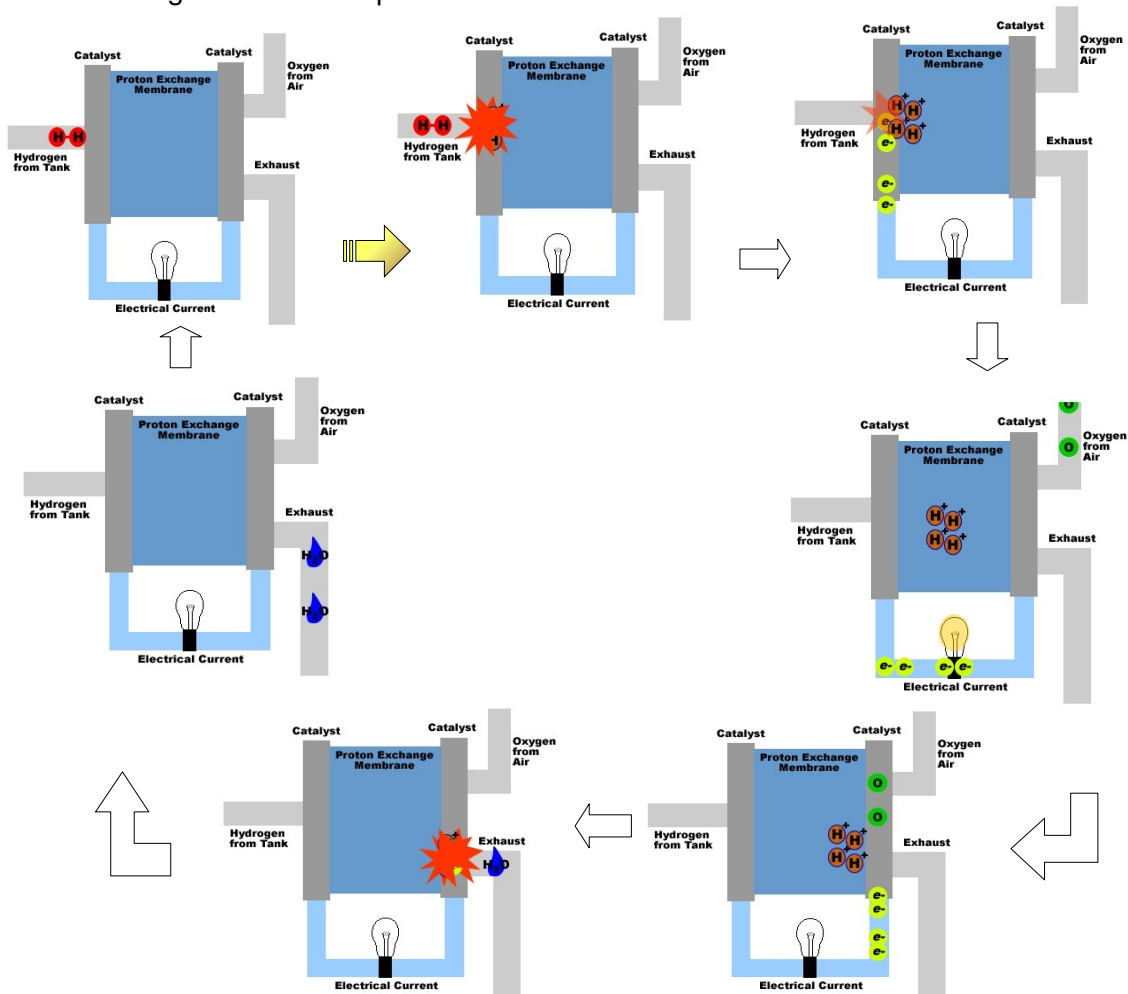
Hoy en día, la aplicación espacial ya no es la única de tipo práctico, puesto que las celdas de combustible están atravesando por un gran momento, al haber alcanzado una etapa tecnológica que les permite estar en posición de competir cada día más con las tecnologías convencionales de generación eléctrica, ofreciendo enormes ventajas sobre ellas.



## 2- Descripción

### 2-1 Principios de funcionamiento

La manera en que operan es mediante una celda electroquímica consistente en dos electrodos, un ánodo y un cátodo, separados por un aire pasa sobre un electrodo y el hidrógeno gas pasa sobre el otro. Cuando el hidrógeno es ionizado en el ánodo se oxida y pierde un electrón; al ocurrir esto, el hidrógeno oxidado (ahora en forma de protón) y el electrón toman diferentes caminos migrando hacia el segundo electrodo llamado cátodo. El hidrógeno lo hará a través del electrolito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor externo (carga). Al final de su camino ambos se vuelven a reunir en el cátodo donde ocurre la reacción de reducción o ganancia de electrones del oxígeno gas para formar agua junto con el hidrógeno oxidado. Así, este proceso produce agua 100% pura, corriente eléctrica y calor útil. A continuación describimos gráficamente el proceso mencionado:





## Rendimiento

El rendimiento de las celda de combustible, a diferencia de los motores de combustión (interna y externa) no está limitado por el ciclo de Carnot ya que no siguen un ciclo termodinámico. Por lo tanto, como convierten energía química en eléctrica directamente, éste es muy alto. El rendimiento  $\eta$  de una celda de combustible bajo condiciones estándares está limitado por el cociente entre la variación de la energía libre (estándar) de Gibbs<sup>[1]</sup>  $\Delta G^\circ$ , y la variación de la entalpía<sup>[2]</sup> estándar de la reacción química completa  $\Delta H^\circ$ . El rendimiento real es igual o normalmente inferior a este valor.

$$\eta = \frac{\Delta G^\circ}{\Delta H^\circ}$$

Una celda de combustible convierte normalmente la energía química de combustible en electricidad con un rendimiento aproximadamente del 50%. Sin embargo, éste depende en gran medida de la corriente que circula a través de la celda de combustible: cuanto mayor es la corriente, menor es el rendimiento. Para una de hidrógeno, el rendimiento (energía real/energía teórica) es igual a la tensión de la celda dividida por 1,23 voltios, a una temperatura de 25 °C. Esta tensión depende del combustible usado, de la calidad y de la temperatura de la célula. Una célula que funcione a 0,6 V tendrá un rendimiento cercano al 50%, lo que significa que el 50% de la energía contenida en el hidrógeno es convertida en energía eléctrica.

Una pila de combustible devuelve menos del 50 por ciento de la energía de entrada (esto se conoce como eficacia del proceso reversible), mientras que una batería de plomo y ácido mucho más barata puede devolver cerca de 90 por ciento. Hay que considerar también las pérdidas debidas a la producción, al transporte y al almacenaje. Los vehículos con célula de combustible que funcionan con hidrógeno comprimido tienen una eficiencia del 22% si el hidrógeno se almacena como gas a alta presión, y del 17% si se almacena como hidrógeno líquido.

Las células de combustible no pueden almacenar energía como una batería, sino que en algunos usos, como centrales eléctricas independientes basadas en

<sup>[1]</sup>**Nota:** La energía libre de formación estándar indica la tendencia que, a 1 atm de presión y 25 °C, tienen los elementos a formar un determinado compuesto.

<sup>[2]</sup>**Nota:** La variación de entalpía expresa la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.



fuentes "discontinuas" (solares, energía del viento), se combinan con electrolizadores y sistemas de almacenaje para formar un conjunto que almacene esta energía. El rendimiento del proceso reversible (de electricidad al hidrógeno y de nuevo a electricidad) de tales plantas se encuentra entre el 30 y el 40%.

## 2.2 Tipos de celdas de combustible

Básicamente se las clasifica según el combustible que utilizan, dado que ofrecen la posibilidad de utilizar casi cualquier combustible que contenga hidrógeno, aunque también hidrocarburos como el gas natural, metanol, etanol, biogás y propano, así como el diesel y la gasolina son los que mayor atención han recibido por razones de tipo práctico.

### 2-3 Clasificación

Nombre	Electrolito	Rango	Temperatura de trabajo	Eficiencia eléctrica	Estado
Celda de Combustible reversible (Reversible fuel cell)					Kit para la enseñanza
Energía azul (Blue Energy)	membrana de polietileno	Superior a 250 kW			Investigación
Celda de combustible biológica					
Celda de combustible de zinc					
Batería de flujo					Investigación
Pila de combustible alcalina (AFC)	solución alcalina	de 10 a 100 kW	inferior a 80°C	Celda: 60–70% Sistema: 62%	Comercializada / Investigación
Célula de	membrana	de 0,1 a	70–200 °C	Celda:	Comercializada



combustible de membrana de intercambio de protones (PEM FC)	polimérica (ionomer)	500 kW		50–70% Sistema: 30–50%	/ Investigación
Direct borohydride fuel cell (DBFC)	solución alcalina NaOH		70 °C		Investigación
Formic acid fuel cell (FAFC)	ácido fórmico		90–120 °C		Investigación
Direct methanol fuel cell (DMFC)	membrana polimérica	de pocos mW a 100 kW	90–120 °C	Celda: 20–30%	Comercializada / Investigación
Direct-ethanol fuel cell (DEFC)					Investigación
Phosphoric acid fuel cell (PAFC)	Ácido fosfórico	Superior a 10 MW	200 °C	Celda: 55% Sistema: 40%	Comercializada / Investigación
Molten carbonate fuel cell (MCFC)	Carbonato-Alcalino Fundido	100 MW	650 °C	Celda: 55% Sistema: 47%	Comercializada / Investigación
Protonic ceramic fuel cell (PCFC)	cerámica		700 °C		Investigación
Solid oxide fuel cell (SOFC)	Electrolito de Óxido Cerámico	Superior a 100 kW	800–1000 °C	Celda: 60–65% Sistema: 55–60%	Comercializada / Investigación

A continuación describiremos seis diferentes tipos de celdas de combustibles existente en el mercado internacional:

- **Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC):**

Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas, hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria. Las celdas de combustible de ácido fosfórico usan líquidos de este ácido como medio electrolítico, generan electricidad a más del 40% de eficiencia y cerca del 85% si el





vapor que ésta produce es empleado en cogeneración, comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna. Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 175-200 °C. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras. Como toleran el CO<sub>2</sub> pueden funcionar con combustibles derivados del carbono como metanol, etanol. Sus rangos de capacidad de generación de energía varían entre 200 KW y 100 MW. Los mayores progresos esperados están en las áreas de reducción de costos de capital, aumento de la vida útil de la pila, y reducción de costos de operación y mantenimiento.

La reacción total en las celdas de combustible es la combinación de Hidrógeno con Oxígeno, produciendo agua. En lugar de que se libere el total de energía libre como calor, parte de esta energía es liberada directamente como electricidad. El balance de energía se completa con la liberación de calor, reflejada en el aumento de la temperatura en la celda de combustible. El agua producida puede entrar en el medio electrolítico o perderse a través del cátodo como vapor. El cuidado en la administración de agua en el medio electrolítico puede ser necesario dependiendo de la temperatura de operación y otras condiciones.

En el caso de cogeneración, el hidrógeno requerido por las celdas de combustible es generado por gas natural en el proceso industrial de conversión catalítica de regeneración de calor. El vapor del proceso de regeneración es producido por el calor de las celdas de combustibles. El agua es condensada fuera del combustible y el vapor mezclado recircula a través del sistema. Este proceso puede ser llevado a cabo bajo ciertas temperaturas de operación y niveles de potencia de salida.

Este tipo de celdas se conectan en serie, los electrodos son de difusión con teflón como aglomerante de las partículas catalizadoras, soportadas por una lámina conductora. Los poros, en la región hidrófila del teflón, sirven como canales de difusión para los gases reactantes y productos. El hidrógeno se oxida electroquímicamente en la interfase catalizador-electrolito.

Los electrones se transportan a través de un circuito externo y los protones producidos pasan al cátodo para formar agua a través del electrolito, que está constituido por ácido fosfórico (95-100 %) contenido en una matriz inerte.

La composición del cátodo es básicamente la misma que la del ánodo, diferenciándose en que no está dopado y en que los espesores, tamaño de poro, etc., son los más adecuados para alcanzar las características de transferencia de masa



deseadas. Los protones producidos en el ánodo reaccionan con el oxígeno que se difunde a través de los poros del cátodo, según la reacción.

El agua de reacción se elimina por difusión a través del cátodo.

- **Celdas con Membrana de Intercambio de Protones (PEMFC):**

Estas celdas de combustible en comparación a las otras celdas operan a bajas temperaturas (entre 60-100 °C), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como en el caso de automóviles. De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, "son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios, y potencialmente para otras aplicaciones mucho más pequeñas como el reemplazo de baterías recargables en video cámaras y teléfonos celulares".

Estas celdas usan entre el ánodo y el cátodo un polímero conductor de protones como electrolito, el material de una membrana típica es Nafion. Además requieren de un catalizador comúnmente formado por Platino, el cual tiene la ventaja de ser resistente a la corrosión, pero su costo es muy elevado. El uso de este elemento se ha reducido con el mejoramiento de los materiales utilizados y las técnicas de fabricación.

Como el electrolito usado es ácido, éste tolera el CO<sub>2</sub> permitiendo que con ello este tipo de celdas opere con combustibles reformados de productos fósiles. Para ello el sistema requiere de un reformador o reactor químico que permita obtener el hidrógeno a partir de otro combustible más común y manejable como el gas natural, metanol u otro.

Dado que este tipo de celdas opera a bajas temperaturas (60-100°C) existe una mayor sensibilidad a la degradación del catalizador por parte del monóxido de carbono. El CO es absorbido por el platino en un electrolito ácido y bloquea el acceso del hidrógeno al ánodo. A bajas temperaturas las concentraciones de CO son mayores, degradando la efectividad de la celda. De este modo, en caso de utilizar un combustible diferente del hidrógeno, el monóxido de carbono proveniente de la vaporización del combustible fósil debe ser reducido.

La estructura del polímero es una membrana polímero orgánica sólida, usualmente ácido polyper-fluorosulfonic.



- **Celdas de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC):**

Las Celdas de Combustible de Carbonato Fundido prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles base carbón. Esta celda opera a temperaturas del orden de los 600-1000 °C. La primera pila de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración fueron terminadas en California en 1996.

Esta es un tipo de celda de combustible directa, que elimina los procesadores de combustible externos. Metano, el principal ingrediente del gas natural y vapor son convertidos en un gas rico en hidrógeno en el ánodo de regeneración o en la cámara de regeneración, la cual es parte de la celda de combustible. Esta celda tiene dos electrodos porosos en contacto con una sal fundida de Carbonatos de Litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) y Potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ). Opera a aproximadamente 650 °C.

En el cátodo, el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) son convertidos en iones de carbonatos. El electrolito permite a los iones viajar hacia el ánodo. En él, el Hidrógeno reacciona con los iones para formar agua y  $\text{CO}_2$ , y dos electrones son liberados. Conectando los electrodos a través de un circuito externo se completa el flujo de generación de corriente continua.

Las plantas de Carbono Fundido pueden alcanzar eficiencias eléctricas de 50%, que es considerablemente mayor a las logradas por las plantas de celdas de ácido fosfórico.

Pueden operar desde un 25 a un 125 % de sus valores nominales. De acuerdo a los datos preliminares de diseño (EPRI, 1992), una planta de 2 MW tendrá una superficie de 511 metros cuadrados y puede ser considerada tanto para instalaciones exteriores como interiores. Necesita más de 16 horas para alcanzar rangos de salida desde una partida en frío.

En este tipo de celda una pequeña cantidad de agua es requerida para su funcionamiento, no emite prácticamente partículas y las emisiones de  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$  son extremadamente bajas.



- **Celdas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC):**

La Celda de Combustible de Óxido Sólido, podría ser usada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de éstas en vehículos. Un sistema de Óxido Sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación alcance los 1000°C. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60%. Un tipo de Celda de Combustible de Óxido Sólido utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido semejando la parte superior de una lata de sopa.

Estas celdas utilizan un óxido sólido, usualmente circonio estimulado con óxido de itrio o de calcio ( $Y_2O_3$ )/ $ZrO_2$ , como electrolito. Opera a presiones atmosféricas elevadas y a alrededor de 1000°C. Por la alta temperatura de operación, estas celdas no necesitan platino u otro metal precioso como catalizador. Aparte de la rebaja en el costo que esto permite, hace que sean mucho más tolerantes a las impurezas como el CO. A esta temperatura, el electrolito se vuelve lo suficientemente conductivo como para permitir la oxidación de iones. La temperatura de los gases expulsados de las celdas van de 500 a 850°C, valores muy atractivos para realizar una cogeneración aumentando el rendimiento global del sistema o para usos de ciclos combinados.

Las SOFC conducen iones de oxígeno desde un electrodo de aire (cátodo), donde ellos se forman, a través de un medio sólido, hasta un electrodo de combustible (ánodo). Ahí, ellos reaccionan con el monóxido de carbono y el hidrógeno, liberando electrones y generando electricidad. La regeneración del gas natural u otros combustibles que contengan hidrocarburos puede ser llevada a cabo dentro del generador, eliminando la necesidad de un reformador externo. Celdas individuales son rodeadas por arreglos de celdas eléctricamente conectadas en serie o en paralelo, formando una estructura semi rígida que encierra el edificio del generador.

Existen numerosos desarrollos de tecnologías de celdas tipo SOFC que las convierten en atractivas alternativas para aplicaciones industriales. Una de ellas es su alta tolerancia a las impurezas de los combustibles, gracias a su alta temperatura de trabajo. El electrolito sólido es muy estable; además de evitarse problemas como la



migración de electrolito, fugas y otros. Además se puede llegar a fabricar electrolitos sumamente densos.

- **Celdas de Combustible Alcalinas (AFC):**

Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito. El cual es un elemento alcalino y operan en los mismos rangos que las celdas PEM (50-100°C). Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación.

Utilizan una disolución acuosa de KOH como electrolito y operan a baja temperatura, alimentando el ánodo con  $H_2$  puro y el cátodo con  $O_2$  puro. Para poder trabajar con esos gases a baja presión (1-2 bar) y conseguir las temperaturas señaladas, se requiere el empleo de catalizadores de metales nobles. Esta desventaja significativa, unida a la necesidad de evitar el  $CO_2$  que reacciona con el electrolito, limita actualmente el empleo de este tipo de pila a un número muy reducido de aplicaciones.

Además, se precisan sistemas de purificación complejos y costos para que el  $H_2$  y  $O_2$  puros, requeridos en las zonas anódica y catódica, cumplan las especificaciones de calidad exigidas por esta pila en un funcionamiento prolongado. Por tanto, sólo tiene sentido plantearse su utilización si se dispone de hidrógeno de elevada pureza.

- **Celdas de Combustible de Metanol Directo (DMFC):**

Como su nombre indica, se usa metanol como combustible en este tipo de celdas. En las celdas de este tipo, el metanol líquido se oxida directamente en el ánodo. Esta celda no utiliza hidrógeno, trabaja a bajas temperaturas y es relativamente nueva en comparación a las otras celdas.

Recientes adelantos en investigación y desarrollo en las celdas de combustible de metanol directo han sido sustanciales. Sin embargo, existen obstáculos críticos en



relación a la producción de corriente alta, la cantidad necesaria del catalizador de platino es todavía muy costosa en comparación a las del tipo PEM.

Como el combustible metanol cruza a través de la membrana del ánodo al cátodo, hace disminuir la actuación del cátodo y gasta combustible.

Las ventajas de abastecer de metanol a la celda son significativas. Este tipo de celda no requiere de un voluminoso y pesado sistema de almacenamiento de hidrógeno o de un subsistema reformador. Esta es una ventaja, en términos de simplicidad y costo.

## 2-3 Consideraciones de diseño

- *Costes:* En 2002, las celdas típicas tenían un coste debido al catalizador de 850 € (aprox. 1000 USD) por kilovatio energía eléctrica útil; sin embargo, se espera que antes de 2007, sea reducida a unos 25 € (aprox. 30 USD) por kilovatio.

Los costes MEA (del inglés *Membrane Electrode Assembly*, o montaje del electrodo de la membrana) del PEM (membrana intercambiadora de protones) varían según el fabricante. Así, la membrana de Nafion de aprox. 400 €/m<sup>2</sup> utilizada en la membrana PEM de Toyota y 3M está siendo substituida por la membrana de la ITM Power, con un precio alrededor de 4 €/m<sup>2</sup> (2004). Esta membrana nueva es un hidrocarburo-polímero. Una compañía holandesa que ha realizado grandes inversiones en este terreno está utilizando Solupor (un film de polietileno poroso).

- *Gestión del agua en las PEMFC:* En este tipo de celdas de combustible, la membrana debe hidratarse, requiriendo evaporar el agua exactamente en la misma medida en que ésta es producida. Si el agua se evapora demasiado rápido, la membrana se seca, la resistencia a través de ella aumenta, y se agrietará, creando un "corto circuito" de gas donde el hidrógeno y el oxígeno se combinan directamente, generando calor que dañará la celda de combustible. Si el agua se evapora demasiado lentamente, los electrodos se inundarán, evitando que los reactivos puedan alcanzar el catalizador y se parará la reacción. Uno de los objetivos más importantes en la investigación sobre células de combustible es la adecuada gestión del agua.



- *Gestión de la temperatura:* Se debe mantener la misma temperatura en toda la celda para evitar la destrucción de la celda por fatiga térmica.
- *Control de flujo:* Al igual que en un motor de combustión, hay que mantener una relación constante entre el reactivo y el oxígeno para que la celda funcione eficientemente.
- *Durabilidad, vida, y requisitos especiales para ciertos tipos de celdas:* Los usos estacionarios requieren normalmente más de 40.000 horas operativas fiables a una temperatura de  $-35^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$ , mientras que las células de combustible para automoción requieren al menos de 5.000 horas (el equivalente a unos 200.000 kilómetros) bajo temperaturas extremas. Las aplicaciones para automoción deben además permitir el arranque en frío hasta  $-30^{\circ}\text{C}$  y poseer una alta potencia por unidad de volumen (típicamente 2.5 kW por litro).
- *Tolerancia limitada al CO (monóxido de carbono)*

### **3- Combustibles**

#### **3-1 Hidrógeno**

##### *Procesos de Obtención*

- *Fotosíntesis artificial*

La fotosíntesis artificial es un campo de investigación que intenta imitar la fotosíntesis natural de las plantas, con el fin de convertir dióxido de carbono y agua en carbohidratos y en oxígeno, utilizando para ello la luz del Sol. A veces, la separación artificial del agua en hidrógeno y en oxígeno utilizando la energía de la luz del Sol también es llamada fotosíntesis artificial.

La fotosíntesis natural consta de 2 fases: la reacción dependiente de la luz, y la reacción independiente de la luz. También la fotosíntesis artificial constará de 2 partes, si bien con diferencias en su desarrollo.

En la primera fase de la artificial, se logrará la separación del hidrógeno y del oxígeno, en una forma resumida y rápida de la fotosíntesis natural, que consta de más etapas. Este hidrógeno obtenido ya puede ser empleado en máquinas que se

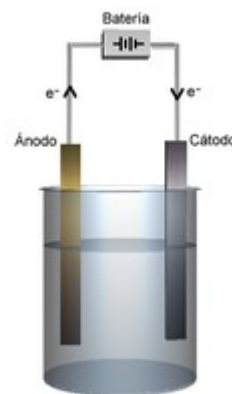


alimenten de hidrógeno para producir energía de forma limpia. Pero podemos ir más allá en la imitación y aprovechamiento de la fotosíntesis natural. En la segunda fase de la natural, las plantas convierten dióxido de carbono en glucosa (ciclo de Calvin). La glucosa es la manera en la que las plantas almacenan energía para su desarrollo y crecimiento. Entonces, se ha sugerido aplicar este mismo procedimiento a escala industrial, con el fin de ayudar a contener el calentamiento global. Específicamente, la reacción independiente de la luz podría ser utilizada para "barrer" el exceso de dióxido de carbono de la atmósfera.

### ● *Electrólisis*

La Electrólisis es un proceso para separar un compuesto en los elementos que lo conforman, usando para ello la electricidad. La palabra *Electrólisis* viene de las raíces *electro*, electricidad y *lisis*, separación. El proceso consiste en lo siguiente:

- Se funde o se disuelve el electrólito en un determinado disolvente, con el fin de que dicha sustancia se separe en iones (ionización).
- Se aplica una corriente eléctrica continua mediante un par de electrodos conectados a una fuente de alimentación eléctrica y sumergidos en la disolución. El electrodo conectado al polo negativo se conoce como cátodo, y el conectado al positivo como ánodo.
- Cada electrodo mantiene atraídos a los iones de carga opuesta. Así, los iones negativos, o aniones, son atraídos al ánodo, mientras que los iones positivos, o cationes, se desplazan hacia el cátodo.
- La energía necesaria para separar a los iones e incrementar su concentración en los electrodos es aportada por la fuente de alimentación eléctrica.
- En los electrodos se produce una transferencia de electrones entre estos y los iones, produciéndose nuevas sustancias. Los iones negativos o aniones ceden electrones al ánodo (+) y los iones positivos o cationes toman electrones del cátodo (-).



En definitiva lo que ha ocurrido es una reacción de oxidación-reducción, donde la fuente de alimentación eléctrica ha sido la encargada de aportar la energía necesaria.





Si el agua no es destilada, la electrólisis no sólo separa el Oxígeno y el hidrógeno, sino los demás componentes que estén presentes como sales, metales y algunos otros minerales.

Es importante tomar en cuenta varios puntos:

- Nunca debe juntar los electrodos, ya que la corriente eléctrica no va a hacer su proceso y la batería se va a sobre calentar y se quemará.
- Debe utilizar siempre Corriente continua (energía de baterías o de adaptadores de corriente), NUNCA Corriente alterna (energía de enchufe)
- La electrólisis del cation debe hacerse de tal manera que los dos gases desprendidos no entren en contacto, de lo contrario se juntarían de nuevo produciendo una mezcla peligrosamente explosiva. Una manera de producir agua otra vez es mediante la exposición a un catalizador. El más comúnmente conocido es el calor. Otro es la presencia de platino en forma de lana fina o polvo. El segundo caso debe hacerse con mucho cuidado, incorporando cantidades pequeñas de hidrógeno en presencia de oxígeno y el catalizador, de esta manera el hidrógeno se quema suavemente, produciendo una llama. Lo contrario nunca debe hacerse.

### ● *Hidrólisis*

La hidrólisis es una reacción química del agua con una sustancia. Entre las sustancias que pueden sufrir esta reacción se encuentran numerosas sales, que al ser disueltas en agua, sus iones constituyentes se combinan con los iones hidronio u oxonio,  $\text{H}_3\text{O}^+$  o bien con los iones hidroxilo,  $\text{OH}^-$ , o ambos. Dichos iones proceden de la disociación o autoprotólisis del agua. Esto produce un desplazamiento del equilibrio de disociación del agua y como consecuencia se modifica el valor del pH.

Las sales de los ácidos débiles o bases débiles se hidrolizan por acción del agua, dependiendo, el grado de la reacción, de la debilidad del ácido o la base. Es decir, cuanto más débil sea el ácido o la base, mayor es la hidrólisis.

Es un tipo de reacción química en la que una molécula de agua, con fórmula  $\text{H}_2\text{O}$ , reacciona con una molécula de una sustancia AB, en la que A y B representan átomos o grupos de átomos. En la reacción, la molécula de agua se descompone en los fragmentos  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ , y la molécula AB se descompone en  $\text{A}^+$  y  $\text{B}^-$ . A continuación, estos fragmentos se unen proporcionando los productos finales AOH y HB. A este tipo de reacción se le conoce a menudo como doble descomposición o intercambio. De

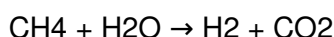


interés especial es la hidrólisis de diversas sales que origina disoluciones ácidas o básicas.

- *Reformado con vapor*

El reformado con vapor es un método para la obtención de hidrógeno a partir de hidrocarburos.

Este proceso consiste en exponer al gas natural, de alto contenido de metano, con vapor de agua a alta temperatura y presión. Se obtienen como resultado de la reacción química; hidrógeno y dióxido de carbono, y dependiendo el compuesto reformado, también monóxido de carbono. Este proceso tiene una eficiencia de 65%, y en el caso de que el gas natural contenga azufre, este debe ser eliminado mediante la desulfuración. El proceso se lleva a cabo mediante dos reacciones, la primera es la reacción de Water Gas Shift entre el agua y el CH<sub>4</sub>:



La primera reacción de reformado tiene lugar entre 800–900 °C a una presión de 25 bars, obteniéndose un gas rico en CO<sub>2</sub> e hidrógeno y CO en menor cantidad. Se elimina primeramente el CO por medio de las reacciones de cambio de alta a baja temperatura (High Temperature y Low Temperature Shift) a 400 y 200 °C respectivamente y se produce una mezcla gaseosa de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y un poco de CO y CH<sub>4</sub>. Después de esta etapa se realiza una última purificación, mediante el proceso Pressure Swing Adsorption (PSA), el cual permite obtener hidrógeno puro al 99.99%, cuyo contenido energético es mayor que del gas natural del cual precede.

## Economía del Hidrógeno y disponibilidad

Una economía de hidrógeno es un modelo económico en el cual la energía, para los usos móviles y oscilación de carga, se almacena como hidrógeno (H<sub>2</sub>). El hidrógeno se ha propuesto como reemplazo para la gasolina y combustibles diesel utilizados actualmente en automóviles. La producción del hidrógeno es un sector industrial considerable, y es cada vez mayor. En 2004 se produjeron unas 50 millones de toneladas métricas de hidrógeno, conteniendo 200 gigavatios de energía; la tasa de



crecimiento es de alrededor de un 10% por año. Debido a que el almacenaje y transporte de hidrógeno es caro, la mayor parte del hidrógeno que se produce en la actualidad se hace localmente, y es utilizado inmediatamente, generalmente por la misma compañía productora. En 2005, el valor económico de todo el hidrógeno producido es de aproximadamente 135 mil millones de USD por año.

Hoy hay dos principales aplicaciones para el hidrógeno. Casi la mitad se emplea para producir amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) mediante el proceso de Haber, el cual se utilizará sobre todo como fertilizante, directa o indirectamente. A causa de que la superpoblación mundial y la agricultura intensiva crecen, debido a esto la demanda del amoníaco (y por tanto de hidrógeno) está creciendo. La otra mitad de la producción actual del hidrógeno se utiliza para convertir cadenas largas de hidrocarburos (que son la mayoría del petróleo sin refinar) en fracciones más ligeras, convenientes para su uso como combustibles. Este último proceso se conoce como hydrocracking. Hydrocracking representa un área incluso de mayor crecimiento que la del amoníaco, los incrementos en los precios del petróleo animan a las compañías petroleras a extraer un material más pobre, como pueden ser arenas de alquitrán y pizarra de petróleo.

Actualmente, el 48% de la producción de hidrógeno es a partir del gas natural, el 30% del petróleo, y el 18% del carbón; la electrólisis del agua representa solamente 4%.

El gran mercado y el incremento también han estimulado que se cree un gran interés en buscar métodos alternativos, más baratos, para la producción de hidrógeno.

### *¿Cuánto costaría el hidrógeno?*

Un estudio reciente de la National Academy of Engineering (Academia Nacional de Ingeniería de EE UU) proyectó los costos futuros para la producción y distribución de  $\text{H}_2$ . Las plantas centralizadas que lo producen a partir de gas natural o carbón y que lo almacenan en forma comprimida actualmente cobran cerca de US\$2 por kilogramo. (Un kilo de  $\text{H}_2$  equivale aproximadamente a la energía de 3.78L de gasolina, cuyo costo se estableció durante el estudio en US\$1.12.) Añada a eso otros US\$1.50 por hacer  $\text{H}_2$  líquido. En el futuro, los costos deberán caer a 40 centavos de dólar por el  $\text{H}_2$  comprimido y US\$1.30 por el líquido. Esto hace que el costo actual en una estación tipo gasolinera sea de cerca de US\$3.50 por kilo de  $\text{H}_2$  obtenido de la



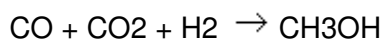
reforma de gas natural y de US\$6.50 por electrolisis. Se predice que los costos caerían a US\$2.30 y US\$3.90 en el futuro.

## 3-2 Metanol

### *Proceso de obtención*

Originariamente se producía metanol por destilación destructiva de astillas de madera. Esta materia prima condujo a su nombre de alcohol de madera. Este proceso consiste en destilar la madera en ausencia de aire a unos 400 °C formándose gases combustibles (CO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>), empleados en el calentamiento de las retortas; un destilado acuoso que se conoce como ácido piroleñoso y que contiene un 7-9% de ácido acético, 2-3% de metanol y un 0.5% de acetona; un alquitrán de madera, base para la preparación de antisépticos y desinfectantes; y carbón vegetal que queda como residuo en las retortas.

Actualmente, todo el metanol producido mundialmente se sintetiza mediante un proceso catalítico a partir de monóxido de carbono e hidrógeno. Esta reacción emplea altas temperaturas y presiones, y necesita reactores industriales grandes y complicados.

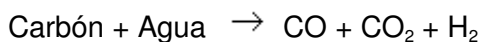


La reacción se produce a una temperatura de 300-400 °C y a una presión de 200-300 atm. Los catalizadores usados son ZnO o Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

El gas de síntesis (CO + H<sub>2</sub>) se puede obtener de distintas formas. Los distintos procesos productivos se diferencian entre sí precisamente por este hecho. Actualmente el proceso más ampliamente usado para la obtención del gas de síntesis es a partir de la combustión parcial del gas natural en presencia de vapor de agua.



Sin embargo el gas de síntesis también se puede obtener a partir de la combustión parcial de mezclas de hidrocarburos líquidos o carbón, en presencia de agua.





En el caso de que la materia prima sea el carbón, el gas de síntesis se puede obtener directamente bajo tierra. Se fracturan los pozos de carbón mediante explosivos, se encienden y se fuerzan aire comprimido y agua. El carbón encendido genera calor y el carbono necesarios, y se produce gas de síntesis. Este proceso se conoce como proceso in situ. Este método no tiene una aplicación industrial difundida. Los procesos industriales más ampliamente usados, usando cualquiera de las tres alimentaciones (gas natural, mezcla de hidrocarburos líquidos o carbón) son los desarrollados por las firmas Lurgi Corp. e Imperial Chemical Industries Ltd. (ICI).

### 3-3 Etanol

#### *Fuentes y proceso de fabricación*

Desde la antigüedad se obtiene el etanol por fermentación anaeróbica de azúcares con levadura en solución acuosa y posterior destilación. La aplicación principal tradicional ha sido la producción de bebidas alcohólicas.

Hoy en día se utilizan varios tipos de materias primas para la producción a gran escala de etanol de origen biológico (*bioetanol*):

- Sustancias con alto contenido de sacarosa: caña de azúcar, remolacha, melazas, sorgo dulce.
- Sustancias con alto contenido de almidón: maíz, patata, yuca.
- Sustancias con alto contenido de celulosa: madera, residuos agrícolas (incluyendo los residuos de los cítricos)

El proceso a partir de almidón es más complejo que a partir de sacarosa, pues el almidón debe ser hidrolizado previamente para convertirlo en azúcares. Para ello se mezcla el vegetal triturado con agua y con una enzima (o en su lugar con ácido), y se calienta la papilla obtenida a 120 - 150°C. Posteriormente se cuele la masa, en un proceso llamado escarificación, y se envía a los reactores de fermentación.

A partir de celulosa es aun más complejo, ya que primero hay que pre-tratar la materia vegetal para que la celulosa pueda ser luego atacada por las enzimas hidrolizantes. El pre-tratamiento puede consistir en una combinación de trituración, pirólisis y ataque con ácidos y otras sustancias. Esto es uno de los factores que



explican por qué los rendimientos en etanol son altos para la caña de azúcar, mediocres para el maíz y bajos para la madera.

La fermentación de los azúcares es llevada a cabo por microorganismos (levaduras o bacterias) y produce etanol, así como grandes cantidades de  $\text{CO}_2$ . Además produce otros compuestos oxigenados indeseables como el metanol, alcoholes superiores, ácidos y aldehídos. Típicamente la fermentación requiere unas 48 horas.

En la actualidad tres países han desarrollado programas significativos para la fabricación de bioetanol como combustible: Estados Unidos (a partir de maíz), Brasil y Colombia (ambos a partir de caña de azúcar). El etanol se puede producir a partir de otros tipos de cultivos, como remolachas, zahína, mijo perenne, cebada, cáñamo, kenaf, patatas, mandioca y girasol. También puede extraerse de múltiples tipos de celulosa "no útil". Esta producción a gran escala de alcohol agrícola para utilizarlo como combustible requiere importantes cantidades de tierra cultivable con agua y suelos fértiles.

Gracias en parte al uso de etanol, Brasil ha reducido su dependencia de petróleo extranjero.

Se pueden obtener cantidades más reducidas de alcohol combustible de los tallos, de elementos reciclados, de la paja, de las mazorcas de maíz, y de productos sobrantes de las granjas que ahora se utilizan para hacer piensos, fertilizantes, o que se utilizan como combustibles de plantas de energía eléctrica. De hecho, EEUU podría conseguir todo el etanol que necesita usando una mezcla de, por ejemplo, los tallos (parte no aprovechada) del maíz y de la planta de maíz, sin roturar más tierras de labrantío (sin embargo, habría que cultivar más tierra para substituir ese material, usado por muchos granjeros como fuente barata, confiable y limpia de piensos o fertilizantes).

### *Purificación*

El método más antiguo para separar el etanol del agua es la destilación simple, pero la pureza está limitada a un 95-96% debido a la formación de un azeótropo de agua-etanol de bajo punto de ebullición. En el transcurso de la destilación hay que desechar la primera fracción que contiene principalmente metanol, formado en reacciones secundarias, éste es el único método admitido para obtener etanol para el consumo humano.



Para poder utilizar el etanol como combustible mezclándolo con gasolina, hay que eliminar el agua hasta alcanzar una pureza del 99,5 al 99,9%. El valor exacto depende de la temperatura, que determina cuándo ocurre la separación entre las fases agua e hidrocarburos.

Para obtener etanol libre de agua se aplica la destilación azeotrópica en una mezcla con benceno o ciclohexano. De estas mezclas se destila a temperaturas más bajas el azeótropo, formado por el disolvente auxiliar con el agua, mientras que el etanol se queda retenido. Otro método de purificación muy utilizado actualmente es la adsorción física mediante tamices moleculares.

A escala de laboratorio, también se pueden utilizar desecantes como el magnesio, que reacciona con el agua formando hidrógeno y óxido de magnesio.

### *Etanol e hidrógeno*

El hidrógeno se está analizando como combustible alternativo, creando la economía del hidrógeno. Dado que el hidrógeno en su estado gaseoso ocupa un volumen muy grande comparado a otros combustibles, la logística se convierte en un difícil problema. Una posible solución es utilizar el etanol para transportar el hidrógeno (en la molécula de etanol), para después liberar el hidrógeno del carbono asociado en un reformador de hidrógeno y así alimentar una celda de combustible con el hidrógeno liberado. Alternativamente, algunas celdas de combustible (Direct Ethanol Fuel Cell DEFC) se pueden alimentar directamente con etanol o metanol. A fecha de 2005, las células de combustible pueden procesar el metanol más eficientemente que el etanol.

A principios de 2004, los investigadores de la universidad de Minnesota anunciaron la invención de un reactor simple de etanol (combustible con el que se alimentaría), que a través de un apilado de catalizadores, emitiría hidrógeno que a su vez podría ser utilizado en la pila de combustible. El dispositivo utiliza un catalizador del rodio-cerio para la reacción inicial, que ocurre a una temperatura de cerca de 700 °C. Esta reacción inicial mezcla el etanol, el vapor de agua y el oxígeno, y produce considerables cantidades de hidrógeno. Desafortunadamente, también da lugar a la formación de monóxido de carbono, una sustancia que obstruye la mayoría de las células de combustible, y se debe pasar a través de otro catalizador en el que se convertirá en dióxido de carbono. Por otra parte, el monóxido de carbono (inodoro, incoloro, e insípido), también representa un peligro tóxico significativo si se escapa a



través de la celda de combustible o en los conductos entre las secciones catalíticas.

Los productos resultantes del dispositivo son gas de hidrógeno (casi un 50%), nitrógeno (30%), y un 20% restante constituido fundamentalmente por dióxido de carbono. El nitrógeno y el dióxido de carbono son bastante inertes cuando la mezcla se bombea en una célula de combustible apropiada. El dióxido de carbono se libera nuevamente a la atmósfera, donde puede ser reabsorbido por la planta de la que se extrae el etanol, cerrando así el ciclo. El ciclo en teoría no presenta un aumento neto de dióxido de carbono, aunque se podría discutir que mientras está en la atmósfera, actúa como gas invernadero.

#### 4- Ámbitos de aplicación

Las celdas de combustible son muy útiles como fuentes de energía en lugares remotos, como por ejemplo naves espaciales, estaciones meteorológicas alejadas, parques grandes, localizaciones rurales, y en ciertos usos militares. Un sistema con celda de combustible que funciona con hidrógeno puede ser compacto, ligero y no tiene piezas móviles importantes.

Aplicaciones de cogeneración (uso combinado de calor y electricidad) para viviendas, edificios de oficinas y fábricas. Este tipo de sistema genera energía eléctrica de manera constante (vendiendo el exceso de energía a la red cuando no se consume), y al mismo tiempo produce aire y agua caliente gracias al calor que desprende. Las celdas de combustible de Ácido fosfórico (PAFC *Phosphoric-Acid Fuel Cells*) abarcan el segmento más grande de aplicaciones de cogeneración en todo el mundo y pueden proporcionar eficacias combinadas cercanas al 80% (45-50% eléctrico + el resto como térmica). El mayor fabricante de células de combustible de PAFC es UTC Power, una división de United Technologies Corporation. También se utilizan celdas de combustible de carbonato Fundido (MCFC *Molten Carbonate Fuel Cell*) con fines idénticos, y existen prototipos de celdas de óxido sólido (SOFC *Solid-Oxide Fuel Cell*).

Los sistemas electrolizadores no almacenan el combustible en sí mismos, por lo que necesitan de unidades de batería externas, lo que supone un problema serio para áreas rurales. En este caso, las baterías tienen que ser de gran tamaño para satisfacer la demanda del almacenaje, pero aun así esto supone un ahorro con respecto a los dispositivos eléctricos convencionales.





Existe un programa experimental en Stuart Island en el estado de Washington, donde la compañía Stuart Island Energy Initiative ha construido un sistema completo en el cual los paneles solares generan la corriente para hacer funcionar varios electrolizadores que producen hidrógeno. Dicho hidrógeno se almacena en un tanque de 1900 litros, a una presión de 10 a 80 bar. Este combustible finalmente se utiliza para hacer funcionar una celda de combustible de hidrógeno de 48 V ReliOn que proporciona suficiente energía eléctrica para fines residenciales en la isla.

Protium, una banda de rock formada en la Ponaganset High School, en Glocester, fue el primer conjunto musical del mundo en utilizar celdas de combustible de hidrógeno para proveerse de energía. La banda utilizaba un Airgen Fuelcell de 1kw Ballard Power systems. El conjunto ha tocado en numerosos eventos relacionados con las celdas de combustible incluyendo el CEP de Connecticut, y el 2003 Fuel Cell Seminar en Miami beach.

Plug Power Inc. es otra compañía importante en el diseño, desarrollo y fabricación de celdas de combustible PEM para aplicaciones estacionarias, incluyendo productos dirigidos a las telecomunicaciones, energía básica, y aplicaciones de cogeneración.

#### 4-1 El uso residencial del sistema de celdas de combustible

Las celdas de combustible pueden producir energía a diferentes niveles de demanda mientras exista una fuente continua de hidrógeno. Hacia finales del año 2002 estos sistemas comenzaron a desarrollarse, estando disponibles en el mercado en un tamaño de aproximadamente un refrigerador y pudiéndole proporcionar suficiente electricidad (entre 4 y 10 kw) a una casa de aproximadamente 200m<sup>2</sup>.

El sistema de celdas de combustible podrá trabajar en conjunto con la red interna de una casa, independientemente o en combinación. La función y uso de éstas dependerá de la demanda de electricidad existente, el costo de la electricidad, y de la disponibilidad en ciertos lugares de la red de energía eléctrica. Muy propicio para lugares remotos. La reglamentación concerniente a la interconexión del sistema celdas de combustible con el cableado interno residencial, aún se encuentra en desarrollo en los Estados Unidos.



## 4-2 Vehículos, barcos, aviones y estaciones de servicio

La primera estación de reabastecimiento de hidrógeno como combustible fue abierta en Reykjavík, Islandia en abril de 2003. Esta estación abastece a tres autobuses construidos por DaimlerChrysler y que prestan servicio en la red de transporte público de Reykjavík. La propia estación produce el hidrógeno que necesita, gracias a una unidad electrolizadora (fabricada por Norsk Hydro), y no necesita ser abastecida externamente: los únicos suministros necesarios son electricidad y agua. Shell también participa en el proyecto. La estación no tiene cubierta, para que en caso de peligro el hidrógeno pueda escapar libremente a la atmósfera.

Hay numerosos prototipos y modelos de coches y autobuses basados en la tecnología de la pila de combustible. Las empresas de automoción siguen investigando y ya han llegado a fabricar algunos prototipos. Compañías como DaimlerChrysler, Ballard Power Systems, Ford, Volvo, Mazda, General Motors, Honda, BMW, Hyundai, o Nissan, entre otras. Según la industria del automóvil se espera que los primeros vehículos comerciales estén disponibles en el 2010.



Los submarinos Type 212A, un avanzado diseño alemán no nucleares, utiliza pilas de combustible (desarrolladas por Siemens) para alimentar nueve propulsores y puede mantenerse sumergido durante semanas sin tener que subir a la superficie.

En abril de 2008, en Toledo (España), la compañía Boeing hizo volar el primer avión propulsado por pila de hidrógeno. De manera parecida Airbus está desarrollando un prototipo de avión que utiliza esta tecnología.

Actualmente, un equipo de estudiantes universitarios llamado Energy-Quest está preparando un barco accionado por esta tecnología para hacer un viaje alrededor del mundo, así como otros proyectos usando combustibles más eficientes o renovables. Su empresa se llama Tritón.



### *Un producto del mercado automotor, General Motor Sequel*

El General Motors Sequel es un prototipo de automóvil de la marca estadounidense de automóviles General Motors. Emplea un sistema de propulsión HydroGen3 desarrollado por Opel, que se compone de un motor eléctrico alimentado mediante pilas de combustible. Tiene una autonomía de 300 millas (500 km), acelera de 0 a 60mph en menos de diez segundos, y su única emisión es agua. Se estrenó en el Salón del Automóvil de Detroit de 2005 y en el Salón del Automóvil de Ginebra de 2007. El jefe de General Motors, Rick Wagoner, sugirió entonces que un modelo similar se comenzaría a producir al menos dentro de diez años.

## **5- Impacto Ambiental**

### **5-1 Potencial reducción de emisiones**

Las celdas de combustible son muy atractivas para usos avanzados por su alta eficacia y además debido a que la emisión de contaminantes es prácticamente nula y teniendo en cuenta que se estaría emitiendo agua en forma de vapor al ambiente, esto contribuiría a mejorar la calidad del aire. Ya que no se estaría emitiendo los gases tradicionales que causan efectos negativos sobre la tierra como son los NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> entre otros, ayudando de esa manera a mejorar la calidad de vida de los seres vivientes, disminuyendo de esa manera el número de personas con enfermedades respiratorias y en todo el planeta se disminuiría el efecto invernadero, causado por el CO<sub>2</sub>, y la lluvia ácida.

Sin embargo, ya que la producción, compresión, enfriamiento y transporte del hidrógeno requieren de energía, el impacto global del uso de celdas de combustibles depende mucho de los métodos y materias primas usadas. Si los combustibles fósiles se usan como una fuente de hidrógeno, y, además, la energía requerida para generar gas de hidrógeno también se obtiene de los combustibles fósiles (ejemplo gas natural), entonces se generará dióxido de carbono en el lugar de producción en cantidades similares, o incluso mayores, que si los combustibles fósiles fueran usados directamente en el auto.

Si por otro lado, las fuentes de energía renovables (ejemplo, energía hidroeléctrica, solar o del viento) se usan para la generación de hidrógeno, manejo y transporte,



entonces las celdas de combustible ahorran montos significativos de gases de invernadero en comparación a la combustión de combustibles fósiles.

En tal caso, una evaluación de ciclo de vida tendrá que llevarse a cabo, tomando en consideración las condiciones locales específicas, como para determinar los efectos ambientales totales del uso de celdas de combustibles, comparadas con el combustible diesel. Se espera de parte de los fabricantes de celdas de combustible que los sistemas de celdas de combustible tengan un equilibrio de energía general mejor comparado al uso directo de hidrógeno en un motor de combustión interna de un auto, como por ejemplo el practicado por BMW.

## **6- Tecnologías Actuales**

### **6-1 Comparación con otras tecnologías**

Los mayores avances en generación de energía eléctrica a partir de tecnologías convencionales están representados por aquellos surgidos del programa ATS (Advanced Turbine Systems), sistemas modernos de turbina (del Departamento de Energía de los Estados Unidos) para sistemas de generación de ciclo combinado. Dichos avances han alcanzado límites históricos al conseguir diseños de sistemas de turbinas a gas con eficiencias que prometen mejoras de 15% en sistemas industriales, mientras que centrales de potencia utilizando sistemas de ciclo combinado (sistemas con dos o más fuentes de electricidad a partir del mismo combustible) podrán alcanzar valores alrededor de 55% de eficiencia térmica neta. Estos sistemas modernos operarán a costos 10% menores que los actuales sistemas y reducirán los niveles de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, e hidrocarburos no quemados según proyecciones del mismo ATS. A pesar de esto, dichos avances están alcanzando los límites de temperatura de operación de los materiales actuales debido a que la eficiencia del sistema a turbina depende de la temperatura de entrada de los gases, limitada por el daño potencial de las hojas de la turbina misma. A diferencia de estos sistemas avanzados, la eficiencia en las celdas de combustible no está limitada por la temperatura. Desde la perspectiva de gases de efecto invernadero, las celdas de combustible representan un desarrollo potencialmente revolucionario, ya que en lugar de utilizar combustión para generar electricidad utilizan la reacción electroquímica entre el hidrógeno del combustible y el oxígeno del aire para producir electricidad, agua y calor. Es también cierto que cuando una celda de combustible utiliza hidrocarburos como fuente de hidrógeno (gas natural, metanol, etcétera) generalmente requerirá una etapa de reformación para extraer el



hidrógeno, lapso durante el cual producirá CO<sub>2</sub>. No obstante, gracias a su capacidad de obtener altas eficiencias de conversión combustible/electricidad, las celdas de combustible producen la menor cantidad de CO<sub>2</sub> de cualquier tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar electricidad, por lo que las emisiones de este gas por kWh producido son mucho menores en las celdas de combustible, que los valores prometidos, por ejemplo, por los sistemas avanzados de turbina tanto en los sistemas actuales como en los sistemas proyectados en los próximos años de ambas tecnologías [Boosting Powerplant Efficiency, 1998]. Otra diferencia fundamental es la alta flexibilidad que tienen las celdas para aceptar una gran diversidad de combustibles, lo cual las ubica como una tecnología que permite una transición hacia tecnologías limpias y el uso de fuentes de energía renovables. Las celdas de combustible ya se consideran como elementos clave para sistemas híbridos que las integran, junto con tecnologías avanzadas de turbinas, en donde se espera que para el año 2010 operen a eficiencias del 80%. No sólo son las tecnologías convencionales las que pueden beneficiarse de las ventajas de las celdas de combustible, también otros sistemas basados en fuentes renovables de energía pueden integrarlas en sistemas híbridos en donde, por ejemplo, biogás sea alimentado a la celda o bien celdas fotovoltaicas alimenten un electrolizador (celda electroquímica comercial de generación de hidrógeno y de eficiencias entre 60 y 85%) para generar hidrógeno y alimentar la celda de combustible. Estos sistemas híbridos mantendrían relaciones costo/beneficio en niveles interesantes gracias a las altas eficiencias de conversión de las celdas de combustible, lo cual significaría otro atractivo para impulsar un mayor desarrollo de tecnologías como la solar, la biomasa, la eólica, etcétera, que desafortunadamente pocas veces se consideran soluciones para demandas crecientes, limpias y eficientes de energía eléctrica.

## 6-2 Beneficios de la tecnología de celdas de combustible

Los diferentes tipos de celdas de combustible trabajan y operan en estados diferentes. Sus materiales de construcción, técnicas de fabricación, y requisitos de cada sistema difieren. Estas distinciones producen las ventajas individuales y desventajas. A continuación se señalan las principales ventajas y desventajas descubiertas hasta ahora:



Ventajas: La principal ventaja de esta tecnología es que se ha demostrado que todos los tipos de celdas de combustible generan energía eléctrica a niveles nulos de contaminación. Como también presentan las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia y eficacia en la conversión del combustible a electricidad.
- Capaces de utilizar varios combustibles.
- Son cogeneradores natos.
- Silenciosas en su operación.
- Carecen de partes móviles.
- Gran flexibilidad para operar con otros sistemas de generación de electricidad aumentando la eficiencia del sistema.

Desventajas: En general, los equipos que presentan esta tecnología son costosos en todas sus aplicaciones, debido a su reciente entrada al mercado, y su poco conocimiento a nivel mundial de su real beneficio.

### 6-3 Situación en la Argentina

En términos simples la generación de bienes y servicios mueve la economía de un país y del mundo. Para generar esos bienes y servicios es necesario contar con energía, que puede provenir de recursos naturales disponibles en forma directa, tales como la energía hidráulica, eólica y solar, o indirecta, tales como el petróleo, el gas natural o el carbón mineral que deben extraerse de los yacimientos. Estas energías se denominan primarias pues no requieren un proceso de transformación para su empleo.

Las energías secundarias son las que se obtienen por procesos físicos, químicos o bioquímicos, entre las que se encuentran la electricidad y los derivados del petróleo que se obtienen en las refinerías (naftas, diesel y otros).

Fuente	En la Argentina	En el mundo
Petróleo	36,8%	39,0%
Gas natural	48,4%	24,3%
Carbón	1,0%	32,2%
Hidroeléctrica	5,8%	2,2%
Nuclear	3,2%	2,1%
Renovables	3,0%	0,2%

Fuente: Dirección de Prospectiva - Secretaría de Energía.

Tabla1: Matriz energética en la Argentina y el mundo

La matriz energética en la Argentina y en el mundo (tabla 1) muestra que actualmente la mayor parte de la energía se obtiene de combustible fósil (petróleo, gas, carbón). Estamos pues inmersos en un mundo cuya economía se basa en el petróleo, así como la revolución industrial se basó en el uso del carbón.

La era de la energía fósil es, sin embargo, un abrir y cerrar de ojos entre las llamadas 'primera y



segunda civilización solar'. La primera abarca desde el hombre primitivo hasta la sociedad preindustrial, donde toda la energía consumida por el hombre provenía de la biomasa generada por acción del sol. La segunda comenzará cuando se agoten las reservas de combustible fósil o, más probablemente, cuando los efectos ambientales producidos por su uso obliguen al uso de energías renovables, aun cuando los costos sean mayores que los de una economía basada en petróleo y gas.

Las energías renovables no implican únicamente la energía solar directa, que puede aprovecharse en forma térmica o mediante conversores fotovoltaicos que la convierten en electricidad, sino que abarcan las energías eólica, geotérmica, mareomotriz y toda aquella que sea producto de la influencia del sol sobre nuestro planeta, incluyendo la biomasa.

¿Y por casa cómo andamos?

El manejo de la tecnología del vapor marcó la explosión industrial del siglo XIX. El petróleo fue el eje de los avances y los conflictos mundiales del siglo XX. El éxito fue de aquellos que dominaron su tecnología y sus recursos.

Estamos hoy, en estos precisos momentos, en los albores de una nueva reformulación energética. Este no es un problema simplemente técnico. Es un problema estratégico. Debe ser una política de estado. Del posicionamiento de cada nación en el tema energético depende fuertemente su futuro.

Estamos en un momento equivalente a 1760, cuando Watt desarrolla la máquina de vapor, o en los inicios de la era del petróleo: todo va a cambiar en breve. Ya, a escala histórica.

Nuestro país no tiene la entidad para encarar por sí solo soluciones como la reformulación nuclear o la fusión. Pero otra faceta extraordinaria que se suma a lo dicho más arriba respecto de la tecnología del hidrógeno es que, además de su modularidad en el uso, permite una modularidad en la inversión en investigación y desarrollo. Todavía estamos a tiempo de estar en carrera. De generar conocimiento propio, patentes, recursos. Está a nuestra escala.

Corresponde a las universidades impulsar grupos de investigación y desarrollo. Pero corresponde al estado generar una política que centralice, coordine y solvante el trabajo. Para no superponer esfuerzos. Para potenciar resultados. Para entusiasmar a los jóvenes profesionales. Así como en los '50 se tuvo la visión de crear la CNEA, de frente a una tecnología que prometía ser el futuro, poniendo a la Argentina en el





pelotón de punta, ahora estamos en un momento histórico como para relanzarnos, creando una Comisión Nacional de Energías Renovables o algo equivalente, que coordine y aúne, que impulse y soporte.

### *Proyectos Nacionales*

## **Celdas de combustible: Venden a España un desarrollo científico argentino**

*Es para producir hidrógeno a partir de alcohol, sin necesidad de emitir "gases de efecto invernadero". La creación pertenece a un pequeño laboratorio de la UBA. Obtuvieron por el invento 300.000 euros. La transacción se hizo a través de Innova-T, del Conicet.*

(*La Nación*) La química Abengoa, de España, acaba de comprar en 300.000 euros un desarrollo del Laboratorio de Procesos Catalíticos (LPC) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires: nada menos que un sistema económico para la producción de hidrógeno de uso vehicular y para la petroquímica, a partir de alcohol vegetal, libre de emisión de "gases de efecto invernadero".

La venta no fue de equipo, sino de ingeniería básica, y se hizo a través de la Fundación Innova-T, la ONG creada por el Conicet para exportar talento local. El LPC es dirigido por los doctores Miguel Laborde y Norma Amadeo, y en este desarrollo recibió una fuerte colaboración del equipo del doctor Pío Aguirre, del Ingar de Santa Fe.

El sistema que diseñaron, una unidad química portátil de tres etapas, probablemente suministrará hidrógeno combustible a un vehículo grande, no se sabe si terrestre o naval -podría hasta ser un submarino-, cuya planta motriz (una "celda de combustible" de hidrógeno) la ponen los españoles.

Lo revolucionario es que en sus tanques de combustible este vehículo misterioso llevará alcohol. Dado que el hidrógeno es difícilísimo de almacenar en forma pura es posible que la Argentina esté suministrando al mundo la solución más barata y sensata para transportarlo en el tanque del automóvil del futuro: como alcohol.

### **¿Para qué sirve?**





Entre 2010 y 2020, para cumplir con los pactos existentes y futuros de protección de la atmósfera, la flota vehicular mundial muy probablemente se reemplazará por aparatos quemadores de hidrógeno (dotados de "celdas de combustible" en lugar de motores de explosión). Serán aparatos movidos a electricidad, y por cuyos caños de escape, toberas, chimeneas o snorkels saldrá sólo vapor de agua.

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, pero en nuestro planeta no existe en estado puro: está casi siempre combinado con carbono (en diversas moléculas orgánicas) o con oxígeno (como en el agua). Por eso, hoy el 95% del hidrógeno que se fabrica sale del "reformado" a alta temperatura del gas natural. Sin embargo, este proceso emite dióxido de carbono (gas de invernadero) a la atmósfera, y el problema es que se trata de carbono fósil que se añade al inventario de la biosfera.

Claramente, el gigantesco incordio de reconvertir la economía mundial a hidrógeno sólo tiene sentido si éste hidrógeno sale de un proceso "limpio". Y para eso, hay dos fuentes importantes: la electrólisis, o ruptura de la molécula de agua mediante electricidad, o alguna fuente de carbono "verde", es decir, vegetal. Y ahí es donde entra a tallar el alcohol común, o etanol, obtenido de la fermentación de granos o de residuos de cosecha.

Si uno saca hidrógeno del alcohol por "reformación", de todos modos emite carbono. Pero lo hace con la conciencia tranquila de no estar añadiendo carbono fósil a la atmósfera: usa el que ya estaba circulando. Por decirlo en términos bancarios, mueve sólo la "cuenta corriente" planetaria de carbono, pero deja en paz su "caja de ahorro", sus depósitos geológicos.

La tecnología que España buscó —y encontró— en nuestros laboratorios es buena para el planeta, pero además es amigable para el usuario. Cargar de alcohol el tanque no requiere estaciones de servicio carísimas y complejísimas, como las que abastecen de hidrógeno los autobuses del aeropuerto de Hamburgo, Alemania.

Para que rinda el mismo kilometraje por volumen que el vulgar GNC, al hidrógeno gaseoso hay que comprimirlo a casi 800 atmósferas, en lugar de las 200 que usan los cilindros de cualquier taxi porteño. Más aún, para que dé el kilometraje del GLP (gas licuado), hay que enfriarlo a casi 270 grados bajo cero, y mantenerlo así, lo cual es igualmente caro y peligroso.



El alcohol, en cambio, se almacena, distribuye y transporta tan fácilmente como la nafta. En realidad, es hasta más controlable: como es hidrofílico (no rechaza el agua), se apaga mucho más fácilmente en caso de incendio.

El "reformado" del alcohol para obtener hidrógeno (primera etapa de la cadena) se inventó en Europa durante el siglo XIX. Pero este proceso produce un hidrógeno muy "sucio" de otros gases: monóxido y dióxido de carbono, amén de metano.

Desgraciadamente, para no inutilizar una celda de combustible vehicular se requiere un hidrógeno exquisitamente puro, con entre apenas 20 y 30 partes por millón de dióxido de carbono. Pero eso es exactamente el producto final del reactor del LPC en sus etapas catalíticas segunda y tercera. El aporte argentino al mundo es ése: una vía barata, portátil y compacta desde el alcohol hasta el hidrógeno "grado celda".

Pero hay más: el equipo argentino ha desarrollado -y esto no fue aún materia de venta- nuevos catalizadores que mejoran decisivamente la primera etapa, es decir, el reformado de etanol. Así, el LPC tiene una vía propia para obtener "gas de síntesis", la mezcla de gases con la cual la petroquímica actual hace plásticos y centenares de insumos industriales... ¡pero sin usar una molécula de gas natural!

En suma, este pequeño laboratorio de la UBA tiene una tecnología libre de carbono fósil que puede dar vuelta el panorama mundial en transporte y petroquímica: dos revoluciones por el precio de una.

Si bien Abengoa se quedó con la patente del conversor de etanol en hidrógeno, a la hora de negociar Innova-T consiguió que la propiedad intelectual del proceso quedara en manos del LPC, fuera de lo cual el laboratorio argentino tiene las puertas abiertas para patentar todas las mejoras e innovaciones emergentes. También en esto el papel de un organismo de vinculación ágil como esta agencia del Conicet resultará fundamental.

## **7- Referencias**

- Avances en las celdas de combustible de intercambio protónico (PEM):

Alimentación con Etanol

Publicado por J. L. G. FIERRO, M. A. PEÑA, M. V. MARTÍNEZ, N. TSIIOUVARAS, S. ROJAS, P. HERNÁNDEZ Y J. L. GÓMEZ. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC.



- Boletín iie septiembre/octubre 1999 - Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica.

Publicado por el Ingeniero Químico Metalúrgico Ulises Cano Castillo.

- La Economía del Hidrógeno – Una cisión global sobre la Revolución Energética del Siglo XXI

Publicado por J. A. Botas, J. A. Calles, J. Dufour, G. San Miguel. Grupo de Ingeniería Química y Ambiental. Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología (ESCET), Universidad Rey Juan Carlos.

- Boletín iie julio/agosto 2000 - Infraestructura de uso de hidrógeno y materiales para celdas de combustible: Clave para su pronto uso

Publicado por Ulises Cano Castillo, Leonardo Rejón García, Mirna Ojeda Hernández.

- <http://www.gia-energias.com.ar/celdas.htm>
- <http://www.wikipedia.org>
- [http://www.claudio-otero.cl/fuel\\_cells/#BM\\_De\\_d%C3%B3nde\\_vinieron\\_las\\_Celdas\\_de](http://www.claudio-otero.cl/fuel_cells/#BM_De_d%C3%B3nde_vinieron_las_Celdas_de)
- <http://www2.ing.puc.cl/~iing/ed433/anales/celdasCombustible.htm>
- [http://wapedia.mobi/es/Pila\\_de\\_combustible?t=5](http://wapedia.mobi/es/Pila_de_combustible?t=5).
- [http://www.motortrendenespanol.com/articulos/consumidor/e12\\_0408\\_hidrogeno/index2.html](http://www.motortrendenespanol.com/articulos/consumidor/e12_0408_hidrogeno/index2.html)
- <http://www.textoscientificos.com/quimica/metanol/obtencion>
- <http://www.construtips.com/celdas.html>
- [http://www.cleanairnet.org/infopool\\_es/1525/article-54958.html](http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/article-54958.html)