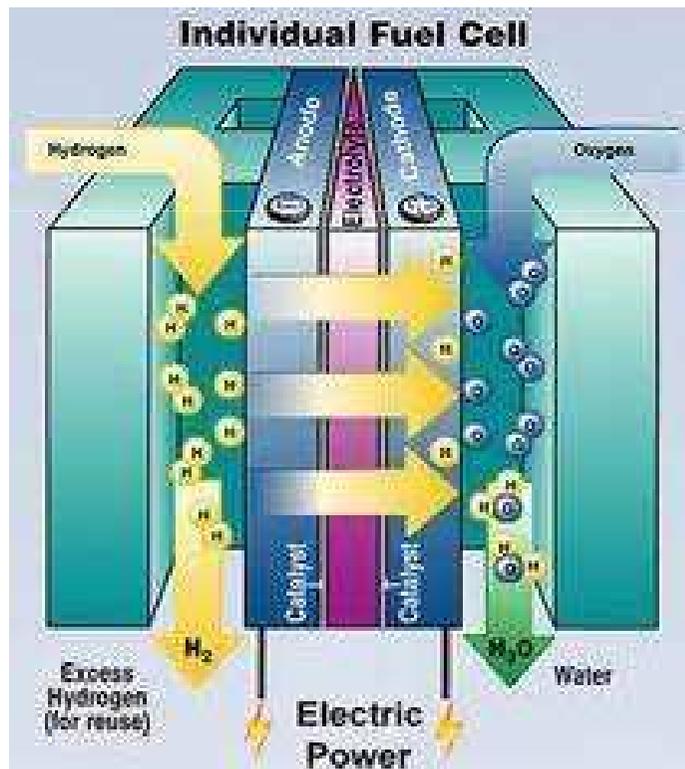




RINCON DEL TECNICO

<http://www.postventa.webcindario.com>

APLICACIÓN DE PILAS DE COMBUSTIBLE EN LAS CARRETILLAS ELEVADORAS



- Prologo
- Como funciona una pila de combustible
- Tipos de pilas de combustible
- Apilar pilas de combustible. ¿Por qué?
- Comentario final



Autor: Joaquín García

La búsqueda de una energía limpia, que respete el medio ambiente a dado lugar a la iniciación del uso de la pila de combustible de hidrogeno en las carretillas elevadoras.

Esta opción es muy innovadora y debe de ir creando campo de acción para los diferentes modelos de maquinaria de manutención. De momento esta siendo usada en los modelos de carretillas eléctricas contrapesadas, realizándose un análisis progresivo para ***elaborar normas internacionales en materia de tecnologías de células de combustible*** para su aplicación en carretillas elevadoras eléctricas.



La pila de combustible GenDrive, que ha sido desarrollada por Hypulsion, joint venture entre Air Liquide y Plug Power, empresa especializada en este tipo de soluciones, es una alternativa superior a las baterías industriales de plomo-ácido para energía motriz. **Reemplaza las baterías sin necesidad de modificar el vehículo**, y tiene una vida útil entre 1,5 a 2 veces mayor que la de las baterías, lo que contribuye a disminuir los costes de explotación.

Asimismo, permite que los equipos operen a velocidad máxima y potencia constante en todo momento y **sus emisiones son nulas**, ya que expulsa agua como único residuo.

El hidrógeno puede ser producido a partir de distintas fuentes de energía, como el gas natural, y también a partir de fuentes de energía renovables. El hidrógeno representa por tanto un fuerte potencial para abastecer energía limpia y garantizar la seguridad de los suministros.



Recientemente Air Liquide ha puesto en marcha una **flota de 37 carretillas elevadoras de un centro de distribución y envasado de Coca Cola, equipadas con pila de hidrógeno**, a las que proporciona hidrógeno, la estación de servicio y la infraestructura.

En una pila de combustible se producen una serie de reacciones entre el hidrógeno y el oxígeno y que como único subproducto se obtiene agua. Pero ¿cómo funciona de verdad? ¿Cuáles son las reacciones que tienen lugar dentro de una pila de combustible? ¿Y con qué elementos cuenta?

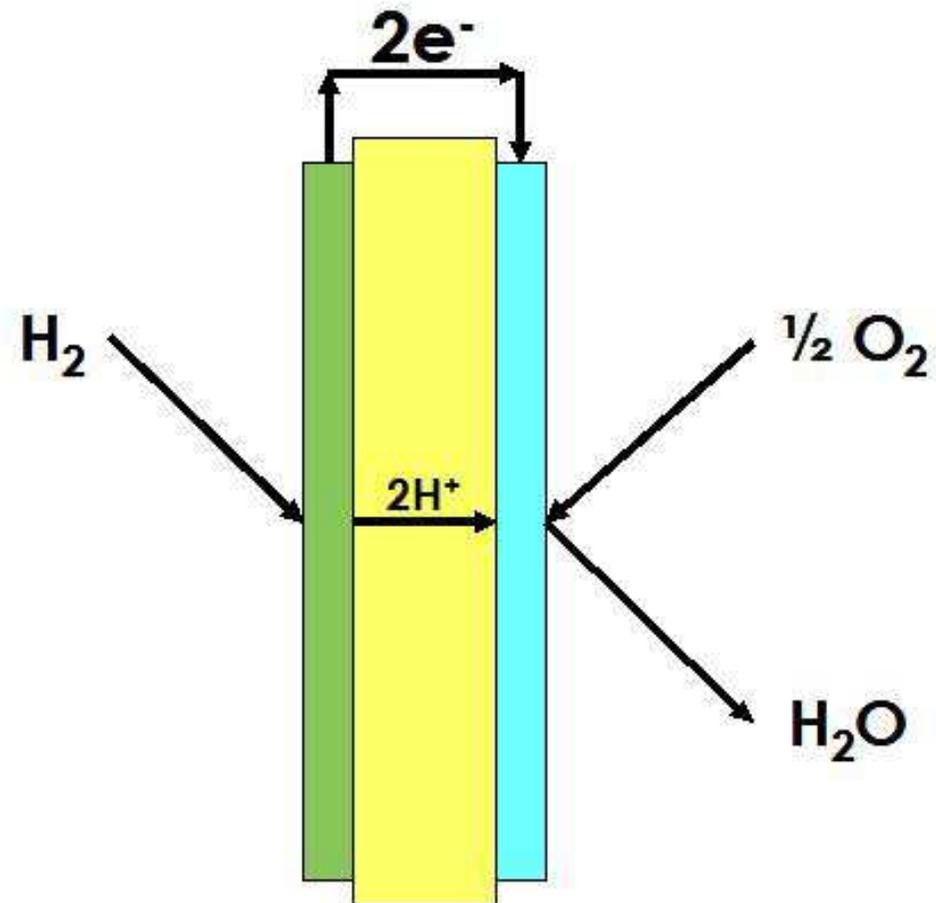
Una pila de combustible es un **convertidor de energía**, básicamente lo que hace es transformar la energía química almacenada en unos reactantes en energía eléctrica, de forma que se logra una corriente eléctrica que permite alimentar distintos dispositivos. Por esta regla de tres un motor de combustión interna también sería una pila de combustible, pero eso no es verdad. **En un motor de combustión interna se produce una reacción química de combustión**, de forma que el combustible (pongamos que hidrógeno) reacciona directamente con el oxidante (pongamos que oxígeno) produciendo agua, CO_2 si tocase y liberando calor. Durante este proceso de combustión los enlaces químicos del combustible y el oxidante se rompen y mediante una **reconfiguración electrónica** (una transferencia de electrones entre las moléculas) se genera el producto que en el caso de hidrógeno y oxígeno será agua.

La energía final de los productos (en este caso agua) es menor que la de los reactantes (hidrógeno y oxígeno). Esa **diferencia energética es liberada en forma de calor** pues a pesar de que existe una reconfiguración de electrones entre las moléculas esta ocurre tan rápidamente, a escala subatómica y en puntos tan cercanos que la única forma de aprovechar esa energía es en forma de calor. Para poder producir energía eléctrica en el caso de un motor de combustión interna, en primer lugar habrá que transformar esa energía térmica en energía mecánica y posteriormente esta ya sí en la ansiada energía eléctrica

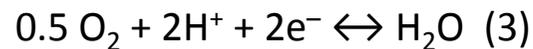
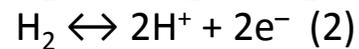
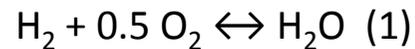
Sin embargo, **una pila de combustible es capaz de transformar la energía química almacenada en los reactantes en energía eléctrica sin tener que pasar por las etapas de energía térmica y mecánica**, es por ello que su eficiencia es mayor que la del motor de combustión interna. La idea es conseguir recolectar los electrones que se transfieren durante la reconfiguración electrónica que da lugar a los productos y hacerlos pasar por un conductor consiguiendo generar una corriente eléctrica. Para lograr esa transformación directa **las pilas de combustible se sirven de reacciones electroquímicas que no es lo mismo que reacciones químicas**, mucho cuidado. Vale, bien, pero ¿cómo se consiguen recolectar esos electrones? **La clave está en separar las reacciones de liberación de electrones** (reacción de oxidación) **y la de captación de los mismos** (reacción de reducción), de esta forma la transferencia de electrones se produce a través de un largo recorrido.

Así pues lo que se hace es separar el suministro del combustible y el oxidante, de forma que los electrones sean liberados al oxidarse el combustible y estos sean conducidos hasta alcanzar el lugar en el que el oxidante se reduce.

Esquema de funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno. Puede verse como las reacciones están separada para permitir el flujo de electrones por un circuito externo.



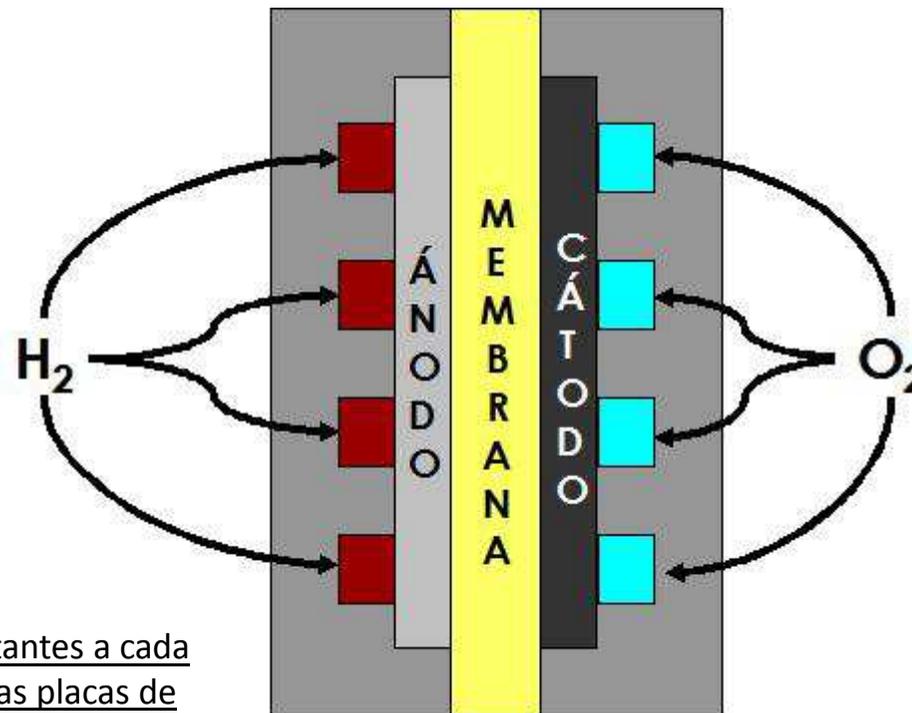
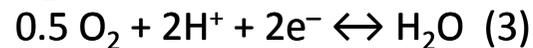
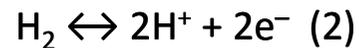
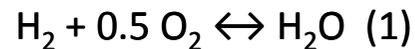
Fijaros en esta ecuación:



Veamos la ecuación (1), en ella se presenta la combustión del hidrógeno que es la que tendría lugar durante una reacción directa del hidrógeno con el oxígeno. Sin embargo, si esa reacción la separamos en dos que tienen lugar de forma separada (2) y (3) podemos aprovechar el flujo de electrones. La ecuación (2) representa la oxidación del hidrógeno (se liberan electrones), mientras que en la (3) tiene lugar la reducción del oxígeno (se captan electrones). ¿Técnicamente esto como se logra? Vayamos a la Figura 1, esa es la solución más aplicada. Tenemos que **el combustible** (hidrógeno) **se suministra a un electrodo** (ánodo) sobre el que hay depositado un catalizador que permite acelerar la reacción de oxidación del combustible.

Por otro lado, **el oxidante** (oxígeno) **se suministra a otro electrodo** (cátodo) **diferente** sobre el que también se encuentra un catalizador que permite aumentar la velocidad de la reacción de reducción. Como puede verse, entre ambos electrodos hay **una membrana la cual tiene una doble función**. Por un lado **separar el flujo de reactantes** ya que si se mezclasen esto provocaría que ambas reacciones tuviesen lugar sobre ambos electrodos y entonces ya la habríamos mangado.

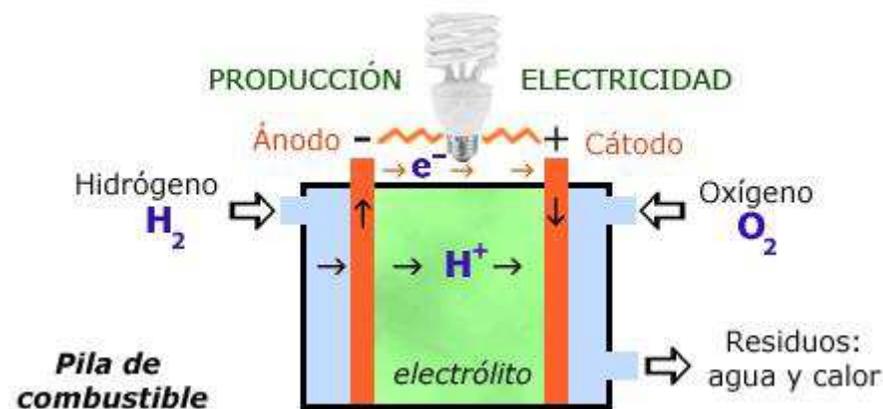
En segundo lugar **hace las veces de electrolito**, lo que quiere decir que tiene iones libres que pueden desplazarse. Habitualmente esta membrana es de tipo PEM (Proton Exchange Membrane) lo que quiere decir que tiene protones (H^+) libres. ¿Y por qué es necesario que esta membrana haga de electrolito? Pues porque si atendemos a las reacciones (2) y (3) es necesario que también se produzca un flujo de estas cargas para cerrar el circuito, sino las reacciones no tendrían lugar.



Alimentación independiente de reactantes a cada electrodo a través de los canales de las placas de suministro

Ya tenemos, una pila de combustible, ahora solo hay que unir los electrodos y tendremos un flujo de electrones que podremos aprovechar para por ejemplo alimentar un motor eléctrico . Evidentemente **existen diferentes configuraciones, catalizadores y estructuras**, pero todas se basan en el mismo concepto, lograr separar las reacciones de oxidación y reducción.

Pero queda una pregunta por responder, ¿en qué se diferencia una pila de combustible de una batería entonces? Pues bien, una pila de combustible en principio seguirá produciendo corriente eléctrica mientras se le suministren ambos reactantes (combustible y oxidante), a las baterías por el contrario no se les suministra de forma externa los reactantes de ahí su limitada capacidad de producir energía eléctrica. Por tanto, podemos decir que **una pila de combustible es un dispositivo que permite transformar de forma directa la energía química almacenada en los reactantes en energía eléctrica por medio de una serie de reacciones electroquímicas y que teóricamente seguirá generando corriente siempre y cuando se mantenga el suministro de reactantes**



Con la llegada de medios de transporte propulsados por pilas de combustible de hidrógeno se ha tendido a instaurar la idea de que tan solo existe un tipo de pilas de combustible, y no, nada más lejos de la realidad. Una pila de combustible es básicamente un convertidor electroquímico en el que tienen lugar sendas reacciones electroquímicas de forma separada. Sobre un electrodo (ánodo) se lleva a cabo la oxidación de un combustible con lo que se generan una serie de electrones que circulan por un circuito externo. En el otro electrodo (cátodo) tiene lugar de forma independiente al anterior una reacción de reducción, de forma que el oxidante capta los electrones procedentes del circuito externo. Además, para que el sistema pueda funcionar de forma continuada tiene que tener lugar un tránsito de iones entre ambos electrodos a través de un electrolito que lo permita. Este electrolito a su vez debe impedir el flujo de electrones en su interior, porque sino no se podría establecer un flujo externo de electrones, y nos habríamos cargado el invento. Viendo este principio de funcionamiento, en el que no aparece la palabra hidrógeno en ningún sitio, se llega a la conclusión de que pueden existir multitud de tipos de pilas de combustible. Por ejemplo en función del tipo de combustible utilizado o en función del tipo de catalizador empleado. Pero es que incluso dentro de aquellas que emplean hidrógeno como combustible surgen diferentes tipos de pilas de combustible en función del electrolito empleado.

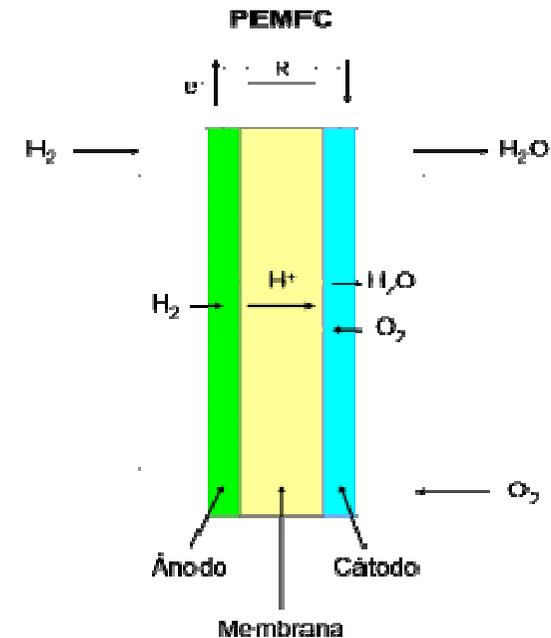
Pilas de combustible según el combustible empleado.

El hidrógeno es un combustible muy sexy para la gente que trabajamos en esto de la producción de energía eléctrica y pilas de combustible porque tiene una gran densidad energética por unidad de masa, y eso (por lo que sea) nos gusta mucho. Pero claro, el hidrógeno no nos pilla muy a mano. Si te dijese que me trajeses 1 kg de hidrógeno ¿dónde irías a cogerlo? Por poderse, se puede conseguir. Ahora, cuando se requieren cantidades muy grandes ya es otro cantar y si ya se quiere que su producción haya sido no contaminante pues la cosa se complica todavía más. Total, que el hidrógeno es un combustible poco accesible a priori. Además, su almacenamiento tampoco es una cuestión simple . Por ello, se han planteado el uso de otros combustibles que son más sencillos de obtener, almacenar y manejar como por ejemplo el metanol, el etanol o la glucosa.

Así pues, podemos tener distintas pilas de combustible según el combustible que empleen: de hidrógeno (las más importantes y extendidas), de metanol o etanol (también llamadas pilas de combustible de alcohol directo), de glucosa, biológicas, etc

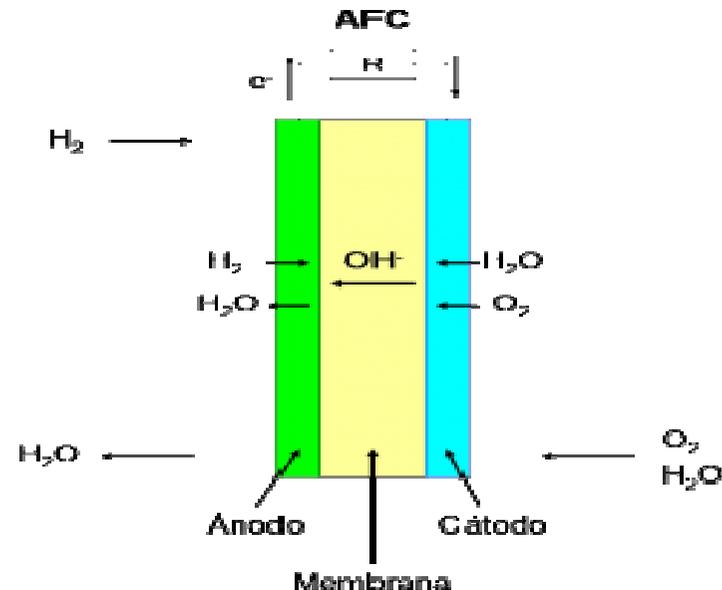
Pilas de combustible con membranas alcalinas como electrolito (PEM):

- También denominadas pilas de combustible con membrana de intercambio de protones (Polymer Electrolyte Membrane o Proton Exchange Membrane)
- Electrolito: membranas poliméricas conductoras de protones. La marca más conocida y utilizada de este tipo de membranas es Nafion de las casa DuPont.
- Carga en movimiento: H^+
- Catalizadores típicos: Pt depositado sobre un sustrato carbonoso. También puede ser Pt-Ru si los reactantes contienen trazas de CO o CO_2 .
- Temperatura de funcionamiento: 60 – 80 °C (Baja temperatura)



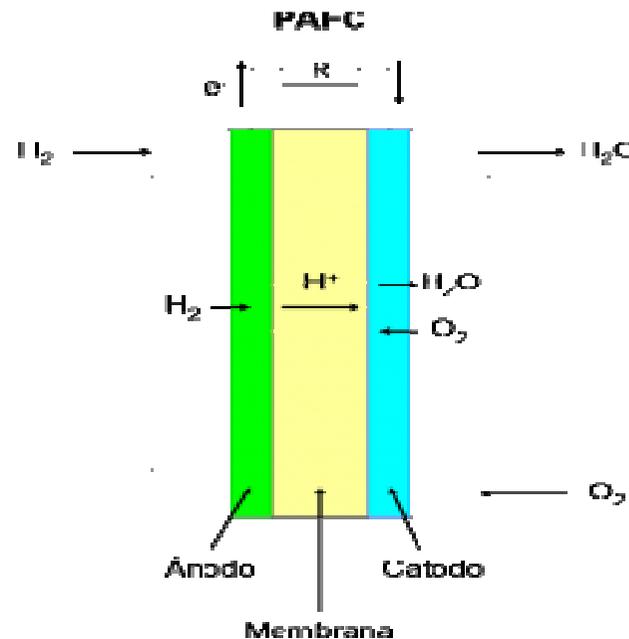
Pilas de combustible alcalinas (AFC, Alkaline Fuel Cells):

- Electrolito: una base fuerte, habitualmente KOH, que es retenida en una matriz tradicionalmente de asbesto.
- Cargas en movimiento: OH^-
- Catalizadores típicos: muy diversos, níquel, plata, platino, oro, óxidos metálicos, etc.
- Temperatura de funcionamiento
- Baja temperatura ($<120\text{ }^\circ\text{C}$) en este caso se suele emplear una baja concentración de la base fuerte (30 – 50% en peso)
- Alta temperatura ($\sim 250\text{ }^\circ\text{C}$) en este caso se carga bien la matriz con base fuerte ($\sim 85\%$ en peso).



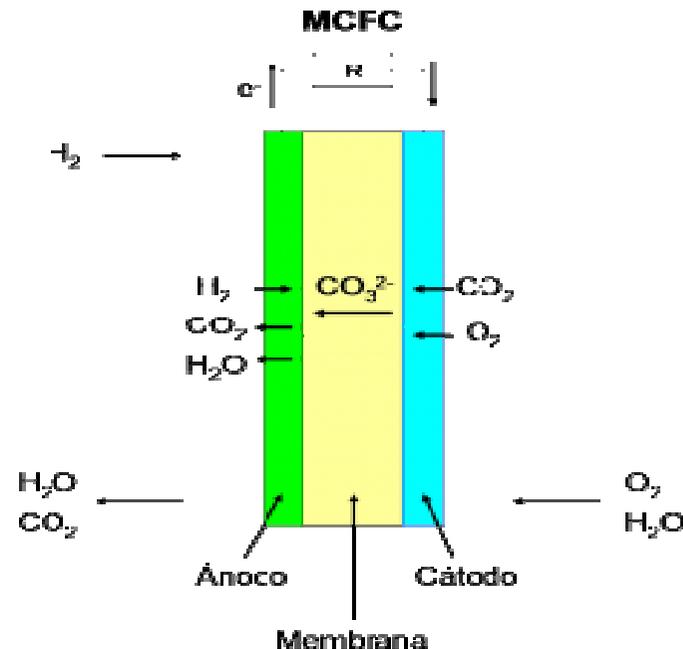
Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cells):

- Electrolito: pues con este nombre no pueden utilizar otra cosa que ácido fosfórico y bien concentrado en torno al 100%. Igual que en las AFC se utiliza una matriz para retener el electrolito, en este caso suele ser de SiC.
- Cargas en movimiento: H^+
- Catalizadores típicos: Pt
- Temperatura de funcionamiento: unos 220 °C



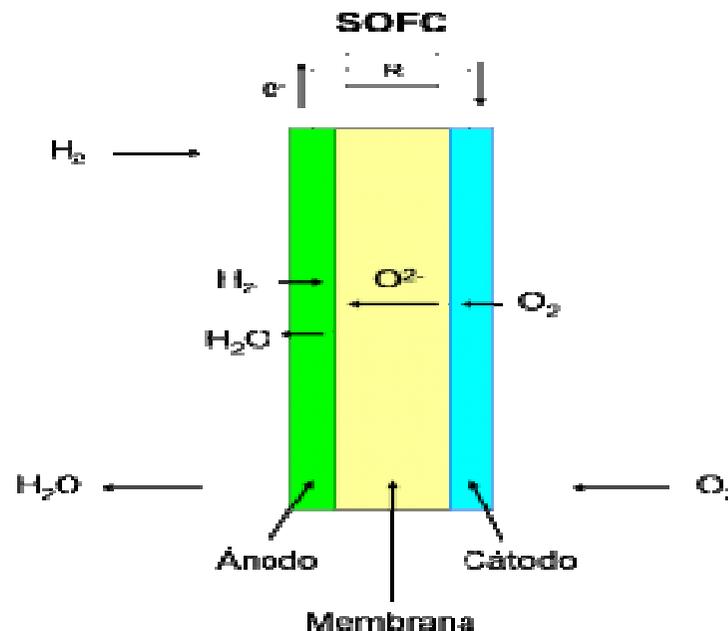
Pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cells):

- Electrolito: carbonatos alcalinos embebidos en una matriz cerámica.
- Cargas en movimiento: CO_3^{2-}
- Catalizadores típicos: metales no nobles (Ni con Cr o Al, u óxidos metálicos). No son necesarios metales nobles porque a estas temperaturas las cinéticas de reacción mejoran notablemente.
- Temperatura de funcionamiento: 600 – 700 °C, a estas temperaturas los carbonatos forman una sal fundida con una gran conductividad iónica.



Pilas de combustible de óxido sólido (SOFC, Solid Oxide Fuel Cells):

- Electrolito: óxido metálico, típicamente Y_2O_3 estabilizado con óxido de circonio (YSZ).
- Cargas en movimiento: O^{2-}
- Catalizadores típicos: níquel junto con compuestos cerámicos en el ánodo y lantano estroncio manganita (LSM) en el cátodo. Igual que en las MCFC dadas las elevadas temperaturas, no es necesario emplear metales nobles para acelerar las reacciones electroquímicas.
- Temperatura de operación: 600 – 1000 °C, a estas temperaturas se produce una gran conductividad iónica del electrolito gracias a la movilidad de los aniones oxígeno.



Pilas de combustible según los catalizadores empleados

Puede decirse que esta clasificación es bastante reciente. Hace años, lo habitual y prácticamente la única opción que se estudiaba eran los electrodos metálicos, ya fuese platino u otros elementos como plata, níquel o paladio y sus aleaciones. Sin embargo, hoy en día con los avances de la biología están surgiendo y se están estudiando nuevos tipos de catalizadores, sobre todo orientados a aumentar la velocidad de las reacciones de oxidación de combustibles orgánicos, como son las enzimas o las colonias de microorganismos. Con estos catalizadores se puede por un lado mejorar la oxidación de los compuestos orgánicos (producir más electrones por molécula de combustible) y por otro aumentar la vida de los electrodos. Evidentemente, también presentan sus retos particulares como por ejemplo anclar los compuestos catalíticos a un electrodo de forma eficiente para facilitar el trasvase de los electrones de las enzimas al electrodo, o aumentar la vida de estos compuestos y retardar su desnaturalización para aumentar la durabilidad de las pilas de combustible.

Pilas de combustible según el método de suministro de los reactantes

En función de cómo los reactantes se suministren a la pila de combustible esta puede ser activa o pasiva.

Activas: existen dispositivos externos a la pila de combustible, bombas o compresores, que suministran los reactantes y eliminan los productos. Es decir, los reactantes se suministran mediante un proceso convectivo (diferencia de presiones) a los electrodos.

Pasivas: las pilas de combustible pasivas totales no requieren dispositivos auxiliares de suministro, en su lugar emplean la difusión por diferencia de concentración para suministrar los reactantes y eliminar los productos. Estas pilas de combustible presentan un menor peso que las anteriores, sin embargo, dado que los reactantes alcanzan los puntos catalíticos de los electrodos solo por difusión las densidades de potencia que son capaces de ofrecer son muy inferiores. Con hidrógeno este tipo de pilas de combustible pueden ser complicadas de construir, pero con combustibles líquidos como el metanol es bastante simple. Se pone un depósito con metanol que esté en contacto con el o los ánodos y los cátodos se dejan al aire para que en ellos reaccione el oxígeno del aire y listo.

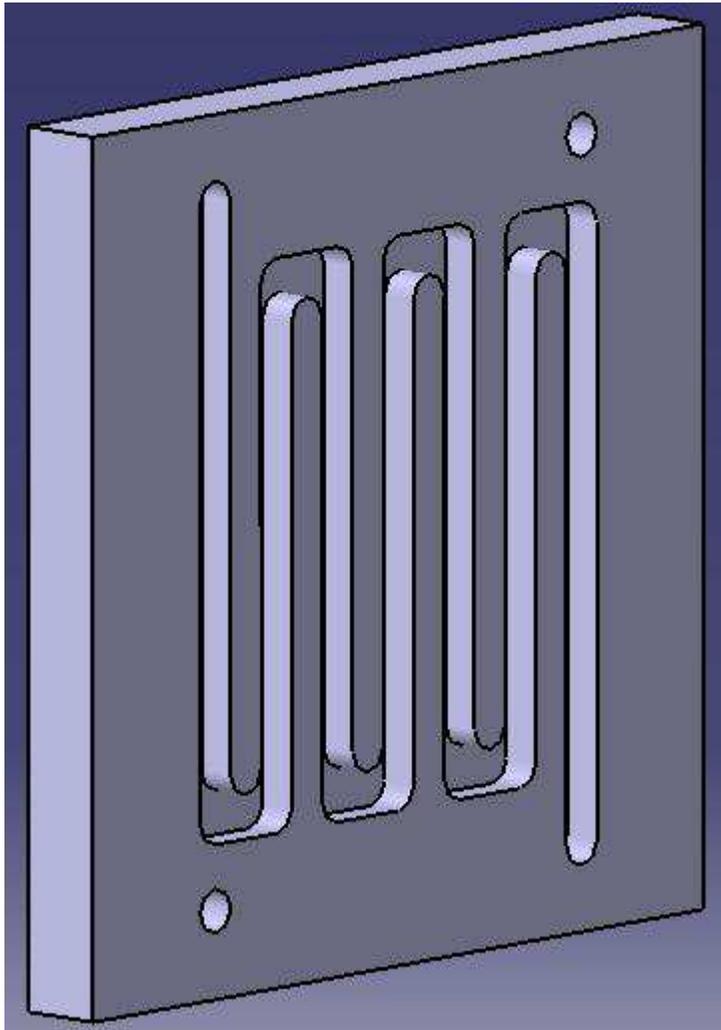
Ahora bien, es posible que en una pila de combustible haya un electrodo activo y otro pasivo por ejemplo. Y luego ya puedes hacerte mezclas muy locas en plan una pila de combustible de metanol con membrana alcalina, enzimas como catalizadores en el ánodo activo y platino-rutenio como catalizador en el cátodo pasivo.

Hay muchos tipos de pilas de combustible y muchas clasificaciones (o taxonomías como dirían los biólogos) posibles según diferentes criterios. La realidad es que cada vez se amplía más el abanico para tratar de dar soluciones a los diversos problemas que se plantean. Las clasificaciones son un mero artificio para tratar de entender rápidamente cada tipo de pila de combustible y los fenómenos que en ella tienen lugar, pero lo realmente importante es el principio de funcionamiento que hemos descrito más arriba. Esa es la esencia de las pilas de combustible, la cuestión es jugar con el resto de elementos respetando los principios de la electroquímica para que el dispositivo funcione. Por ejemplo, unas pilas de combustible con las que trabajo solo presentan una entrada, es decir, no se suministra el combustible al ánodo y el oxidante al cátodo por separado sino que ambos reactantes están en una misma solución y se difunden por una única abertura, y para colmo no tienen membrana porque la solución hace también de electrolito.

Esta pila no cuadra en casi ninguna de las clasificaciones mostradas anteriormente, pero sin embargo, se ha jugado con los diferentes elementos hasta conseguir que la pila de combustible funcione.

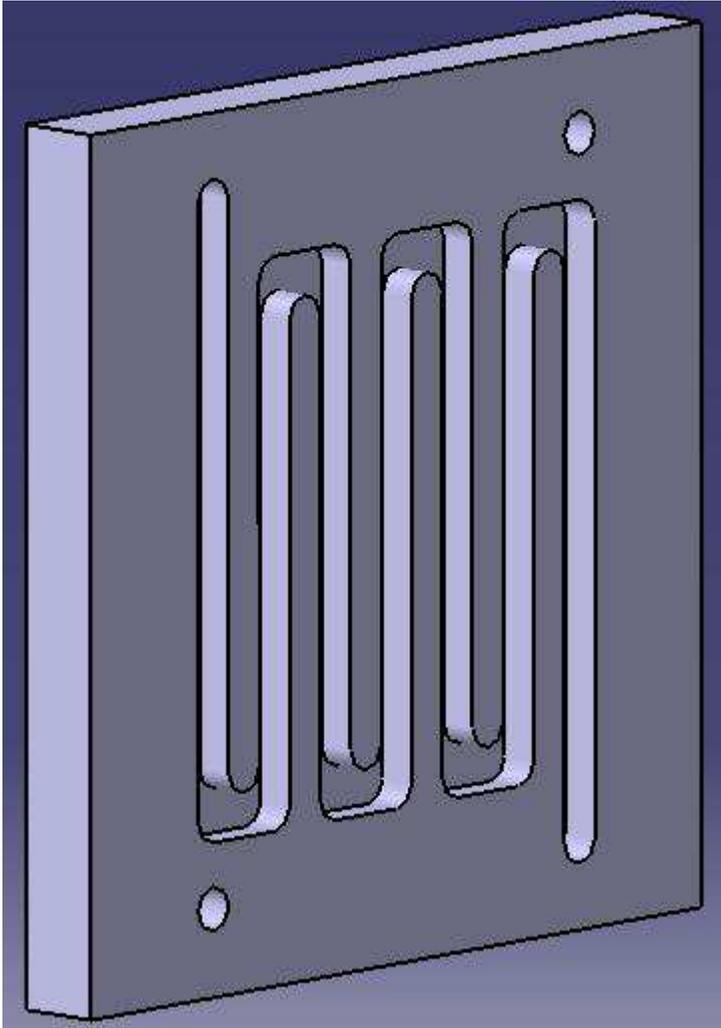
Una única monocelda, esto es: un ánodo, un cátodo y la membrana, que utiliza hidrógeno como combustible presenta en su punto de trabajo unos 0.7 V. Y claro, con este voltaje no vamos a ninguna parte, sin ir más lejos el mando de tu televisor utiliza pilas de 1,5 V. Por tanto, para producir un voltaje medianamente decente vamos a necesitar unir en serie varias monoceldas dando lugar a lo que se conoce como stack o apilamiento. Pero ¿cómo unir en serie varias celdas? Os adelanto la respuesta, con “bipolar plates”.

La forma más sencilla que nos viene a la cabeza para unir varias celdas en serie es coger un cable y unir el ánodo de una de ellas con el cátodo de la siguiente y así sucesivamente. Esta metodología presenta varios problemas, el primero es ¿cómo vamos a suministrar los reactantes a los electrodos de este supuesto diseño? Pero bueno, supongamos que sabemos como hacerlo, todavía tenemos otro problema bastante más serio. Y es que en este supuesto, los electrones que se generan en el ánodo tendrán que viajar por todo el electrodo hasta el punto en que se haya unido el cable, viajar a través de este y después repartirse por el cátodo, su lugar de destino. Tenemos unos 0,7 V, que no es mucho precisamente, no estamos en condiciones de tener pérdidas superfluas que hagan que el potencial efectivo sea menor todavía. Con un recorrido tan largo, obligando a los electrones a desplazarse a través del propio electrodo, las pérdidas van a ser el pan de cada día. Por eso, este método se descarta de forma general. Como mucho podría emplearse en pilas de combustible cuya corriente sea muy baja, los electrodos sean muy buenos conductores y su área sea muy pequeña.

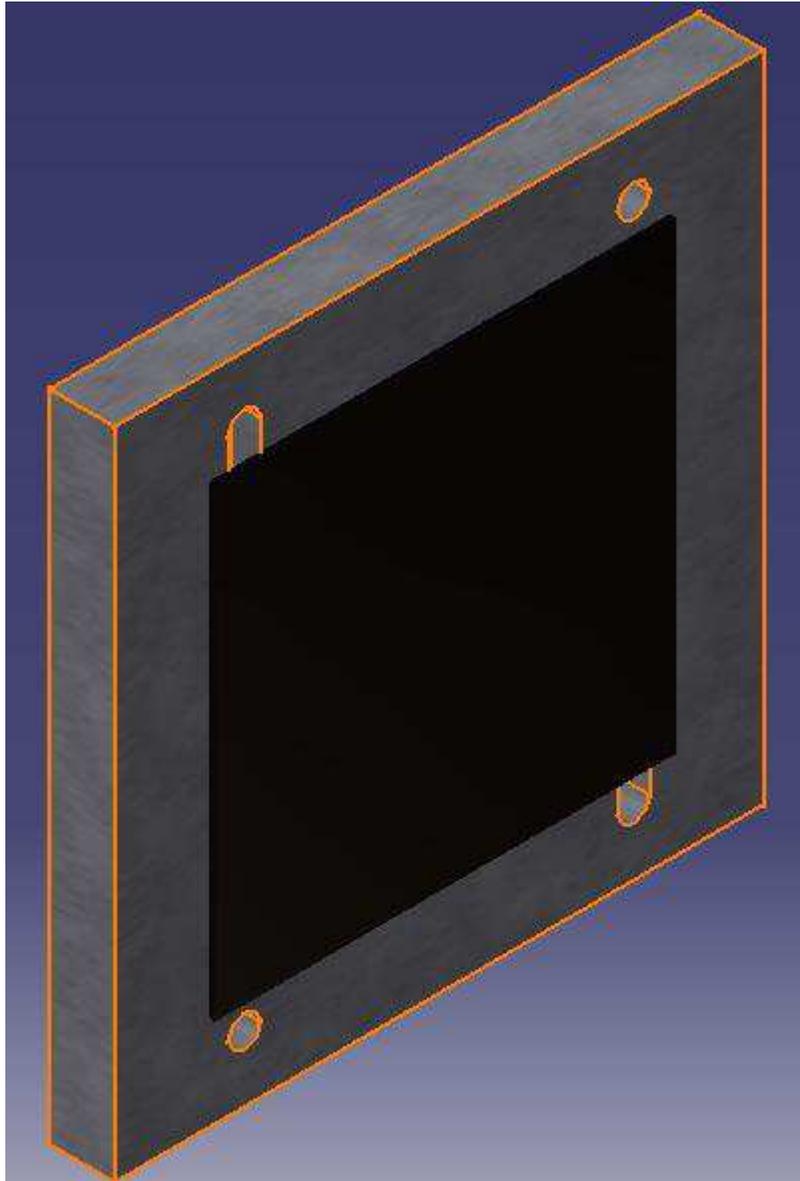


Pero unas mentes pensantes lograron resolver el problema de la conexión eficiente de las celdas en serie al tiempo que también solucionaban la forma de llevar a cabo el aporte de los reactantes a los electrodos. Para ello se utilizan los denominados “bipolar plates” que son unas placas que permiten una conducción mucho más eficiente de los electrones de un ánodo al cátodo contiguo. De esta forma se logra aumentar el voltaje de salida de la pila de combustible pues a los efectos estamos uniendo en serie varias monoceldas. Pero los bipolar plates tienen otras funciones a mayores:

- Por un lado, como hemos dicho, deben ser capaces de distribuir de forma eficiente los reactantes correspondientes a los electrodos. Para ello cuentan con una serie de canales horadados a cada lado a través de los cuales se realiza el aporte de combustible y oxidante. Existen muchas configuraciones de canales diferentes y es un ámbito sometido a una gran investigación ya que una distribución más eficiente de los reactantes puede mejorar las actuaciones de la pila de combustible.

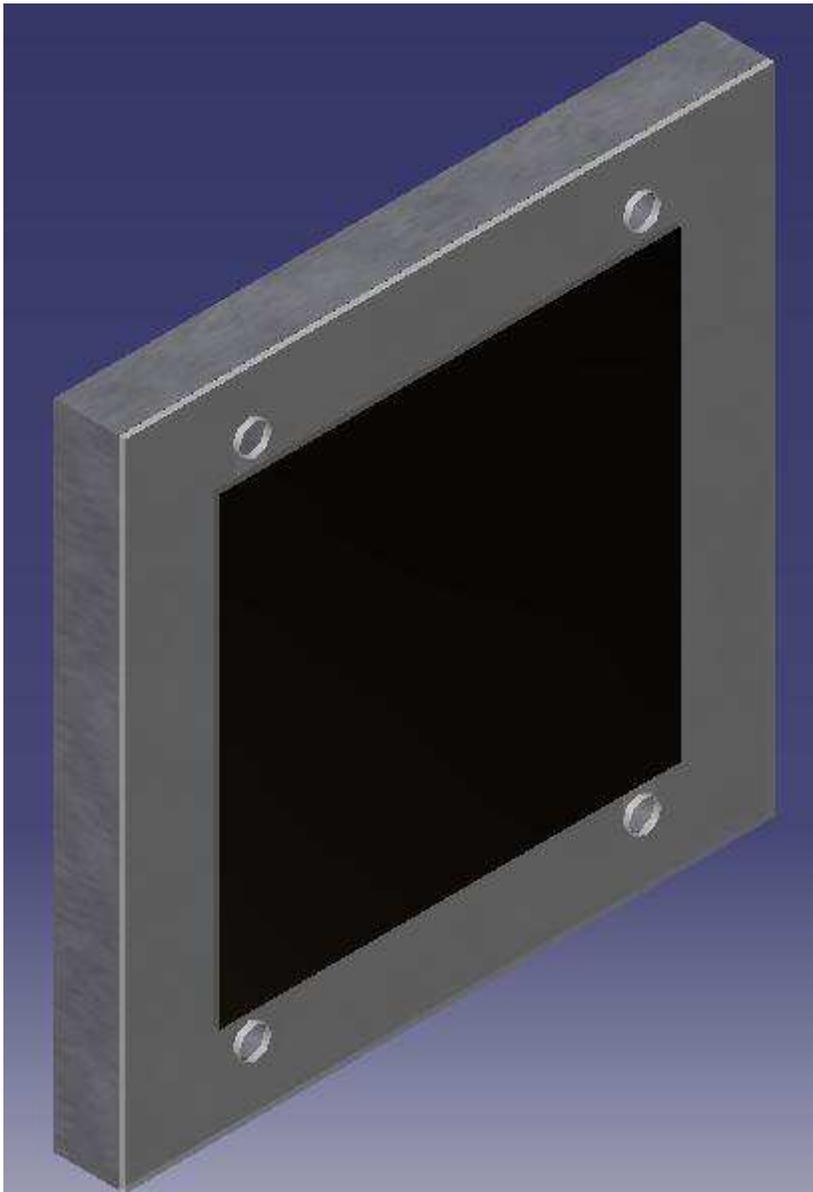


- Los bipolar plates tienen que ser capaces de evacuar el calor que se genera en los electrodos para evitar el deterioro de las monoceldas. Habitualmente las pilas de combustible cuentan con dispositivos para su refrigeración, pero en última instancia esta dependerá de la conductividad térmica de las placas.
- Deben también separar los flujos de reactantes y evitar que estos se mezclen o que existan fugas. Ya que si el combustible alcanzase el electrodo opuesto se oxidaría en este directamente con el oxidante haciendo que la tensión de la pila de combustible se redujera.
- La última de sus funciones es aportar rigidez estructural al stack completo pues los electrodos y las membranas no presentan por sí solos mucha rigidez.



Bipolar plate (gris) junto con la posición que ocuparía el electrodo pertinente (negro). Por el interior de los canales circula, por ejemplo, el hidrógeno que alimenta el electrodo.

Además del trazado de los canales para suministrar los reactantes, el propio material de los bipolar plates es objeto de una gran investigación pues debe presentar unas determinadas características para cumplir con las funciones anteriores. Típicamente se ha empleado grafito para elaborar los bipolar plates dadas su excelente resistencia a la corrosión y su baja resistencia de contacto. Sin embargo, este material es muy difícil de mecanizar sobre todo a nivel industrial y para grandes partidas, tiene un elevado coste lo cual a la industria no le suele gustar y es quebradizo. El hecho de ser quebradizo limita mucho su uso, sobre todo en aplicaciones en que el stack se encuentre sometido a vibraciones y fuerzas de inercia. ¿Os suena esto último de algo? ¿A un coche?, por ejemplo. Asimismo, el grafito presenta una baja resistencia estructural, vamos que no hacemos vida con él. Por eso se están investigando otras opciones, como el uso de metales y aleaciones metálicas o materiales compuestos que emplean rellenos conductores.



Bipolar plate con el electrodo y una junta para evitar fugas y el contacto eléctrico entre los bipolar plates. A continuación se situaría la membrana y el electrodo opuesto, luego se dispondría otro bipolar plate. Los cuatro agujeros que son pasantes en todos los bipolar plates sirven como conducciones de entrada y salida de reactantes a lo largo de todo el stack.

Los bipolar plates son uno de los elementos más importantes de las pilas de combustible pues constituyen casi todo su volumen, entre el 70% y el 80% de su peso y en torno al 45% de su coste. Su diseño es por tanto primordial, desde la elección del material hasta la configuración de canales elegida que puede mejorar la distribución de reactantes pero reducir el área de contacto con el electrodo disminuyendo sus cualidades eléctricas. Al final, como ocurre muchas veces en ingeniería, y esta no es menos, se trata de alcanzar una solución de compromiso.

Son varias las empresas que empiezan a apostar por las pilas de combustible en el mercado de las carretillas elevadoras. Por supuesto que será un proceso lento hasta su total introducción en los modelos de carretillas elevadoras.

Lo que si tenemos claro que se empieza ha trabajar duro en este contexto, con la finalidad de reducir los fenómenos de contaminación y reducción de CO2.

La industria de la maquinaria de manutención es consciente de la cantidad de maquinas en todo el mundo que operan con energías contaminantes. Sustituir las fuentes de energía actuales por unos procesos mas económicos de generación de energía y recuperación de la misma, supondría un gran avance para un planeta mas limpio.

