



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

Celdas de Combustible de Hidrógeno.

TRABAJO MONOGRÁFICO

Para obtener el Grado de

Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

Luis Arturo García Zapata.

SUPERVISORES

Dr. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR
M.E.S. ROBERTO ACOSTA OLEA
DRA.CECILIA LÓPEZ MATA.

Chetumal, Quintana Roo, Abril 2010



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
División de Ciencias e Ingeniería

Trabajo Monográfico elaborado bajo la supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

SUPERVISORES

Director: Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar _____

Asesor: M.E.S. Roberto Acosta Olea _____

Asesor: Dra. Cecilia López Mata _____

Chetumal, Quintana Roo, Abril de 2010

Agradecimientos

Para poder realizar éste trabajo monográfico de la mejor manera fue necesario el apoyo de muchas personas a las que me gustaría agradecer.

A mis padres el Ing. Luis Arturo García Vernon y la Sra. Silvia Zapata Ayuso, por la paciencia que me han tenido durante mis años de estudios y su apoyo en los momentos difíciles que han pasado. También a mi hermana Silvia por su apoyo en todo este tiempo.

A mis maestros, ya que sin sus enseñanzas y conocimientos, fueron la fuente para lograr mi meta de titulación como ingeniero.

A mi amigo Carlos Alejandro Cedano Martínez y a la Fam. Cedano Martínez, por su apoyo en los tiempos difíciles.

A la Profesora Concepción Isabel Lourdes García Vernon de Sánchez

A M. en C. Gilberto Mercado Escutia, por la ayuda brindada en la revisión de la monografía de manera extraoficial.

Al Ing. Gilberto Mercado López por su apoyo en los curso de robótica aplicada en la empresa CRYA.

Al la Profesora y M. en D.C. Guadalupe Zapata Ayuso.

Al M. en Mat. Ricardo Zapata Ayuso.

L Dr. Eduardo Suárez Morales Investigador titular de ECOSUR, por su valioso apoyo en la elaboración de la Monografía.

A la División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Quintana Roo, por su apoyo brindado en la impresión de la monografía.

Luis Arturo García Zapata.

Contenido

INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.1. Hidrógeno	8
1.1.1. Producción y almacenamiento.....	9
1.1.2. Seguridad	10
1.2. Oxígeno	10
1.2.1. Obtención y preparación del oxígeno	11
1.2.2. Propiedades del oxígeno	11
1.3. Definición de una celda de combustible.....	12
1.4. Antecedentes de las celdas de combustible	12
1.5. Funcionamiento.....	13
1.6. Panorama actual	15
1.6.1. Descripción	15
1.6.2. Apilamiento de celdas de combustible.....	20
1.6.3. Sistema de celdas de combustible.....	23
1.6.4. Funcionamiento ideal de una celda de combustible	24
1.6.5. Funcionamiento real	26
1.7. Funciones críticas de una celda de combustible	29
2.1. Introducción.....	32
2.2. Tipos de celdas de combustible	32
2.2.1. Celdas de Combustible de Polímero Electrolítico (Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC) o Celdas de Combustible de Membrana Protónica (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC).....	34
2.2.2. Celdas de Combustible Alcalinas (Alkaline Fuel Cell, AFC)	37
2.2.3. Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)	41
2.2.4. Celdas de combustible de Carbonato Fundido (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) ..	44
2.2.5. Celdas de Combustible de Óxido Sólido (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)	48
2.3. Aplicaciones y estado actual.....	50
2.3.1. Potencia eléctrica estacionaria.....	51
2.3.2. Generación distribuida	53
2.3.4. Fuerza motriz en vehículos	53
2.3.5. Potencia para ambientes cerrados y espaciales.....	54

2.4. Consideraciones de costo.....	55
Bibliografía.....	56
3.1. Introducción.....	57
3.2. Tablas de comparación.....	57
3.3. Los motores a base de celdas de combustible.....	61
3.4. Costo de las celdas de combustible en los automóviles.	62
Conclusiones	65
ANEXO I. Glosario	68

Listado de figuras

Figura 1. Sistema de una celda de combustible.....	14
Figura 2. Sistema de una celda de combustible.....	14
Figura 3. Esquema de una celda de combustible individual.....	16
Figura 4. Esquema de componentes de una monocelda de combustible.....	20
Figura 5. Esquema de un stack o conjunto de celdas de combustible.....	21
Figura 6. Esquema de un sistema bipolar-plano.....	22
Figura 7. Curva de corriente vs voltaje característica de una celda de combustible	27
Figura 8. Esquema general de las celdas de combustible.....	33
Figura 9. Esquema de una celda de combustible tipo PEFC o PEMFC.....	36
Figura 10. Esquema de una celda de combustible tipo AFC.....	40
Figura 11. Esquema de una celda de combustible tipo PAFC.....	43
Figura 12. Esquema de una celda de combustible tipo MCFC.....	47
Figura 13. Esquema de una celda de combustible tipo SOFC.....	49
Figura 14. Sistema de energía PC-25.....	52
Figura 15. Gráfica de eficiencia de las celdas de combustible	59
Figura 16. Mega wat de las celdas de combustible.....	60
Figura 17. Datos de inversión de las celdas de combustible	61

Listado de tablas

Tabla 1. Propiedades del hidrógeno y otros combustibles [2].....	8
Tabla 2. Propiedades del oxígeno	11
Tabla 3. Clasificación de las celdas de combustible [6].....	19
Tabla 4. Reacción electroquímica en una Celda de Combustible.....	24
Tabla 5. Reacciones de las celdas de combustible y la ecuación de Nernst correspondiente.....	25
Tabla 6. Características de la planta PC-25.....	52
Tabla 7. Generación distribuida.....	53
Tabla 8. Tabla general de las celdas de combustible. [1].....	57
Tabla 9. Características de las celdas de combustible [2], [3], [16].....	58
Tabla 10. Tabla de inversiones de empresas automovilísticas en prototipos de celdas de combustible	62
Tabla 11. Tabla de electricidad de las celdas de combustible [4-10].....	63
Tabla 12. Tabla económica de las celdas de combustible [6], [8], [10],[11-14].....	64

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la necesidad constante de energía para satisfacer a la enorme demanda de la humanidad que vive en el planeta y el uso que éstas tienen, no es suficiente, debido a que la población crece de manera desmedida, aunado al uso ineficiente que hay de la misma.

La producción de energía a nivel mundial es, principalmente, a base de petróleo, debido a su disponibilidad, pero existen grandes inconvenientes al utilizarlo como productor de energía. Uno de éstos, es la contaminación excesiva que se produce al someterlo a combustión; otro, al efecto nocivo por la contaminación, producto de los altos niveles de monóxido y bióxido de carbono en la atmósfera. Cabe mencionar que el combustible fósil se agota y las reservas están estimadas para diez años aproximadamente [1], pero esto podría ser menos, debido al ritmo acelerado de su consumo.

En la actualidad, para satisfacer las necesidades de energía se han creado fuentes alternas de producción de energía, conocidas como energías renovables. Estas fuentes generan energía útil con base en los elementos naturales que nos rodean, sin producir contaminación alguna, entre ellas se encuentran, la solar, que obtiene la energía a través del Sol; la eólica, que obtiene energía a través del viento; la geotérmica, que obtiene la energía a través del calor producido a grandes profundidades de la Tierra; la biomasa, que usa los desperdicios orgánicos que producen las personas y las celdas de combustible. Esta última, es más antigua que las otras [1], pero es en esta época cuando han empezado las investigaciones sobre este tipo de tecnología, la cual obtiene energía a partir de la combinación del oxígeno con el hidrógeno.

Las celdas de combustible son la base de este trabajo monográfico, el cual viene a contribuir al acervo bibliográfico en la Universidad de Quintana Roo, ya que en este documento se hace una síntesis de las diferentes celdas de combustible existentes en el mercado actual. La información contenida en este documento permite conocer los diferentes tipos de celdas de combustibles, sus usos, aplicaciones y costos de operación.

OBJETIVO GENERAL

Crear una fuente de consulta sobre las celdas de combustible de hidrógeno, que contenga información referente a los tipos de celdas existentes en la actualidad, su principio de operación, materiales utilizados, costos y aplicaciones.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Proporcionar la información básica referente al funcionamiento de las celdas de combustible.
2. Documentar los tipos de celdas de combustible y sus aplicaciones más comunes.
3. Obtener un documento relacionado con el tema de las celdas de combustible, de fácil comprensión para las personas que no sean especialistas en el tema.

CAPÍTULO I

En este capítulo se presentan los conceptos básicos y los antecedentes de las celdas de combustible hasta la fecha, así como la información de los combustibles que utilizan dichas celdas.

1.1. Hidrógeno

El átomo de hidrógeno (H_2) está formado por un protón y un electrón. En condiciones normales se presenta como un gas estable en condiciones diatómicas (H_2). Es inodoro, incoloro, insípido y no es tóxico.

El H_2 es el elemento más abundante del Universo y, por su capacidad de reaccionar con el oxígeno liberando energía, constituye un excelente combustible. Pero existe un inconveniente: el H_2 de la Tierra está contenido en su mayoría en agua. Por lo que no es una fuente de combustible, sino que hay que producirlo para utilizarlo como combustible, siendo un vector energético importante, como la electricidad, por ejemplo.

En la tabla 1 se presentan las propiedades físicas y químicas del hidrógeno, comparado con otros combustibles:

Tabla 1. Propiedades del hidrógeno y otros combustibles [2]

Propiedades	Hidrógeno	Gasolina	Propano	Metano
Poder calorífico inferior (kJ/gr)	120	43	46	50
Densidad gas (kg/m^3)	0.090	-	2.010	0.717
Densidad energética (MJ/m^3)	10.8	-	92.5	35.8
Densidad líquido (kg/l)	0.071	0.733	-	-
Densidad (l) energética líquido (MJ/l)	10.8	31.5	-	-
Límites de inflamabilidad (%)	4.0-75	1.0 – 7.6	2.1 – 9.5	5.3 – 15.0
Límites de detonación (%)	18.3-59	1.1-3-3	3.1-7	6.3-13.5
Mínima energía de activación (MJ)	0.2	0.24	0.26	0.29
Temperatura de combustión espontánea (K)	858	501-744	760	813
Emisiones (mg CO_2 /kJ)	0	~80	65	66
Visibilidad de la llama	No	Sí	Sí	Sí
Toxicidad (combustibles / emisiones)	No/no	Sí / sí	Sí / sí	Sí / sí

Como se observa, el H_2 tiene un gran poder calorífico en cuanto unidad de masa se refiere, (un gramo de hidrógeno tiene más del doble de energía que un gramo de gas natural). Pero esta propiedad tiene como limitante su baja densidad, en comparación con

otros combustibles: un metro cúbico de hidrógeno libera mucho menos energía que la misma cantidad de otros combustibles gaseosos. Un litro de hidrógeno contiene menos de un 10% de energía que un litro de gasolina o gasóleo.

Entre las ventajas que caben mencionar del hidrógeno, es su nula producción de CO₂, ya que sólo produce agua como subproducto. Además, es un combustible muy volátil, lo cual lo hace muy seguro en espacios abiertos.

Por el contrario, una de las desventajas del hidrógeno, es que no es una gran fuente de energía, sino lo contrario, se necesita energía para poder producirlo. Además de su baja densidad y baja energía de activación (esto es la energía que necesita el hidrógeno para entrar en combustión, que puede ser una ventaja si se desea buscar una reacción de combustión o desventaja porque se pueden producir reacciones no deseadas). Otra desventaja es su alta fugacidad, la cual implica tener una mayor seguridad del hidrógeno en espacios cerrados. [2]

1.1.1. Producción y almacenamiento

El hidrógeno se puede producir a partir de diversas fuentes de energía como son: [2]

- ✓ *Combustibles fósiles.* Por métodos de reacciones químicas con rendimientos energéticos altos:
 - Reformado de hidrocarburos (actualmente se obtiene el 95% del H₂, a partir del gas natural);
 - Oxidación de hidrocarburos (como carbón y gas natural);
 - Gasificación de carbón o biomasa.
- ✓ *A partir de electricidad.* Por electrolisis (con electrolizadores que tienen del orden del 80-90%).
- ✓ *Como subproductos de industrias* (algunas industrias químicas que lo pueden vender).
- ✓ *Otros métodos.*

Debido a la baja densidad energética por unidad de volumen del hidrógeno, el almacenamiento se presenta como una tarea en la cual se necesitan nuevos desarrollos. Entre las opciones de almacenamiento se encuentran:

- ✓ *Hidrógeno comprimido* (a presión estándar de 200 bares, este método de almacenamiento es el más común para aplicaciones a pequeña y gran escala y para transporte. También se almacena en depósitos de 350 y 700 bares, dependiendo de la aplicación final);
- ✓ *Hidrógeno líquido*, en contenedores criogénicos (con temperaturas del orden de 20 K, es decir, -253°C, alternativa al hidrógeno comprimido);
- ✓ *En hidruros metálicos* (tecnología novedosa en transportes y portátiles);
- ✓ *Nanotubos de carbón*;
- ✓ *Otros*.

El hidrógeno puede ser transportado en depósitos o gaseoductos. El almacenamiento supone normalmente un coste energético (10% para compresión de alta presión y 30% para licuefacción). [2]

1.1.2. Seguridad

El hidrógeno es un combustible y, como tal, deben considerarse ciertas medidas para tener seguridad en las instalaciones. Por el carácter volátil del hidrógeno, cualquier fuga que se produzca, tenderá a subir rápidamente a la atmósfera, lo que representa una ventaja en espacios abiertos, pero no en espacios confinados, donde se pueden tener grandes concentraciones de hidrógeno y puede ser explosivo. Por tanto, es importante la adecuada ventilación de zonas confinadas como garajes o túneles. Dado que la flama del hidrógeno no es visible y, aunado a la ausencia de olor (inodoro), hace necesario utilizar sensores que detecten el calor y la flama del hidrógeno. Por otra parte, debido a su baja energía de activación, una chispa o carga electrostática es necesaria para que comience una reacción no deseada. [2]

1.2. Oxígeno

El oxígeno constituye entre el 21 y 23.15% de la masa total atmosférica, el 85.5% de la masa de los océanos (el agua pura contiene un 88.8% de oxígeno), el 46.7% de la masa de la corteza terrestre (como componente de la mayoría de las rocas y minerales), constituye el 60% del cuerpo humano, se encuentra en todos los tejidos vivos, ya sean

plantas o animales, incluyendo al ser humano; todos requieren de este elemento, ya sea libre o combinado, para mantener la vida. [3]

1.2.1. Obtención y preparación del oxígeno

En el laboratorio, el oxígeno se obtiene a partir de sales, tales como: clorato de potasio, peróxido de bario y peróxido de sodio. La obtención a nivel industrial del oxígeno es por medio de electrólisis de agua y de destilación fraccionada de aire líquido. En este último método, se licua el aire y se deja evaporar. En el aire líquido, el nitrógeno es muy volátil, por lo cual, se evapora antes y, después, se quema el oxígeno en estado líquido. Finalmente, se almacena y se transporta de manera líquida o gaseosa. [3]

1.2.2. Propiedades del oxígeno

El oxígeno es un gas inodoro, incoloro e insípido, ligeramente soluble en agua. Y es 1.105 veces más pesado que el aire. [3]

El número atómico del oxígeno es el 8 y su peso atómico es de 15.9994. El oxígeno en estado gaseoso, existe en forma de moléculas diatómicas (O_2), pero también existe en forma triatómica llamada ozono (O_3). [4]

Tabla 2. Propiedades del oxígeno

Nombre	Oxígeno
Número atómico	8
Valencia	2
Estado de oxidación	-2
Electronegatividad	3.5
Radio covalente (Å)	.73
Radio iónico (Å)	1.4
Radio atómico (Å)	--
Configuración electrónica	1s22s22p4
Primer potencial de ionización (eV)	13.7
Masa atómica (g/mol)	15,9994
Densidad (Kg/m3)	1.429
Punto de ebullición(°C)	-183
Punto de fusión (°C)	-218.8

1.3. Definición de una celda de combustible

Una celda de combustible opera como una batería. Genera electricidad combinando hidrógeno y oxígeno, electroquímicamente sin ninguna combustión. A diferencia de las baterías, una celda de combustible no se agota, ni requiere recarga. Ésta producirá energía en forma de electricidad y calor mientras se le provea de hidrógeno y oxígeno.

Lo que hace únicas a las celdas de combustible, es que pueden producir energía de alta calidad, a partir de combustibles de hidrocarburos, tales como metanol y etanol sin combustión. Para el caso en que el combustible sea hidrógeno puro y el oxidante sea oxígeno puro, los únicos productos finales de una celda de combustible son energía eléctrica, calor residual y agua.

1.4. Antecedentes de las celdas de combustible

El principio de la celda de combustible (o 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". [5]

El principio de funcionamiento en el que se basan las celdas de combustible, es el inverso al de la reacción electrolítica; en las celdas se combinan oxígeno e hidrógeno para formar agua, con la consecuente producción de energía eléctrica y calor. Se trata, por lo tanto, de una reacción limpia, en la que el único subproducto es el vapor de agua, que puede ser liberado a la atmósfera, sin ningún peligro para el medio ambiente.

La primera celda de combustible fue construida en 1839, por Sir William Grove, un juez y científico galés, quien demostró que la combinación de hidrógeno y oxígeno generaba electricidad, además de agua y calor. [5]

Para fabricar la celda de combustible, se utilizaron materiales similares a los usados hoy en día para la celda de combustible de ácido fosfórico. Fue hasta el año de 1959, cuando el ingeniero británico Francis Thomas Bacon desarrolló con éxito una celda inmóvil de combustible de 5 kilovatios. En 1959, un equipo encabezado por Harry Ihrig, construyó un tractor basado en una celda de combustible de 15 kilovatios para Allis-Chalmers, el cual

fue expuesto en Estados Unidos, en las ferias del estado. Este sistema utilizó hidróxido de potasio como electrolito e hidrógeno y oxígeno comprimidos como reactivos. [5]

El verdadero interés en celdas de combustible como un generador de energía, se inició hacia comienzos de los años sesenta del Siglo XX, cuando el programa espacial de los Estados Unidos seleccionó las celdas de combustible para proporcionar electricidad y agua a las naves espaciales Géminis y Apolo, [5]

Las primeras celdas de combustible solían requerir temperaturas muy elevadas, lo que era un problema en muchos usos. Los materiales utilizados eran extremadamente costosos y las celdas requerían hidrógeno y oxígeno muy puros para su funcionamiento.

A pesar de su éxito en programas espaciales, los sistemas con celdas de combustible eran limitados a éstos, en donde el alto costo se podía tolerar. Fue hasta finales de los 80's y principios de los 90's del Siglo XX, cuando las celdas de combustible se convirtieron en una verdadera opción de uso más amplio. Varias innovaciones, tales como catalizador con menos platino y electrodos de película fina, bajaron el costo de éstas, haciendo que el desarrollo de Sistemas de Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio de Protones [Polimer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC], fuese más viable. [5]

1.5. Funcionamiento

Las moléculas de hidrógeno (H_2) penetran por el electrodo positivo (ánodo) en donde se disocia en presencia del catalizador, en iones positivos H^+ y electrones. Los iones positivos del hidrógeno se escapan y se mueven a través del electrolito en dirección al cátodo, dejando a los electrones libres en el ánodo como se ilustra en las Figuras 1 y 2. Por otra parte, las moléculas de oxígeno (O_2) procedentes del aire penetran por el electrodo opuesto (cátodo) y se disocian igualmente en presencia del catalizador en iones O^{2-} .

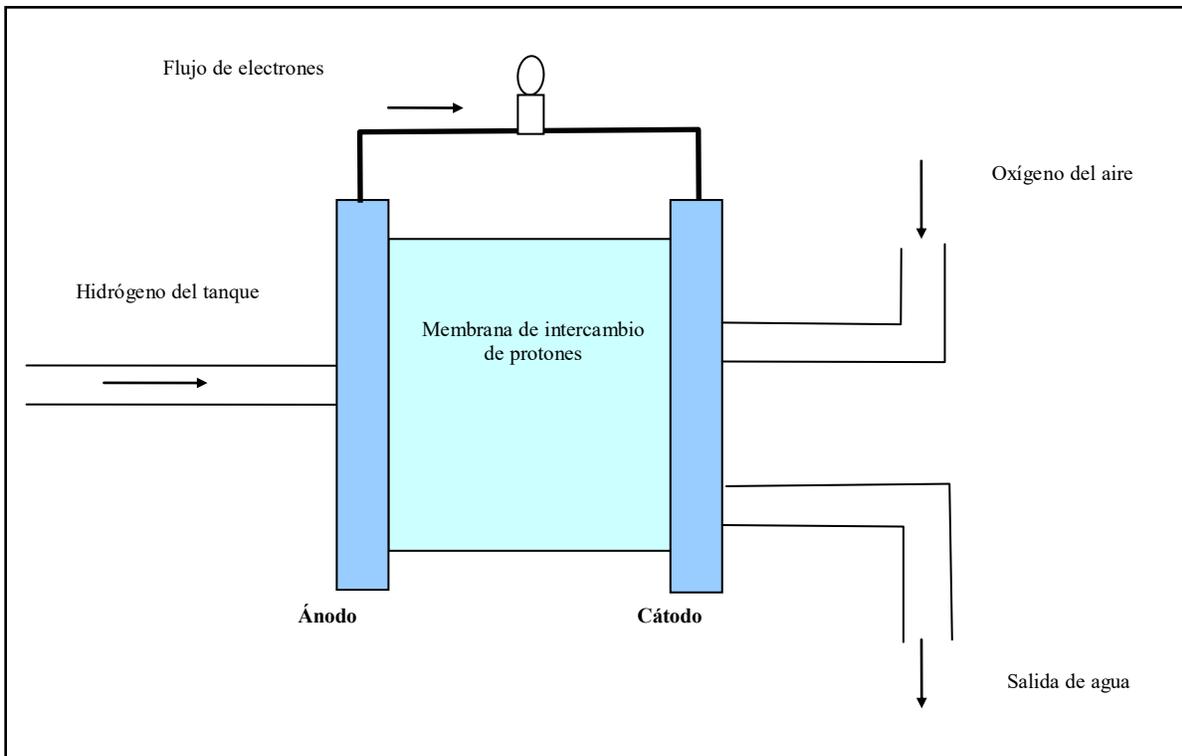


Figura 1. Sistema de una celda de combustible

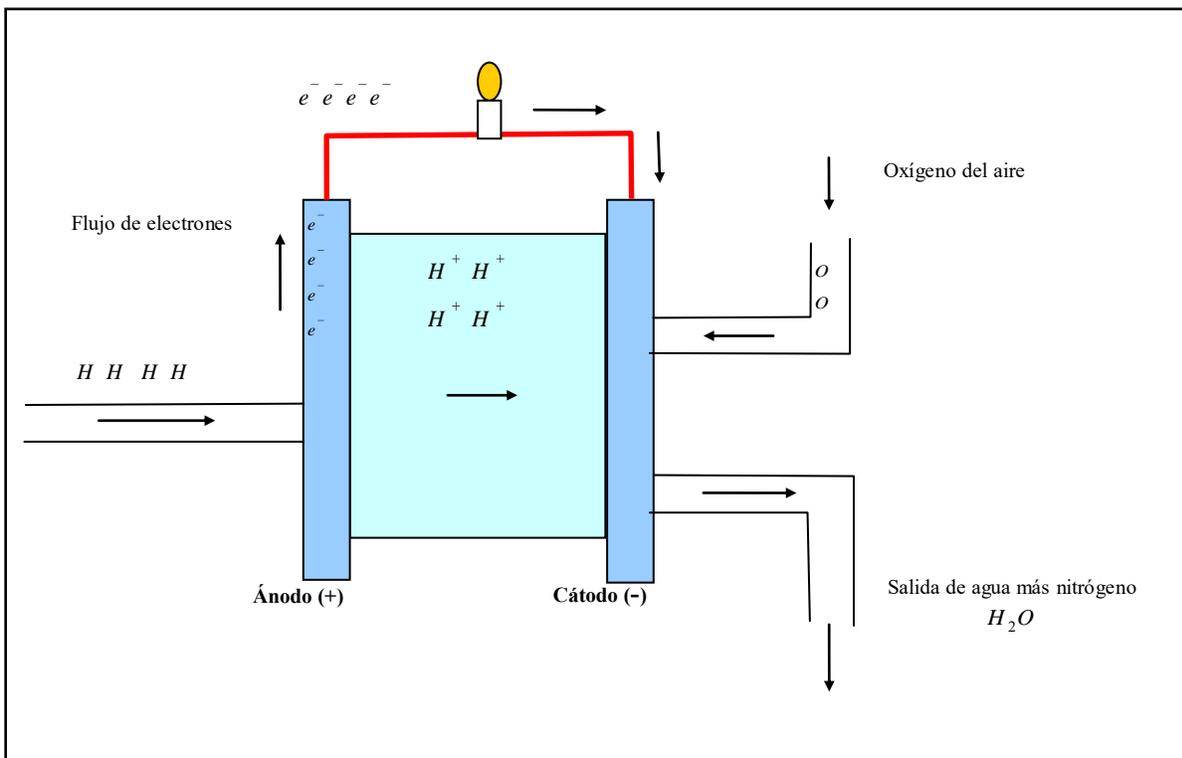


Figura 2. Sistema de una celda de combustible

Si se establece un circuito eléctrico entre el ánodo y el cátodo, los electrones lo recorrerán, produciendo una corriente eléctrica. En el cátodo se vuelven a combinar los iones de hidrógeno, de oxígeno y los electrones, para formar moléculas de agua. Además de esta energía eléctrica, se produce un importante desprendimiento de energía térmica, en forma de calor.

Para ejemplificar el funcionamiento electroquímico que se produce en una celda de hidrógeno, consideremos que dos moléculas de hidrógeno $2H_2$ provenientes de un tanque, llegan al ánodo, en donde se disocian en cuatro iones de hidrógeno y cuatro electrones, este proceso se describe por medio de la fórmula $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$. Ambos grupos viajan hacia el cátodo por distintos caminos, los cuatro iones de hidrógeno lo hacen a través del electrolito y los cuatro electrones se conducen por el conductor del circuito eléctrico.

Una vez que llegan al cátodo, se produce otra reacción, los iones de hidrógeno se combinan con los electrones y las moléculas de oxígeno provenientes del aire. Esta reacción es representada por la fórmula $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$.

1.6. Panorama actual

1.6.1. Descripción

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que transforman directamente la energía química de una reacción en energía eléctrica. La estructura física básica de una celda consiste en una capa (membrana) de electrolito que está en contacto con los electrodos porosos (cátodo y ánodo) de ambos lados. Una representación esquemática de una celda con la reacción/producto de gases y la dirección de conducción de flujo de los iones a través de la celda, se muestra en la Figura 3.

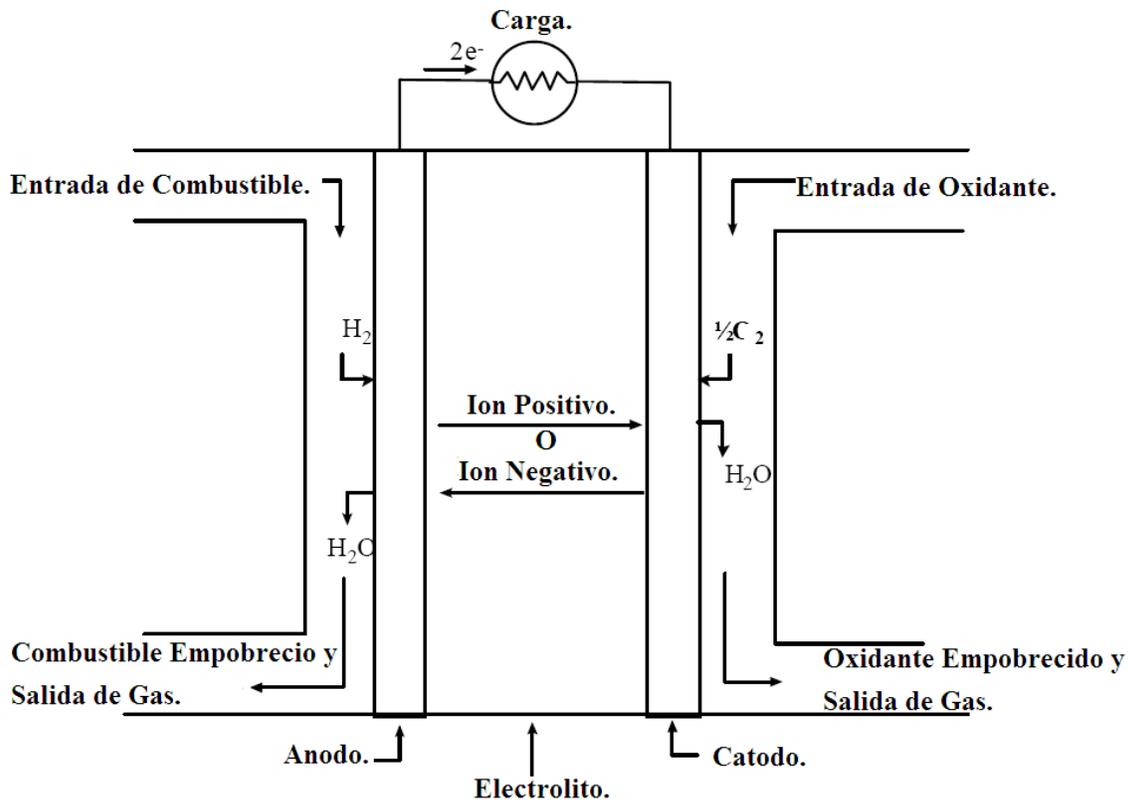


Figura 3. Esquema de una celda de combustible individual

En una celda de combustible típica, los gases que sirven como combustible son agregados constantemente en el compartimento del ánodo (hidrógeno) y cátodo (oxígeno), la reacción electroquímica toma lugar en los electrodos para producir una corriente eléctrica. La celda de combustible tiene características y componentes similares a los de una batería convencional. La batería es un dispositivo de almacenamiento de energía, la máxima energía está determinada por la cantidad de reactor químico almacenado en la batería. La batería deja de producir energía cuando el reactor químico se consume en su totalidad. La celda de combustible, por otro lado, es un dispositivo de energía que teóricamente tiene la capacidad de producir energía eléctrica durante el tiempo que se suministre combustible y oxidante en los electrodos.

El hidrógeno es el combustible para aplicaciones predilecto, por su alta reactividad cuando se utiliza el catalizador adecuado, su facilidad para ser sintetizado a partir de

hidrocarburos, su alta densidad de energía cuando está almacenado criogénicamente para aplicaciones en ambiente cerrado, tanto como en el espacio. De igual manera, el oxidante más común es oxígeno, ya que es económico y de fácil obtención en el aire para aplicaciones terrestres, de fácil almacenamiento y ambiente cerrado. Tres fases de interface establecidas entre el catalizador, el electrolito y los reactivos en la región de los electrodos porosos juegan un papel crucial en el rendimiento de una celda de combustible de hidrógeno, particularmente, en las celdas de combustible de electrolito líquido. En muchas de las celdas de combustible, los gases reactivos pasan a través de una delgada capa de electrolito, que mojan porciones del electrodo poroso y reaccionan electroquímicamente en la superficie de electrodo correspondiente. Si el electrodo poroso contiene una gran cantidad de electrolito, éste se puede “inundar” y restringir el paso transporte de los gases en la fase de reacción del electrolito. La consecuencia, es la reducción de la eficiencia electroquímica de los electrodos porosos. Así, se pierde el delicado balance entre el electrolito, los electrodos y los gases en la estructura de los electrodos porosos. El reciente esfuerzo para desarrollar las celdas de combustible, está enfocado en la reducción del espesor de los componentes de la celda, mientras se refina, improvisa y mejora la estructura de los electrodos porosos y la fase de electrolito con el objetivo de obtener una más alta y estable eficiencia electroquímica, así como un costo mucho menor.

El electrolito no sólo transporta reactivos disueltos en el electrodo, sino también realiza la transportación de las cargas iónicas entre los electrodos, así cierra el circuito eléctrico de la celda, como se muestra en la Figura 3. También proporciona una barrera física para prevenir que los gases de combustible y oxidante se mezclen directamente.

Las funciones de los electrodos porosos son: [6]

1. Proporcionar una superficie donde tiene lugar, la reacción del gas/líquido ionizado o deionizado.
2. La conducción, fuera o dentro de los iones, a través de las tres fases de interface, una vez que se hayan formado (por eso el electrodo debe ser de un material que tenga buena conducción eléctrica).
3. Proporcionar una barrera física que separe la fase de electrolito y gas.

Un elemento del punto 1 es que, a fin de aumentar la tasa de reacción, el material del electrodo debe ser un catalizador, así como un buen conductor, en lugar de ser sólo un sólido poroso. La función del catalizador de los electrodos de las celdas de combustible de bajas temperaturas es más importante y menor en celdas de combustible de altas temperaturas, porque la tasa de reacción de ionización aumenta de acuerdo con la temperatura. Otro elemento es que el electrodo poroso debe ser permeable para ambos, el electrolito y los gases, pero también no debe ser un medio que se inunde por el electrolito o se seque por los gases en una sola cara.

Una variedad de celdas de combustible están en diferentes etapas de desarrollo, se pueden clasificar de acuerdo al uso en diversas categorías, dependiendo del tipo de combustible y de oxidante que utilicen, así, si el combustible se produce fuera de la celda de combustible, es una regeneración externa y, si es dentro de la celda, es una regeneración interna. También se clasifican por el tipo de electrolito y de temperatura de operación, si la alimentación de los reactivos son introducidos a los colectores de las celdas de manera interna o externa, etc. La clasificación más común de las celdas, es de acuerdo al electrolito que manejan y son: [6]

1. Celdas de Combustible de Membrana Protónica, Polymer Electrolyte Fuel Cell ó Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. (PEMFC, PEFC). Temperatura de operación, 80°C.
2. Celdas de Combustible Alcalinas, Alkaline Fuel Cell (AFC). Temperatura de operación, 100°C.
3. Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico, Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC). Temperatura de operación, 200°C.
4. Celdas de Combustible de Carbonato Fundido, Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC). Temperatura de operación, 650°C.
5. Celdas de Combustible de Óxido Sólido, Solid Oxide Fuel Cell. (SOFC). Temperatura de operación, 650°.
6. Celdas de Combustible de Óxido Sólido de Temperatura Intermedia, Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell (ITSOFC). Temperatura de operación, 800°C.
7. Celdas de Combustible de Óxido Sólido Tubulares, Tubular Solid Oxide Fuel Cell (TSOFC). Temperatura de operación, 1000°C.

Estas celdas están listadas de acuerdo a la aproximación de su temperatura de operación.

Tabla 3. Clasificación de las celdas de combustible [6]

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	TSOFC
Electrolito	Membrana de Intercambio de Protones	Hidróxido de Potasio	Ácido Fosfórico Líquido	Carbonato Fundido Líquido	Cerámica	Cerámica
Temperatura de operación	80°C	65 - 220°C	205°C	650°C	600-800°C	800-1000°C
Donador de Electrones	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	O ²⁻
Regeneración externa para CH4	Si	Si	Si	No	No	No
Componentes de la celda	Base de carbón	Base de carbón	Base de grafito	Base de acero inoxidable	Cerámica	Cerámica.
Catalizador	Platino	Platino	Platino	Níquel		
Manejo del agua de salida	Evaporada	Evaporada	Evaporada	Producto gaseoso	Producto gaseoso	Producto gaseoso
Manejo del calor de salida	Gas procesado y medio de enfriamiento	Gas procesado y cálculo de electrolito	Gas procesado y medio de enfriamiento	Reformación interna y gas procesado	Reformación interna y gas procesado	Reformación interna y gas procesado

1.6.2. Apilamiento de celdas de combustible

Una celda de combustible produce una diferencia de potencial algo mayor que un voltio en circuito abierto, por lo que, para producir tensiones más elevadas, se recurre a la disposición en serie de celdas formando un "stack" o apilamiento. A este apilamiento de celdas debidamente implementado en una estructura que permita disipar el calor, posibilite la circulación necesaria de los gases y ofrezca los terminales positivo y negativo para la utilización de la energía eléctrica producida, se le denomina pila de combustible.

La unidad básica de una celda de combustible se denomina "monocelda". Una celda está formada por un "sandwich" de dos electrodos porosos con una lámina de electrolito entre ambos (ver Figura 4).

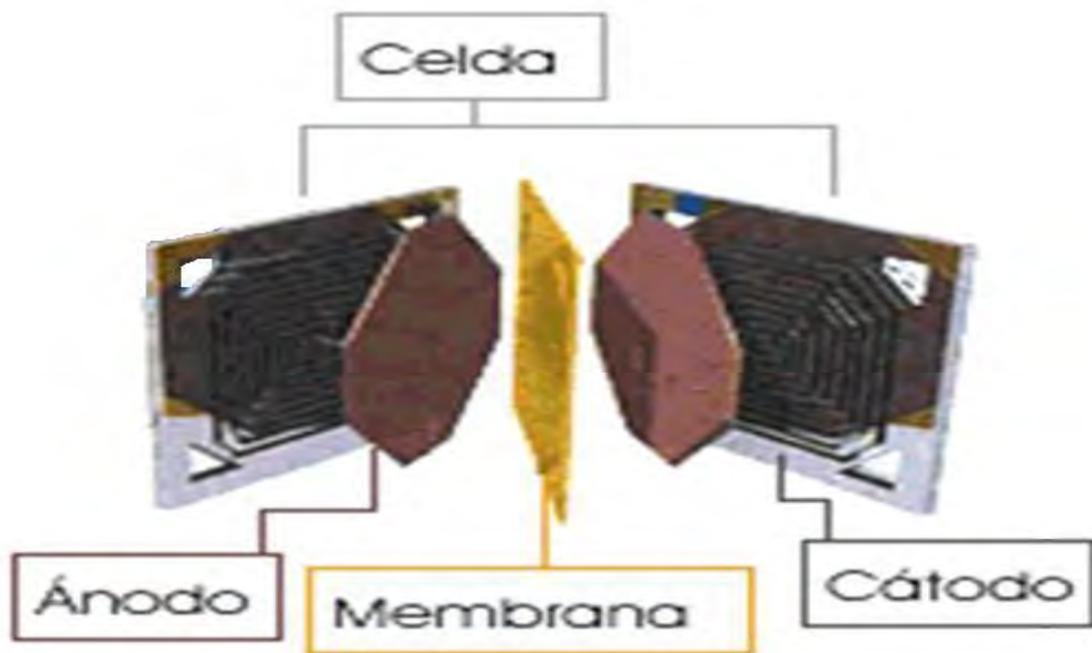


Figura 4. Esquema de componentes de una monocelda de combustible

Un stack, en sí, es un conjunto de celdas de combustible, la cual está conformada por un plato bipolar, un plato mono polar, una membrana protónica, sello, placa aislante y placa de colección (ver Figura 5).

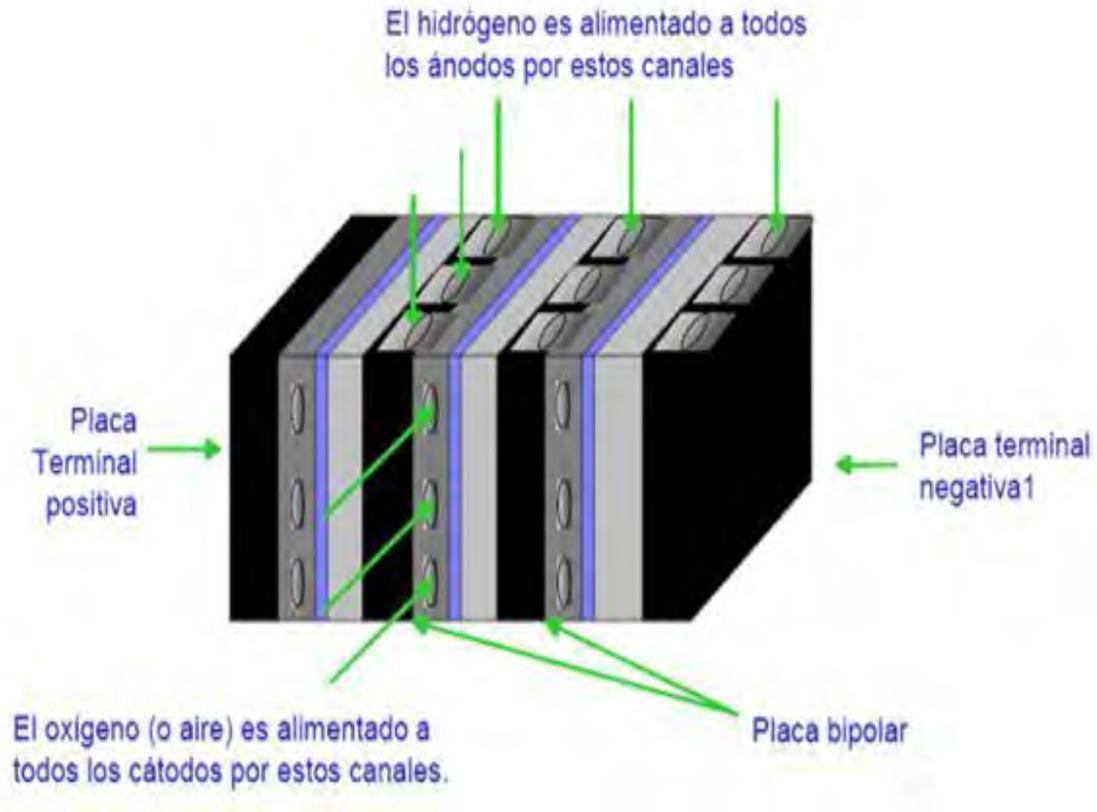


Figura 5. Esquema de un stack o conjunto de celdas de combustible

El diseño de stack más común es conocido como bipolar-plano, donde las celdas de combustible individuales son conectadas entre ellas con interconexiones eléctricas. De acuerdo a la configuración del plato, éste tiene dos funciones:

- Proporcionar una conexión eléctrica entre las celdas, especialmente entre los platos.
- Y, proporcionar una barrera que separa al combustible y oxidante de elementos ajenos a ellos.

En muchos diseños de bipolar-plano, las interconexiones incluyen canales de distribución de los gases, que los reparten equitativamente en la celda. El arreglo bipolar-plano es muy sencillo y también lleva una corriente a la parte eléctrica (lo cual disminuye la resistencia de la celda).

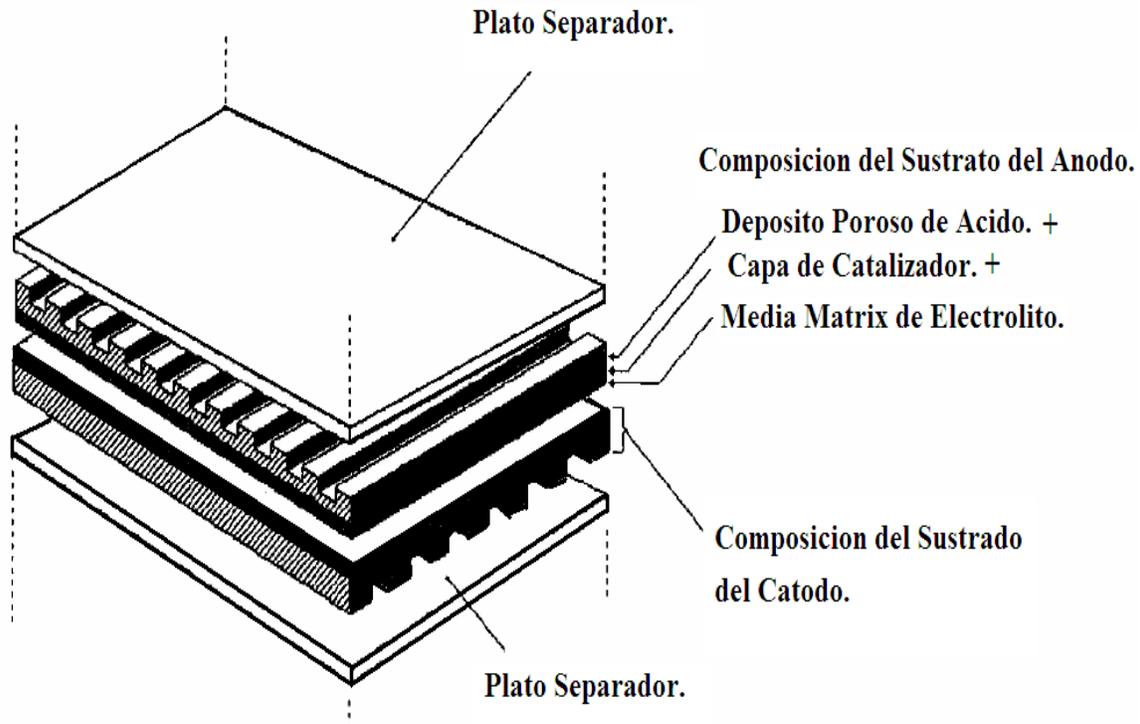


Figura 6. Esquema de un sistema bipolar-plano

El sistema bipolar-plano, puede ser caracterizado de acuerdo al arreglo de distribución de gas que tenga:

- *Flujo Cruzado* (Cross-Flow). El aire y combustible fluyen perpendicularmente uno de otro.
- *Flujo Continuo* (Co-Flow). El aire y combustible fluyen paralelo uno de otro, pero en la misma dirección.
- *Flujo Contrario* (Counter-Flow). El aire y combustible fluyen paralelo uno de otro, pero en direcciones contrarias.
- *Flujo de Serpentin* (Serpentin-Flow). El aire y combustible fluyen en forma de zigzag.
- *Flujo en Espiral* (Spiral-Flow). Aplica únicamente para celdas de combustible circulares.

El arreglo del diseño de flujo de gas depende del tipo de celda, aplicaciones y otras consideraciones. La tubería colectora de gas en el stack bipolar de una celda de combustible, puede lograrse de varias maneras:

- ❖ *Interno*. Los colectores atraviesan la celda de combustible.
- ❖ *Integrado*. Los colectores no penetran la celda, pero están integrados a las interconexiones.
- ❖ *Externo*. La colección es totalmente externo a la celda de combustible.

1.6.3. Sistema de celdas de combustible

Junto con el stack, el sistema de celdas de combustible necesita unos subsistemas que son conocidos, como Balance de Planta (Balance of Plant, BoP). Junto con el stack, el BoP forma el sistema de celdas de combustible. El arreglo más preciso del BoP depende del tipo de celda de combustible, así como de su aplicación. Las condiciones específicas de operación y los requerimientos individuales de las celdas y stacks, determinan las características del BoP. La mayoría de los sistemas de celdas de combustible contienen:

- ❖ *Preparación del combustible*. Con excepción en las celdas donde se usan combustibles altamente puros, generalmente se usa un preparador de combustible, el cual usualmente remueve las impurezas y acondiciona térmicamente al combustible. En las celdas de combustible donde se requiere una pureza en los combustibles, se utilizan estos sistemas, donde, por lo general, el combustible reacciona con aire o gas para producir hidrógeno enriquecido.
- ❖ *Suministro de aire*. En la mayoría de los sistemas de celdas de combustible, se usan compresores de aire, así como un buen filtro de aire.
- ❖ *Mantenimiento térmico*. Todos los sistemas de celdas de combustible, requieren un mantenimiento térmico cuidadoso, sobre la celda de combustible.
- ❖ *Mantenimiento de agua*. El agua es necesaria en algunas partes de la celda de combustible, así también, es el producto de la reacción de la celda misma. Para evitar tener que alimentar de agua, además de combustible y, para garantizar su buen funcionamiento, los sistemas de mantenimiento de agua son requeridos en la mayoría de los sistemas de celdas de combustibles.

- ❖ *Equipo de acondicionamiento eléctrico.* Como la celda de combustible provee una variación de voltaje de corriente directa en la salida, ésta no se puede usar directamente, por lo que se necesita en los sistemas de celdas de combustible.

1.6.4. Funcionamiento ideal de una celda de combustible

El funcionamiento ideal de una celda de combustible depende de la reacción electroquímica, la cual ocurre con diferentes combustibles y oxígeno. Las celdas de combustible de bajas temperaturas requieren metales nobles de electro-catalizador, para lograr en la práctica las tasas de reacción en el ánodo y en el cátodo y sólo el H₂ es el combustible aceptado. Con las celdas de combustible de alta temperatura, los requerimientos de catalizador son menos exigentes y el número de combustibles es mayor. El monóxido de carbono contamina o envenena a los metales nobles, como el platino, que se utiliza como catalizador en las celdas de combustible de baja temperatura, pero sirve como una fuente potencial de H₂. Las celdas de combustible de altas temperaturas no usan metales nobles como catalizador e, incluso, utilizan níquel.

Tabla 4. Reacción electroquímica en una Celda de Combustible.

Celda de combustible	Reacción en el ánodo	Reacción en el cátodo
Membrana de Intercambio de Protones (PEM) y Ácido Fosfórico (PAFC)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Alcalinas	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
Carbonato fundido	$H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^- \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^-$
Óxido Sólido	$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^- \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^- \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^-$

CO = Monóxido de Carbono

e⁻ = Electrón

H₂O = Agua

CO₂ = Bióxido de Carbono

H⁺ = Ion de Hidrógeno

O₂ = Oxígeno

CO₃ = Ion de Carbono

H₂ = Hidrógeno

OH⁺ = Ion Hidroxil

El funcionamiento ideal de una celda, se define por su potencial de Nernst, representado como voltaje de la celda.

La ecuación de Nernst proporciona una relación entre el potencial estándar ideal de la reacción de la celda y el potencial de equilibrio ideal a otras temperaturas y presiones parciales de reactivos y productos. Una vez que el potencial estándar ideal es conocido, el voltaje ideal puede ser determinado a temperaturas y presiones a través del uso de esta ecuación. De acuerdo a la ecuación de Nernst para la reacción de hidrógeno, el potencial ideal de una celda a una temperatura dada, puede aumentar al operar a altas presiones el reactivo y se han observado mejoras en el rendimiento de las celdas de combustible a altas presiones.

La reacción de H₂ y O₂ producen agua. Cuando un combustible que contiene carbón es introducido en el ánodo también se produce CO₂. Para una MCFC el CO₂ es requerido en el cátodo para mantener una concentración constante de carbono en el electrolito. Porque el CO₂ se produce en el ánodo y se consume en el cátodo de una MFC y porque la concentración de la alimentación en al ánodo y en el cátodo no son necesariamente iguales.

Tabla 5. Reacciones de las celdas de combustible y la ecuación de Nernst correspondiente

Reacción de las celdas	Ecuación de Nernst
$H_2 + \frac{1}{2} O \rightarrow H_2O$	$E = E^\circ + (RT/2F) \ln [P_{H_2}/P_{H_2O}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 + CO_{2(c)} \rightarrow H_2 + CO_{2(a)}$	$E = E^\circ + (RT/2F) \ln [P_{H_2}/P_{H_2O} (P_{CO_2})_{(a)}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2} (P_{CO_2})_{(c)}]$
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$E = E^\circ + (RT/2F) \ln [P_{CO}/P_{CO_2}] + (RT/2F) \ln [P_{O_2}^{1/2}]$
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$	$E = E^\circ + (RT/8F) \ln [P_{CH_4}/P_{H_2O}^2 P_{CO_2}]$

(a)= Ánodo

P= Presión del gas

(c)= Cátodo

R= Constante universal de gas

E= Potencial de equilibrio

T= Temperatura absoluta

El potencial ideal estándar de una celda de H_2/O_2 (E°) es de 1.229 volts con agua de producto y 1.18 volts con agua y gas como producto. La fuerza de potencia también puede ser expresada como energía libre de Gibbs, para la reacción de hidrógeno y oxígeno.

1.6.5. Funcionamiento real

Para la caracterización de las celdas de combustible, se han utilizado modelos computacionales complejos, basados en los detalles de los componentes de diseño de la celda, (dimensiones físicas, materiales, etc.), junto con consideraciones físicas (efectos de transporte, electroquímica, etc.). Estos códigos, a menudo de propiedad, son necesarios para diseñar y desarrollar las celdas de combustible, aunque sería incómodo y una pérdida de tiempo analizar el modelo del sistema. La simplificación de los enfoques se usa normalmente para el estudio de los sistemas. Un enfoque sería, por ejemplo, un examen de conducta para cada condición esperada en el análisis del sistema. Como sea, esto podría ser costoso. En lugar de ello, es prudente desarrollar correlaciones basadas en modelos termodinámicos que sirvan para demostrar el funcionamiento de las celdas a diferentes condiciones, tales como presión, temperatura y constitución del gas. El modelo termodinámico es usado para representar la ecuación así, sólo un número limitado de pruebas son necesarias para definir las constantes de diseño de la ecuación. Se pueden aplicar ajustes a un rendimiento de referencia, a condiciones establecidas para alcanzar el funcionamiento deseado.

El trabajo útil de una celda se obtiene a partir de la curva corriente *vs* voltaje, pero el funcionamiento real de la celda disminuye el equilibrio potencial, por pérdidas irreversibles que se muestran en la Figura 7. Prácticamente, varias fuentes son la causa de esta pérdida irreversible en la celda de combustible. Las pérdidas, que también son conocidas como polarización, sobre potencia o sobre voltaje (η), se originan principalmente en tres fuentes: (1) polarización activa (η_{act}), (2) polarización óhmica (η_{ohm}), (3) polarización concentrada (η_{conc}). Estas pérdidas afectan el voltaje de la celda (V), para una celda que está por debajo de la potencia ideal E , ($V=E$ -Pérdidas).

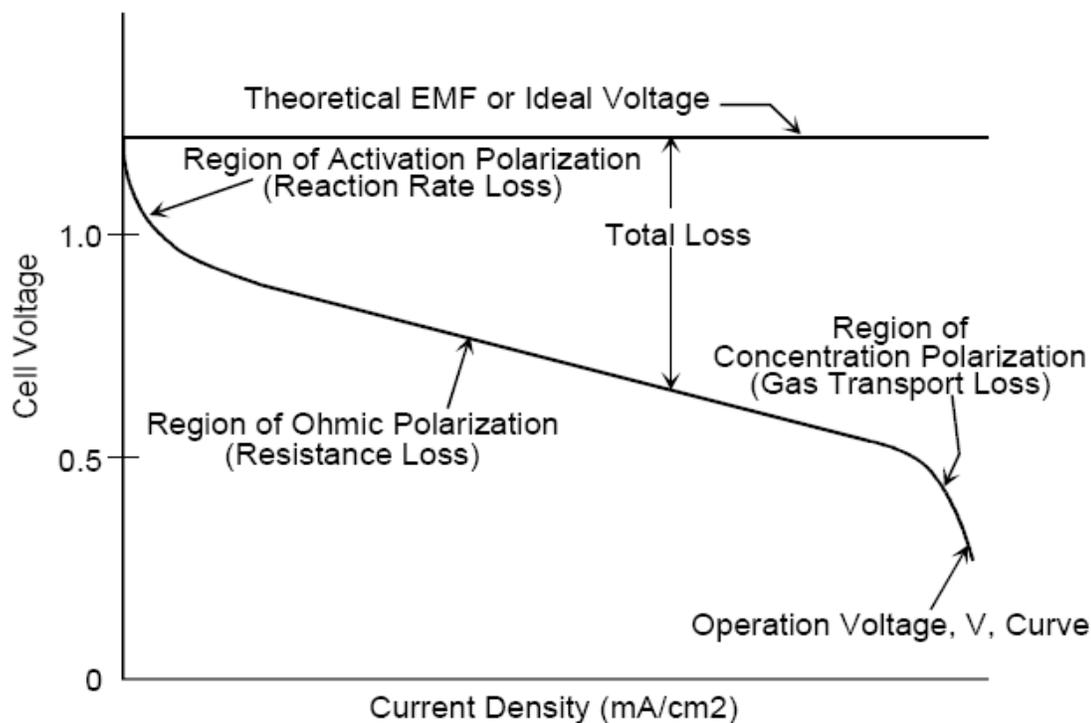


Figura 7. Curva de corriente vs voltaje característica de una celda de combustible

La región de pérdida de activación de polarización es dominante a bajas densidades de corriente. En este punto, se deben superar barreras electrónicas antes del flujo de corriente y iones. La polarización óhmica varía directamente con la corriente, incrementando cada vez más en todo, el rango de corriente, debido a que la resistencia de la celda permanece constante. Las pérdidas de transporte de gas ocurren en todo el rango de la densidad de corriente, pero estas pérdidas se hacen evidentes en altos niveles de corriente, donde llega a ser difícil proporcionar suficiente flujo de reactivo a la celda.

Polarización Activa. La activación de polarización se presenta cuando la tasa de una reacción electroquímica en la superficie de un electrodo, es controlada por una cinética lenta. En otras palabras, la activación de polarización está directamente relacionada con la tasa de las reacciones electroquímicas. Hay una cercana similitud entre las reacciones químicas y electroquímicas, en ambas existe una barrera de activación que debe ser superada. En el caso de una reacción electroquímica con $\eta_{ac} \geq 50-100$ mV, η_{ac} está descrita por la ecuación general de Tafel.

$$\eta_{ac} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (1)$$

Donde α es el coeficiente de transferencia de electrones en el electrodo analizado, i_0 es la densidad de la corriente, R la constante de los gases, T la temperatura absoluta, i flujo de corriente de la celda, F la constante de Faraday y n el número de electrones que participan en la reacción.

Polarización óhmica. Las pérdidas óhmicas ocurren debido a la resistencia del flujo de iones en el electrolítico y la resistencia al flujo de electrones a través del material del electrodo. Las pérdidas óhmicas dominantes, a través del electrolito, pueden disminuirse reduciendo la separación de los electrodos y mejorando la conductividad iónica del electrolito. Debido a que, tanto el electrolito como la celda de combustible, están regidos por la ley de Ohm, las pérdidas óhmicas se expresan con la siguiente ecuación:

$$\eta_{ohm} = iR \quad (2)$$

Donde i es el flujo de corriente de la celda y R es la resistencia total de la celda, la cual incluye las resistencias de contacto, iónicas y electrónicas.

Polarización concentrada. Cuando un reactivo se consume en el electrodo por la reacción electroquímica, hay una pérdida de potencial debido a la incapacidad que tiene el material superficial del electrodo, de mantener la concentración inicial del fluido en bulto. Esto es, se forma un gradiente de concentración. Varios procesos contribuyen a la polarización concentrada: la difusión del gas en los poros del material, la disolución/solución de reactivos/producto entrante/saliente del electrolito o la difusión de reactivos/productos a través del electrolito desde/hasta el lugar de la reacción electroquímica. A una densidad de corriente práctica, un lento transporte de reactor/producto desde/hasta la zona de reacción electroquímica, es la mayor contribución para la polarización concentrada:

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left[1 - \frac{i}{i_L} \right] \quad (3)$$

Donde i_L es el límite de la corriente.

1.7. Funciones críticas de una celda de combustible

El punto crítico más importante de una celda de combustible, son las tres fases de interface. En su mayor parte zonas microscópicas, en donde las reacciones electroquímicas ocurren y en donde sea que el electrodo se junte con el electrolito. Para que un área sea activa, ésta tiene que estar en contacto con el reactante, en contacto eléctrico con el electrolito, en contacto iónico con el electrolito y en contacto superficial con el electrocatalizador, para que la reacción se encuentre en el rango deseado. La densidad de la región y la naturaleza de estas interfaces, juegan un papel crítico tanto en la caracterización de las celdas de combustible de catalizador sólido, como líquido.

- En las celdas de combustible de electrolito líquido, los gases que reaccionan se difunden a través de una delgada capa de electrolito, los cuales bañan partes del electrodo poroso y reaccionan electroquímicamente en la superficie del electrodo correspondiente. Si el electrodo poroso contiene una gran cantidad de electrolito, éste se define como “inundado”, lo cual restringe el paso del gas a la fase del electrolito, hacia el lado de la reacción. La consecuencia, es una disminución considerable de la eficiencia electro-química del electrodo poroso. Por eso, se debe mantener un balance entre electrodo, electrolito y fase del gas, en la estructura del electrodo poroso.
- En las celdas de combustible de electrolito sólido, el reto es diseñar un gran número de catalizadores en las aéreas de interfaces, las cuales son: la eléctrica y la iónica; las cuales se conectan al electrodo y electrolito y eso afecta la eficiencia en los gases reactivos. Las celdas de combustible de electrolito sólido más exitosas, son aquéllas donde la zona del electrodo, está cerca de la zona del catalizador, donde hay una conductividad mixta.

Durante los últimos 20 años, la eficiencia de algunas de las celdas de combustible ha mejorado considerablemente. Esto se debe a las mejoras que se han hecho a las tres fases, gracias a la disminución del espesor del electrolito, así como a las mejoras de los materiales del electrodo y electrolitos, los cuales ampliaron sus temperaturas de funcionamiento, por encima de la temperatura de operación de las celdas de combustible.

Para facilitar las reacciones electroquímicas, cada uno de los componentes de las celdas de combustible tienen funciones críticas. El electrolito no sólo transporta los reactivos hacia el electrodo, sino también lleva una carga iónica entre los electrodos y completa el circuito eléctrico en la celda de combustible. También funciona como una barrera física que impide que el combustible y el oxidante entren en contacto directo.

Las funciones de los electrodos porosos, además de ser una superficie donde las reacciones electroquímicas se llevan a cabo, son:

- La conducción de los electrones fuera o dentro de las interfaces una vez que éstas se hayan formado (por eso el electrodo debe ser de un material que tenga una buena conductividad eléctrica) y provee una colección de corriente y una conexión entre otras celdas o cargas.
- Proporcionar una distribución de los gases reactivos a través de toda la celda de combustible.
- Asegurar que el producto de las reacciones sean llevados de manera eficiente hacia la fase de gas.

Los electrodos están hechos de material poroso y eléctrico, sólo unos pocos y raros materiales proporcionan suficiente actividad en el electro-catalizador. Por esa razón, el catalizador es puesto en muy pequeñas cantidades en la interface donde sea necesario. A altas temperaturas, la actividad en el electro-catalizador del material del electrodo, es más que suficiente.

Una gran cantidad de geometrías para las celdas de combustible han sido propuestas. Las que han tenido más desarrollo son las planas (cuadradas o circulares) y las tubulares (simple o de doble salida y las cilíndricas).

Bibliografía

- [1] <http://www.sener.gob.mx>, último acceso, 08 de enero de 2010.
- [2] Jaén Caparrós María, noviembre de 2004, “Tecnologías del Hidrógeno y las Pilas de Combustible, ARIEMA energía y medio ambiente, SL.
- [3] Alcántara Barbosa, María del Consuelo. Química de Hoy. McGraw Hill.
- [4] <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/o.htm>, último acceso, 13 de enero de 2010.
- [5] http://www.claudio-otero.cl/fuel_cells/, último acceso, 13 de enero de 2010.
- [6] DOE, "Handbook Fuel Cell". EEUU. 5^a Ed., octubre de 2000.

CAPÍTULO II

2.1. Introducción

En este capítulo se darán a conocer los tipos de celdas de combustible de hidrógeno que existen, así como sus ventajas, características y aplicaciones.

2.2. Tipos de celdas de combustible

Existe una amplia variedad de celdas de combustible en diferentes estados de desarrollo. La clasificación más común es por el tipo de electrolito utilizado en la celda, entre las cuales están las siguientes: 1) Celda de Combustible de Electrolito Polimérico (Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC); 2) Celda de Combustible Alcalina (Alkaline Fuel Cell, AFC); 3) Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC); 4) Celda de Combustible de Carbonato Fundido (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) y 5) Celda de Combustible de Óxido Sólido (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC). En general, la elección del tipo de electrolito a utilizar está en función de la temperatura de operación de la celda de combustible. La temperatura de operación y el tiempo de vida de una celda de combustible son parámetros fundamentales para elegir las propiedades fisicoquímicas y termo-mecánicas de los materiales utilizados en su construcción (por ejemplo, electrodos, electrolito, colector de corriente, entre otros). Los electrolitos acuosos están limitados a un rango de temperatura cercano a los 200°C o menos, debido a su alta presión de vapor y su rápida degradación a temperaturas elevadas. La temperatura de operación, también juega un papel importante para determinar el grado de procesamiento del combustible requerido. En las celdas de combustible de baja temperatura, todo el combustible se debe convertir a hidrógeno antes de entrar a la celda. Además, el ánodo catalizador en las celdas de baja temperatura (platino principalmente) está fuertemente cargado de CO. En las celdas de combustible de alta temperatura, el CO y aún el CH₄ se pueden convertir internamente en hidrógeno o, incluso, directamente, oxidándolos electroquímicamente. La Tabla 1 mostrada en el capítulo 1, presenta una descripción de los parámetros clave de los principales tipos de celdas de combustible.

Paralelamente con la clasificación por el tipo de electrodo, algunos combustibles se clasifican por el tipo de combustible utilizado:

- *Celdas de Combustible de Alcohol Directo* (Direct Alcohol Fuel Cell, DAFC). Las DAFC (o llamadas más comúnmente como celdas de combustible de metanol directo o Direct Metanol Fuel Cell, DMFC), usan alcohol sin modificar. Éste se refiere principalmente a las celdas del tipo PEFC, en las cuales, el metanol u otro alcohol, se usan de forma directa, generalmente, para aplicaciones portables.
- *Celdas de Combustible de Carbono Directo* (Direct Carbon Fuel Cell, DCFC). En las Celdas de Combustible de Carbono Directo, se usa directamente el carbón sólido (posiblemente un derivado del carbón, coque de petróleo o biomasa) en el ánodo, sin un paso intermedio de gasificación. Existen prototipos de celdas con óxido sólido, carbonato fundido y electrolitos alcalinos, pero se encuentran en fase de desarrollo. Por tanto, si se pudiera desarrollar tecnología en sistemas prácticos, se podría tener un impacto significativo en la generación de potencia basada en carbón.

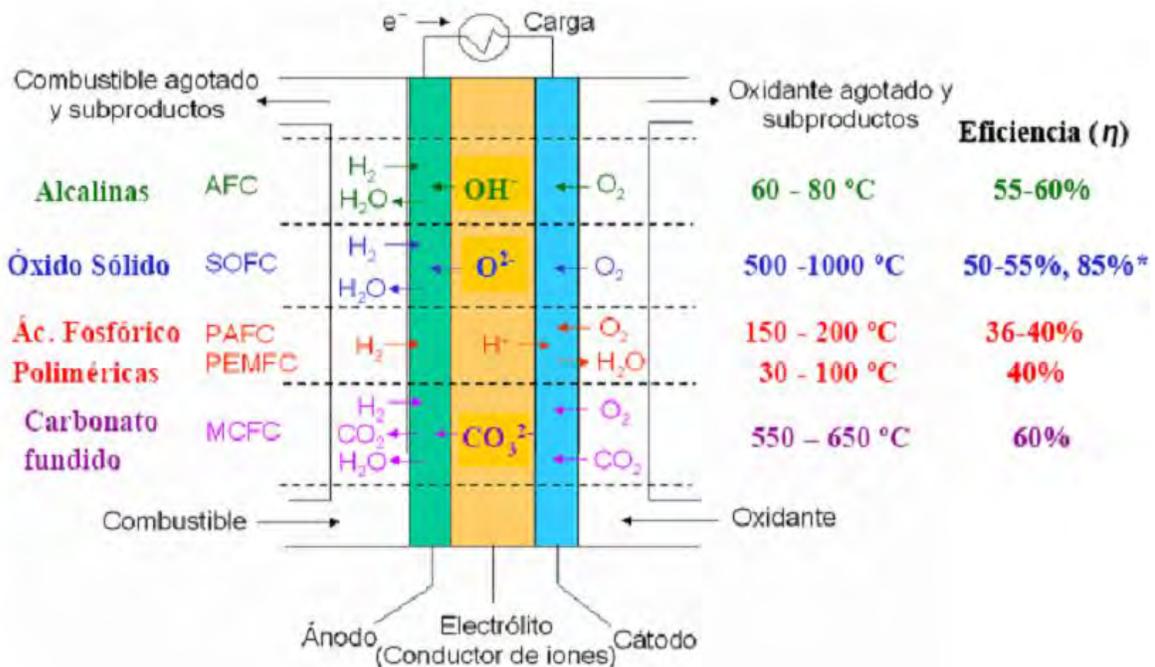


Figura 8. Esquema general de las celdas de combustible

2.2.1. Celdas de Combustible de Polímero Electrolítico (Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC) o Celdas de Combustible de Membrana Protónica (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC).

2.2.1.1. Antecedentes de la PEFC o PEMFC

Las celdas tipo PEMFC fueron desarrolladas en General Electric, por Grubb y Niedrach, en 1960, para suministrar energía eléctrica a la aeronave Géminis en su misión orbital alrededor de la Tierra. Una nueva formulación de polímero desarrollada por Grot, en 1972, mejoró las características y la durabilidad del electrolito y, más tarde, en 1986, Raistrick realizó grandes mejoras en los procesos de fabricación. En 1990, Prater anunció la posibilidad de utilizar este tipo de celdas de combustible para vehículos terrestres. El gran reto era reducir el efecto nocivo del CO, un subproducto de la obtención de hidrógeno pero reformado, ya que envenenaba fuertemente los catalizadores de platino. Una nueva técnica llamada “air bleed”, descubierta por Gottesfeld y Pafford, en 1988, fue desarrollada y permitió que este tipo de celdas de combustible operasen con hidrógeno, obtenido a partir de alcoholes o combustibles carbonados.

2.2.1.2. Características

Estas celdas usan un polímero conductor de protones como electrolito, el material de una membrana típica de nafión. Entre el ánodo y el cátodo está dicha membrana. [1]

El electrolito en estas celdas, es una membrana de intercambio de iones (polímero de ácido sulfónico fluorinado) que es un excelente conductor de protones. El líquido que maneja esta celda es agua; por tanto, los problemas de corrosión son mínimos. Típicamente, los electrodos de carbono con electro-catalizador de platino, se usan tanto en el ánodo como en el cátodo con cualquier interconexión, de carbono o metal.

Esta membrana es un aislante electrónico, pero un excelente conductor de iones de hidrógeno. Al ser la membrana sólida, no hay problemas de pérdida de electrolito, que pueda afectar la vida de la celda de combustible.

La membrana que se utiliza parece una hoja de gelatina y puede ser manejada fácilmente y sin peligro alguno. El ánodo y el cátodo se preparan aplicando una muy pequeña cantidad de platino (el cual funciona como catalizador), que tiene la ventaja de ser

resistente a la corrosión; sin embargo, 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. Se aplica en una de las caras de una superficie porosa de grafito, que ha sido antes impermeabilizada con teflón. El electrolito se sitúa entre los dos electrodos y los tres componentes se sellan a presión para producir una MEA (Membrane Electrode Assembly). Este conjunto, es el corazón de la celda de combustible y mide menos de un milímetro de ancho. [2]

La administración de agua en la membrana, es de vital importancia para un funcionamiento eficiente; la celda debe operar bajo condiciones donde el agua que se utiliza (en el proceso) no se debe evaporar más rápido de la que se suministra, ya que la membrana debe mantenerse hidratada.

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 (un veneno a bajas temperaturas). 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 al hidrógeno, el monóxido de carbono proveniente de la vaporización del combustible fósil, debe ser reducido. [1]

Debido a la limitación en la temperatura de operación del polímero, (usualmente entre 60 y 80°C) y también por el problema con el balance de agua, se utiliza un gas rico en H₂, con un contenido mínimo (o sin nada) de CO. Se requieren altas cargas de catalizador (Pt en muchos casos), tanto en el ánodo como en el cátodo, igual que en las celdas de ácido fosfórico (PAFC). Con otros combustibles, es necesario un procesamiento muy extensivo, ya que el ánodo se envenena fácilmente con trazas de CO, sulfuros y halógenos. [2]

Las PEFCs están siendo utilizadas en una amplia variedad de aplicaciones, especialmente como combustible principal en vehículos con celdas de combustible (FCVs). Como consecuencia del gran interés en los FCVs y en el hidrógeno, las inversiones en la tecnología PEFC, en la década pasada, supera fácilmente a todas las otras tecnologías. Aunque se han tenido desarrollos significativos de las PEFC para aplicaciones fijas,

muchos investigadores se han enfocado a las aplicaciones automotrices y portátiles (teléfonos celulares y computadoras portátiles, entre muchos otros).

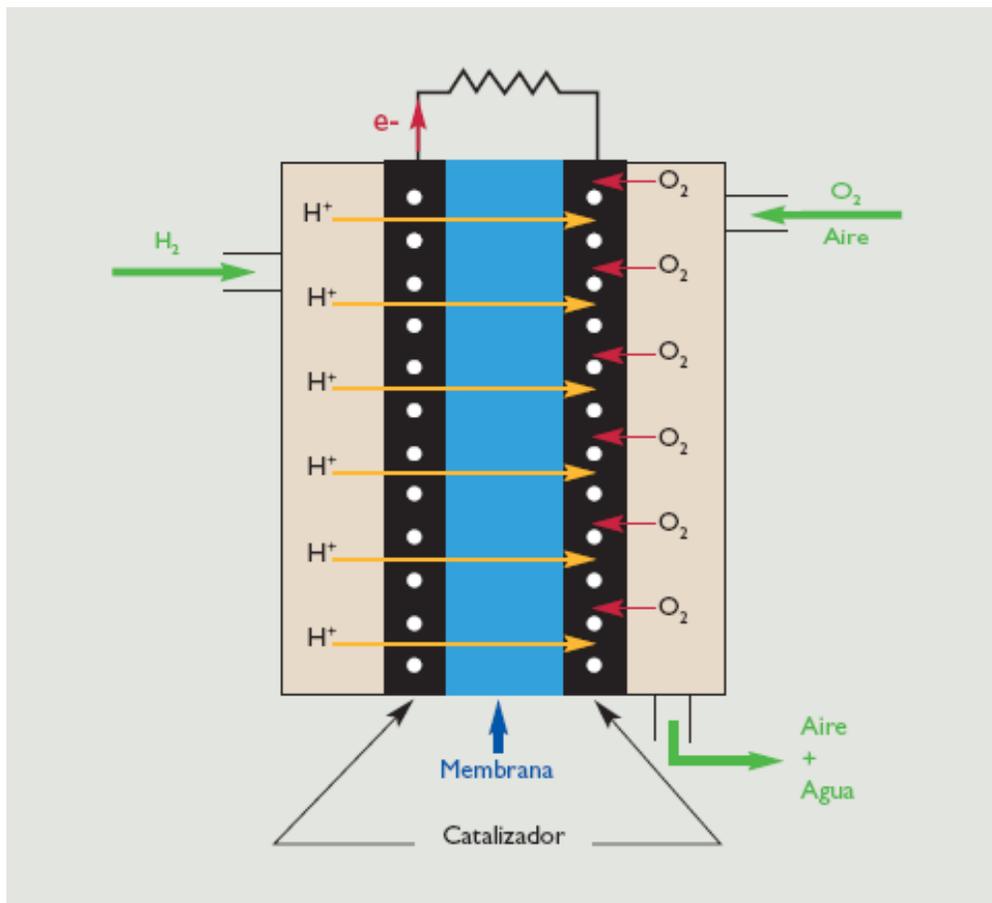


Figura 9. Esquema de una celda de combustible tipo PEFC o PEMFC

Ventajas. Las PEFCs tienen un electrolito sólido, el cual proporciona una excelente resistencia al cruzamiento de gases. Operan a bajas temperaturas, permitiendo una puesta en marcha rápida, ausencia de elementos corrosivos en la celda y no utiliza materiales costosos, como en otras celdas. Las pruebas experimentales han demostrado que las PEFCs son capaces de producir densidades de corriente arriba de 2 kW/l y 2 W/cm^2 . Se sugiere utilizar las PEFCs en situaciones en donde se utilice hidrógeno puro como combustible.

Desventajas. El bajo y estrecho rango de temperatura de operación hace difícil la gestión térmica, especialmente a altas densidades de corriente y hace difícil, también, utilizar el

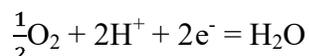
calor disipado para cogeneración o en sistemas inferiores¹ o de cola. La administración del agua, es otro gran desafío en el diseño de las PEFCs, debiéndose garantizar el equilibrio entre hidratación e inundación del electrolito. Además, las PEFCs son muy sensibles a la contaminación por trazas de CO, sulfuros y amonio. En cierta medida, algunas de estas desventajas pueden ser contrarrestadas por la reducción en la densidad de corriente y en el aumento de la carga en el electrodo catalizador, pero, en ambos casos, se incrementa el costo del sistema

Fórmulas

En el ánodo



En el cátodo



2.2.2. Celdas de Combustible Alcalinas (Alkaline Fuel Cell, AFC)

2.2.2.1. Antecedentes de las AFC

En 1946, Davtayan desarrolló una celda de combustible de baja temperatura, con un electrolito alcalino que operaba a presión atmosférica. El electrolito era una solución acuosa de hidróxido de potasio (concentración 35%) y el catalizador principal era plata. Los electrodos se forraron con una parafina para impermeabilizarlos y se alcanzaron densidades cercanas a los 25 A/cm².

Años más tarde, Bacon, (1954, 1969 y 1979), utilizó un electrolito de KOH con electrodos no metálicos y lo alimentó con hidrógeno y oxígeno puros, para construir la primera Celda de Combustible Alcalina en operación. Tras varios trabajos de mejora de las prestaciones de esta celda, en 1954, consiguió alcanzar eficiencias cercanas a los 1076 A/cm², con una tensión de 0.6V y a una temperatura de 240 °C. Finalmente, Bacon, entre los años 1962 y 1979, comenzó a trabajar en un programa para la NASA y su sistema auxiliar de energía, se embarcó en la nave Apolo, en 1965.

¹ En los sistemas inferiores, la energía primaria se utiliza en el proceso industrial y la energía calorífica no aprovechada en el mismo, se utiliza para generar energía mecánica.

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 opera 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 H₂ puro y el cátodo con O₂ 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 CO₂ 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 H₂ y O₂ 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.

2.2.2.2. Características

El electrolito en estas celdas de combustible es hidróxido de potasio (KOH) concentrado (85% w/w) para operarse a altas temperaturas (~250°C) o KOH menos concentrado (35 a 50 % w/w) para bajas temperaturas de operación (<120°C). El electrolito es, generalmente, retenido en la matriz, (generalmente amianto²). Una gran variedad de electro-catalizadores pueden ser utilizados (ej. Ag, Ni y metales nobles). El combustible está limitado a los componentes no reactivos, excepto para el hidrógeno. El envenenamiento por CO y CO₂ pueden reaccionar con el KOH, para formar carbonato de potasio (K₂CO₃), lo cual altera al electrolito. Incluso, una cantidad mínima de CO₂ en el aire, puede considerarse un potencial envenenamiento para la celda alcalina. Por esa razón, el hidrógeno es considerado como el combustible de preferencia para las AFC. [2]

² Mineral que se presenta en fibras blancas y flexibles, de aspecto sedoso. Es un silicato de cal, alúmina y hierro y, por sus condiciones, tiene aplicación para hacer con él, tejidos incombustibles. [3]

Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito y hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales, pero varias compañías están encontrando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación. No requieren materiales nobles como catalizadores, ya que la dificultad de reducción de oxígeno, presente en otras celdas de baja temperatura, es mínima, por lo que pueden operar a temperaturas bajas. Un factor adverso de estas celdas es el efecto nocivo que el CO_2 produce al reaccionar con el hidróxido presente, lo que genera la necesidad de un combustible altamente puro, ya sea como hidrógeno puro o bien mediante sistemas caros de limpieza de combustible reformado, capaz de reducir al máximo la concentración del gas carbónico en el flujo del combustible.

En los últimos años, se han alcanzado importantes progresos en el diseño y desarrollo de este tipo de celdas. Así, se han construido módulos compactos con electrolitos circulantes y una potencia del orden de varios kW. En uno de estos sistemas, el electrolito es hidróxido de potasio al 30% y la reacción transcurre con formación de agua y liberación de calor, con la consiguiente dilución del electrolito y elevación de la temperatura.

El dispositivo tiene una resistencia interna característica que depende del diseño, pero que es algo mayor que la de sistemas que operan con matrices. Para dar una idea de estas celdas, podemos describir una unidad compacta de 7 kW, que consta de 70 celdas en serie, con un peso de 85 Kg, involucrando en ello, el conjunto total de elementos: el generador de electrolito, la unidad de control electromecánico, el sistema de abastecimiento y el dispositivo de control electrónico. [1]

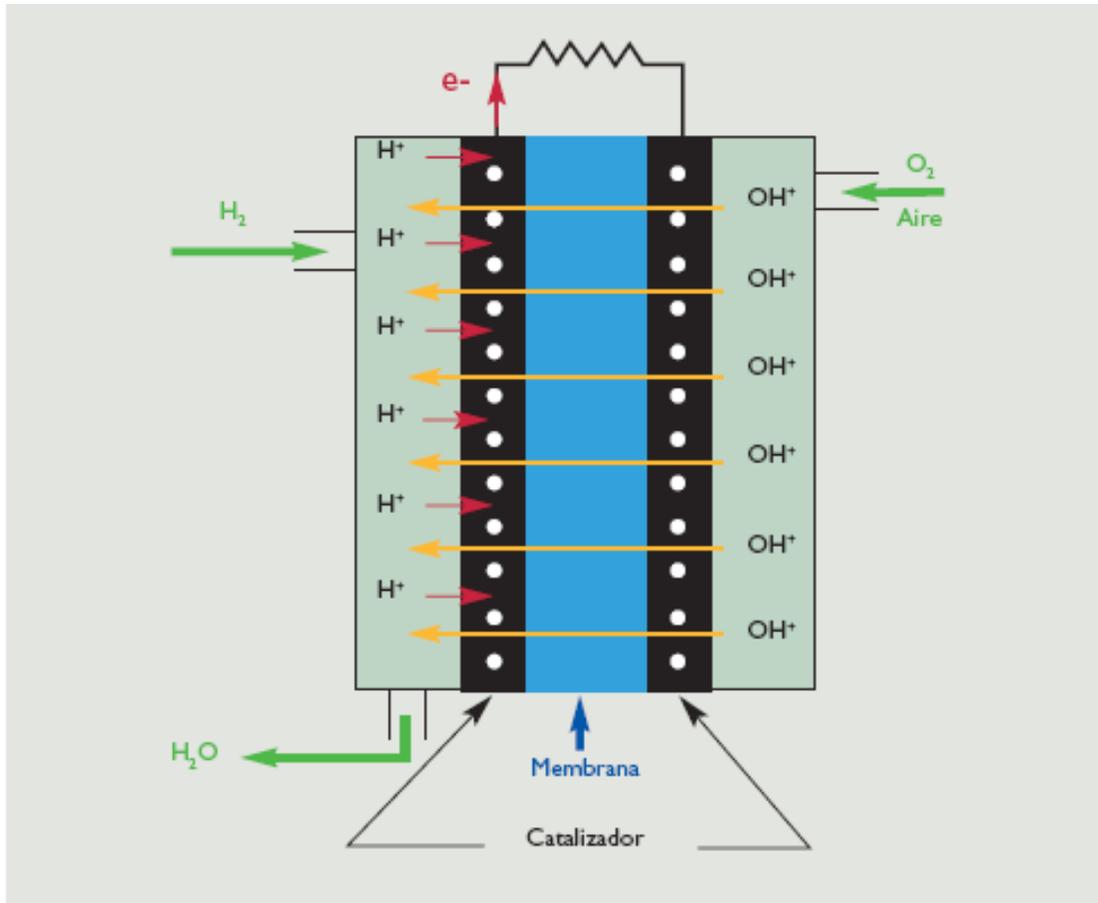


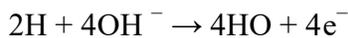
Figura 10. Esquema de una celda de combustible tipo AFC

Ventajas. Excelente eficiencia en el uso del hidrógeno y el oxígeno, comparadas con otras celdas de combustible. Su electrodo O₂ de cinética activa y su gran flexibilidad para usar una gran variedad de electro-catalizadores.

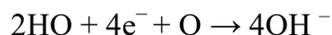
Desventajas. La sensibilidad del electrolito al CO, por lo que el H₂, que funciona como combustible, necesita un alto nivel de pureza. En consecuencia, se necesita un sistema de reformación para que el CO y el CO₂ sean removidos del sistema. Otro, es que si el aire del ambiente es usado como oxidante, el mismo debe ser retirado del sistema. Así, que el costo y tamaño del sistema, es afectado.

Fórmulas

En el ánodo



En el cátodo



2.2.3. Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)

2.2.3.1 Antecedentes de las PAFC

La primera Monocelda de W. Grove, en 1939, incorporaba ácido sulfúrico como electrolito, pero la corrosión que producía limitó su desarrollo y fue por eso que comenzó a estudiarse la posibilidad de electrolitos sólidos o emplear disoluciones alcalinas, menos corrosivas. En 1961, G.V. Elmore y H.A. Tanner dan los primeros resultados alentadores para esta tecnología. Durante los años 60, la Armada de los Estados Unidos se muestra muy interesada en el desarrollo de esta tecnología. En este proyecto, las celdas fueron construidas por Allis- Chalmers (que también trabajó en AFC), Engelhard Industries (se encargaba del reformador) y Varo, Inc. (desarrolló el inversor de corriente).

El desarrollo de las Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico tuvo lugar durante el programa “TARGET” (Pratt y Whitney, 1967-1975), alcanzando sus objetivos en 1975, al demostrar un sistema de generación de energía para el sector residencial, alimentado por gas natural. Unos años más tarde, en el proyecto “Moonlight” (1981-1992), compañías japonesas desarrollaron sistemas con una eficiencia mucho mayor que la alcanzada años atrás.

En 1984, Appleby hizo que este tipo de celda de combustible fuese viable económicamente, cuando descubrió que el carbón era estable en las condiciones de trabajo del sistema. Por lo que utilizó este componente para desarrollar los colectores, los electrodos y los soportes de los catalizadores.

2.2.3.2 Características de las PAFC

La Celda de Combustible de Ácido Fosfórico, utiliza ácido fosfórico como electrolito. Éste está contenido en una matriz de carburo de silicón envuelto con teflón, (carbide silicone bonded with Teflon). La estructura porosa de esta matriz, evita las fugas

de electrolito por efecto capilar, mientras que electrones de carbón poroso contienen el catalizador de platino.

A bajas temperaturas, el ácido fosfórico es muy mal conductor iónico, por eso esta celda tiene un rango de temperatura de entre 150 y 200°C, además que el envenenamiento por CO a temperaturas en el catalizador de platino, es muy grave.

Es la de mayor desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria.

Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 150-200 °C. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes, tales como autobuses y locomotoras, pero, por lo general, son estacionarias. Como toleran el CO₂, pueden funcionar con combustibles derivados del carbono como metanol y etanol. Estas celdas son las más desarrolladas y, comercialmente, más utilizadas en la actualidad. Sus rangos de capacidad 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. Esta reacción es distinta de la combustión convencional de hidrógeno y oxígeno.

El subproducto del proceso es agua, el cual se elimina con el oxidante en el cátodo (aire u oxígeno). El procedimiento de eliminación de este agua requiere que el sistema opere a temperaturas cercanas a los 190°C. A temperaturas menores, el agua se disolvería en el electrolito y no se podría eliminar. A temperaturas mayores, el ácido fosfórico se descompondría.

La formación de monóxido de carbono (CO) alrededor de los electrodos, pueden "envenenar" una celda de combustible. Una de las ventajas de las células PAFC es que a 200°C, toleran una concentración de CO de aproximadamente 1,5 por ciento. Otra ventaja es que el ácido fosfórico concentrado electrolito, puede funcionar por encima del punto de

ebullición del agua, una limitación de otros electrolitos que requieren de ácido para la conductividad del agua. El ácido requiere, sin embargo, que los otros componentes de la celda puedan resistir la corrosión. El hidrógeno para la celda de combustible, se extrae de un hidrocarburo combustible en un reformador externo. Si el combustible es la gasolina, el azufre debe ser eliminado o se dañará el electrodo catalizador.

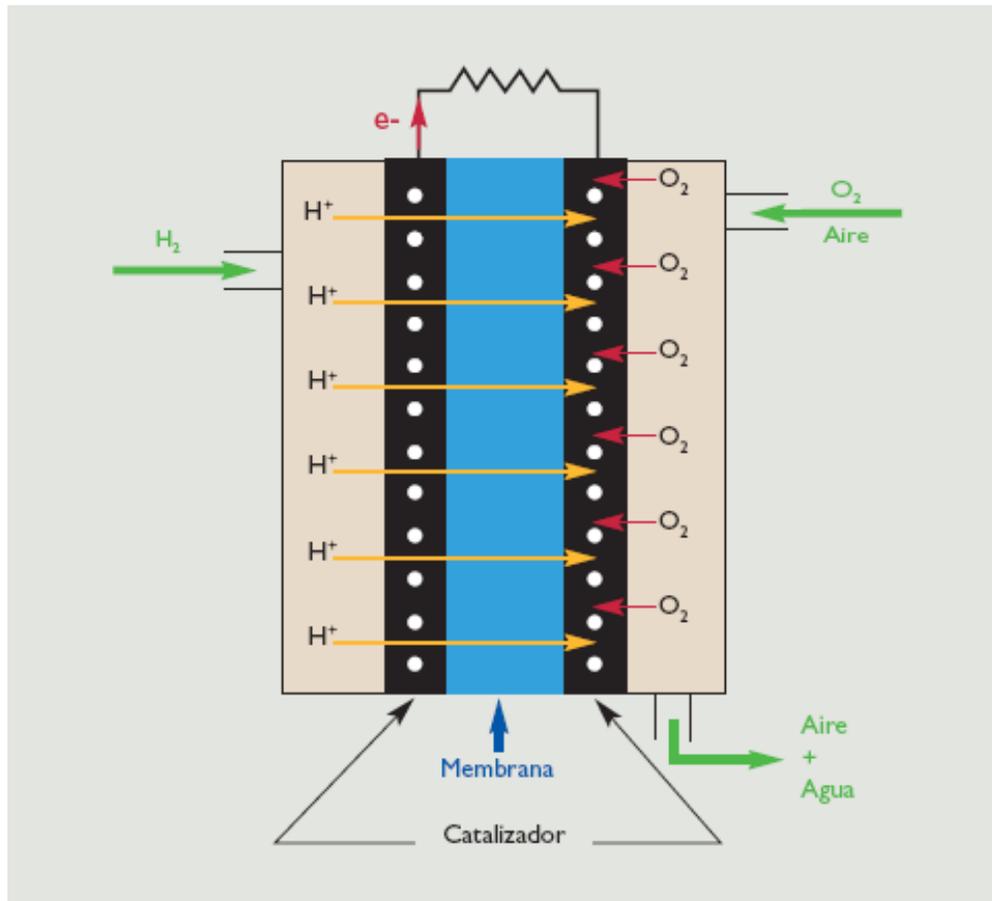


Figura 11. Esquema de una celda de combustible tipo PAFC.

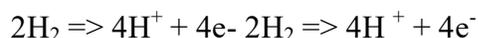
Ventajas. Tienen menos sensibilidad comparadas con las PEFC o las AFC, también su rango de temperatura sigue siendo bajo, para poder usar materiales convencionales en su construcción, así como en su BoP. Además, la temperatura de operación es de una gran flexibilidad de manejo térmico. Han demostrado eficiencia de un 37 hasta un 42%, lo cual es mayor que las PEFC.

Desventajas. En el lado del cátodo, la reducción del oxígeno es menor que en las AFC y necesitan como catalizador al platino, por lo cual las hace costosas. Las PAFC, aún

requieren un proceso de combustible extenso para que el mismo sea de alta pureza, para alcanzar una alta eficiencia en la celda. Y, finalmente, la naturaleza corrosiva del ácido fosfórico, requiere que los materiales de la celda sean costosos (especialmente en el grafito plato bipolar y monopolar).

Fórmulas

En el ánodo



En el cátodo



En general, la reacción de celda



2.2.4. Celdas de combustible de Carbonato Fundido (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)

2.2.4.1. Antecedentes

La utilización de los carbonatos alcalinos, como elementos básicos para el desarrollo de una celda de combustible que utilizase “carbón directo” fue probada por Baur and Preis (1937), en Suiza, pero poco a poco estos materiales fueron evolucionando hacia otro tipo de sales, por su compatibilidad con el combustible oxidado.

Algo más tarde, en 1946, el científico ruso Davtyan desarrolló una celda que operaba a 700° C, con un conductor sólido iónico como electrolito. Unos años más tarde, Broers y Katelaar (1969), realizando ensayos con el electrolito desarrollado años atrás por Davtyan, descubrieron que se constituía de dos fases diferentes, una de ellas fundida con carbonatos, fosfatos, tungstatos y silicatos y, otra fase, sólida con óxidos relativamente raros en la tierra. Fue en esa misma década cuando el “Institute of Gas technology” empezó su estudio en las Celdas de Combustible de Carbonatos Fundidos, demostrando su capacidad de generar energía eléctrica a alta temperatura.

2.2.4.2. Características de las MCFC

El electrolito en estas celdas, por lo general, es de carbonatos alcalinos, los cuales están contenidos en la matriz de LiAlO_2 . La celda trabaja en temperaturas consideradas entre los 600 y 700° C, donde los carbonatos alcalinos forman una sal fundida de alta conductividad, con iones de carbono que proveen una conducción iónica. Como las MCFC trabajan a altas temperaturas, el *Ni* del ánodo y el óxido de níquel en el cátodo, son adecuados para promover una reacción. No son necesarios los metales nobles tales como oro o platino y muchos hidrocarburos pueden ser reformados de manera interna.

El foco o punto clave de estas celdas, ha sido sus grandes aplicaciones a nivel estacionario y marino, donde el gran peso y tamaño de estas celdas, así como su encendido lento, no es problema. Las MCFC están siendo probadas en circunstancias donde se puedan usar con combustibles convencionales y renovables. Las MCFC como tecnología son consideradas como DCFC (direct carbone fuel cell). Después de las PAFC, las MCFC son consideradas como las mejores en aplicaciones sanitarias.

La reacción anódica ocurre entre el hidrógeno y los iones carbonato (CO_3^-) del electrolito, lo que da como productos CO_2 y agua, además de liberar electrones. La reacción catódica combina el oxígeno, el CO_2 y los electrones que han circulado por el circuito externo, produciendo otra vez iones de carbonato que se unen al electrolito. Existe, pues, una necesidad de CO_2 en el oxidante, por lo que hay que dotar a estas pilas, con un sistema de captación de CO_2 , para su funcionamiento.

Según la temperatura va aumentando, la tensión teórica de operación de la celda de combustible disminuye, al igual que su eficiencia. Por otro lado, al aumentar la temperatura, incrementa la velocidad de reacción electroquímica y, por lo tanto, la corriente entregada para una tensión fija. En comparación con otras tecnologías, una MCFC es capaz de operar a tensiones más altas que una PAFC para la misma densidad de corriente. Por todo ello, teóricamente, una MCFC debería ser para la misma potencia más pequeña y más barata que una PAFC con las mismas características.

Ésta 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 (Li_2CO_3) y potasio (K_2CO_3). Opera a aproximadamente 650°C .

En el cátodo, el oxígeno (O_2) y el dióxido de carbono (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 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.[1]

El electrolito es, normalmente, una mezcla binaria al 50% molar de Li_2CO_2 y K_2CO_3 , que es líquida a la temperatura de operación de la celda, embebida en una placa porosa inerte de partículas de LiAlO_2 . La placa porosa es muy rígida a la temperatura de operación, pero es capaz de adaptarse de forma inelástica a las otras partes de la celda.

El ánodo es una estructura porosa de níquel sinterizado, con un espesor de alrededor de 0,5 mm y una porosidad del 60% a 70%, con un tamaño medio de poro de unas 5 micras. El níquel suele estabilizarse mezclándolo con cromo o cobalto o usando aditivos.

El cátodo es una estructura similar de NiO , normalmente de 0,3 mm de espesor y 70% a 80% de porosidad, con un tamaño medio de poro de 10 micras.

La temperatura de operación se fija entre 600 y 650°C , en la cual se alcanza la conductividad iónica suficiente del electrolito. Para mantener esta temperatura, se necesita un gran volumen de aire que circula para evacuar el calor del cátodo. Esta temperatura sirve, también, para poder operar directamente con gases carbonatados como el gas natural, ya que posibilitan el reformado interno.

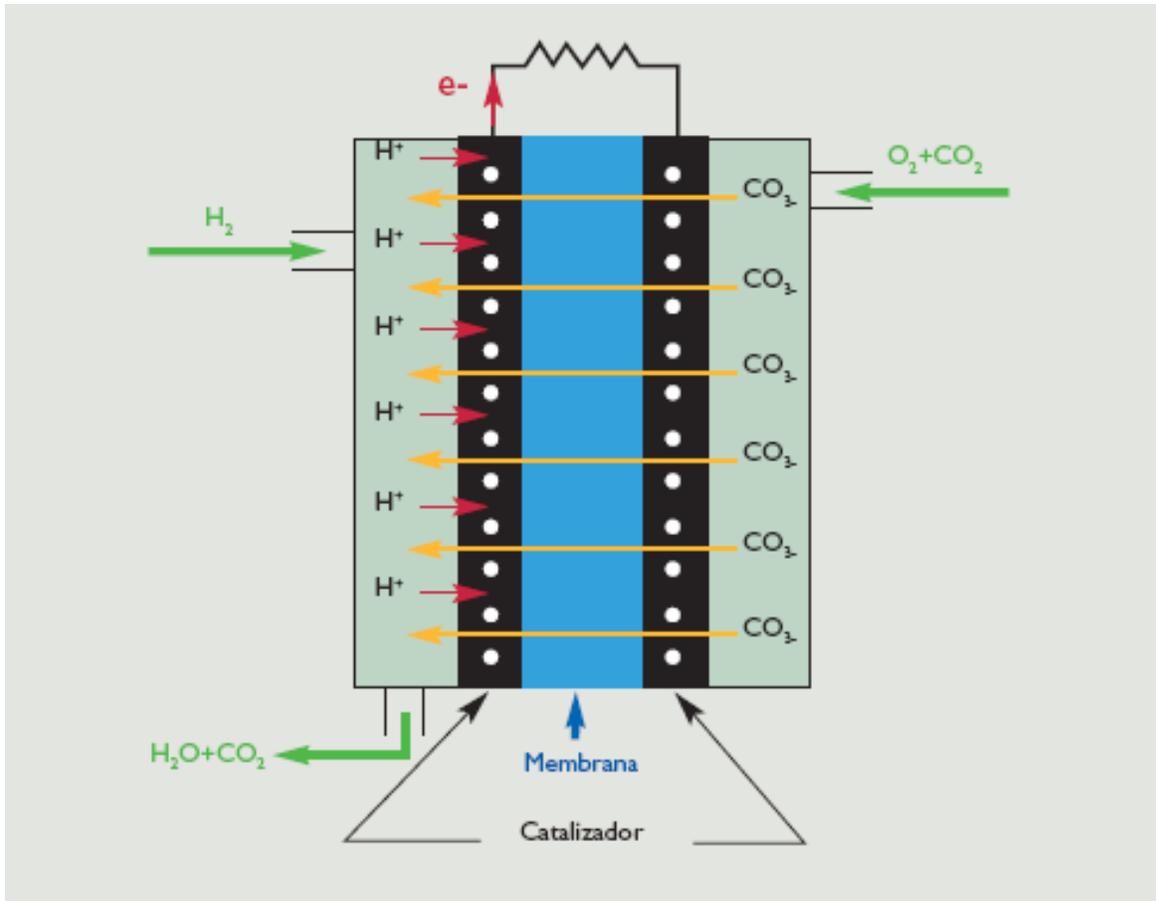


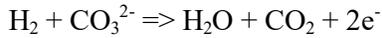
Figura 12. Esquema de una celda de combustible tipo MCFC

Ventajas. Las relativas altas temperaturas de operación de esta celda, tiene beneficios, ya que no es necesario un electro-catalizador costoso, porque el catalizador de níquel provee suficiente actividad, también porque el CO y los hidrocarburos pueden ser utilizados, gracias a unos platos especiales que los transforman en hidrógeno, para ser usado como combustible, simplificando los sistemas BoP.

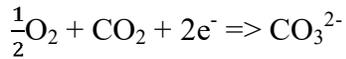
Desventajas. El reto para estas celdas es que el electrolito es altamente corrosivo y móvil, el cual requiere el uso de níquel y de acero inoxidable en la estructura de la celda (más barato que el grafito, pero más caro que el acero férreo). Las altas temperaturas de la celda repercuten en los materiales, afectando la estabilidad mecánica, así como la vida de la celda. También se necesita una fuente de CO₂ para el cátodo, lo cual significa implementar otro sistema BoP.

Fórmulas

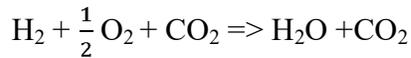
En el ánodo:



En el cátodo:



Fórmula general:



2.2.5. Celdas de Combustible de Óxido Sólido (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

2.2.5.1. Antecedentes

Las celdas de carbonato fundido y las de óxido sólido, comparten su desarrollo histórico hasta finales de los años 60s. Por esa fecha, se descubre que la conductividad de determinadas sales fundidas, es mucho mayor que la de los óxidos sólidos. Muchos de los principales laboratorios abandonan esta vía, a favor de los carbonatos fundidos. No obstante, Westinghouse apuesta por la tecnología SOFC y, en 1962, saca un modelo usando un electrolito de óxidos de zirconio y calcio.

2.2.5.2. Características

El electrolito usado en estas celdas, debe ser un óxido metálico, no poroso, que sea un buen conductor iónico, normalmente óxido de zirconio estabilizado con óxido de ytrio. Estas celdas operan entre los 600 y 1000° C, temperatura donde tiene lugar la conducción iónica de iones de oxígeno. Normalmente, el ánodo es una mezcla de cerámico y metal, Ni-Zr O₂ y el cátodo, una manganita de lantano dopada con estroncio o selenio [1]

Para alcanzar el límite de conductividad de los electrolitos sólidos, la celda debe operar a una temperatura de 1000° C, pero estudios recientes han desarrollado un electrolito

delgado, que ha logrado reducir las temperaturas de operación, entre 650 – 850° C, aunque algunos dispositivos pudieran reducir aún más las temperaturas de operación.

En la última década, se han podido desarrollar sistemas compactos y de alta eficiencia, los cuales usan materiales relativamente económicos.

Los sistemas SOFC ahora son considerados para su uso en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo entre ellas, sistemas de generación estacionarias, sistemas móviles, sistemas de poder auxiliar en vehículos y aplicaciones especiales. [2]

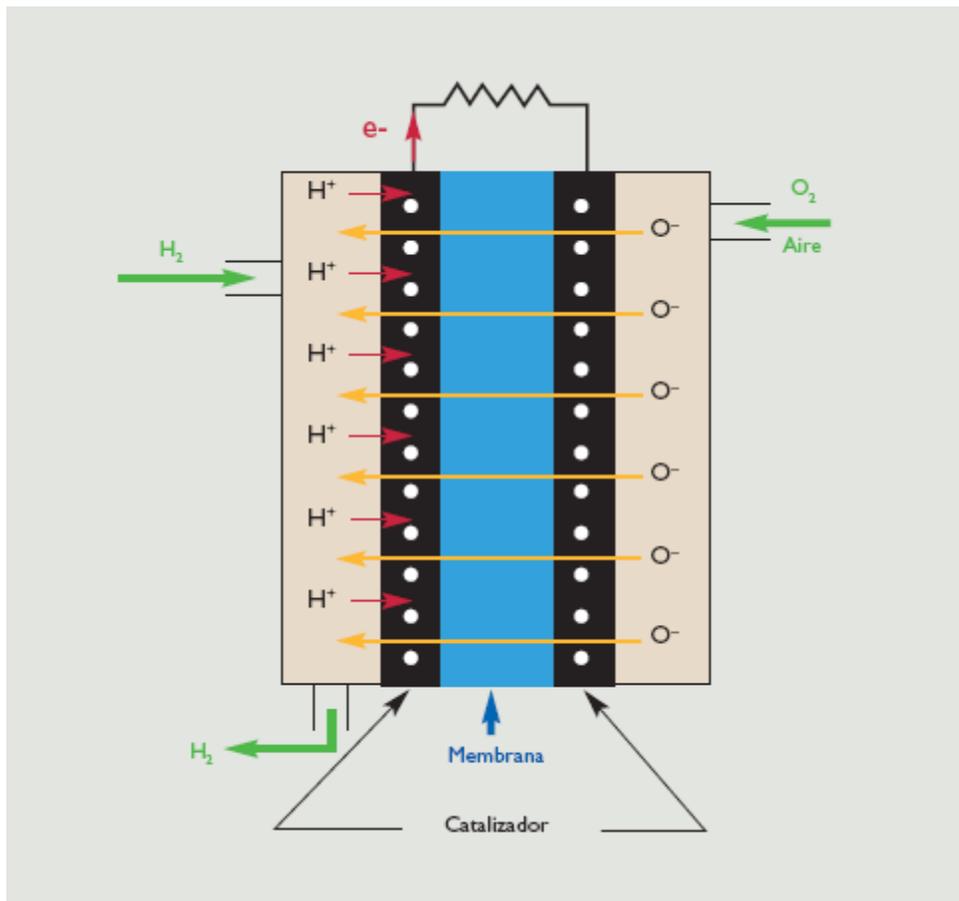


Figura 13. Esquema de una celda de combustible tipo SOFC

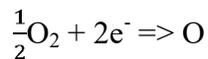
Ventajas. Las celdas de combustible tipo SOFC, son las que han tenido más tiempo para desarrollarse, desde los años 50s, varios años antes que las AFC. Gracias a su electrolito sólido, estas celdas pueden diseñarse de varias maneras, tales como tubular, plana y de tipo monolítico. La construcción de cerámica sólida, elimina cualquier problema de corrosión

de la celda. El electrolito sólido también permite una ingeniería precisa de las tres fases. La cinética de la celda es relativamente rápida y el CO es usado directamente como combustible al igual que las celdas de tipo MCFC. Los materiales utilizados en las SOFT, no son tan costosos. Las unidades planas SOFT de electrolito delgado, han demostrado densidades de poder similares a las PEFC. Así como las MCFC, las altas temperaturas de operación de las SOFT, se usan para cogeneración, en ambos ciclos. Los rangos de eficiencia están entre el 40 y 50% y también se ha demostrado hasta un 60% , como las MCFC.

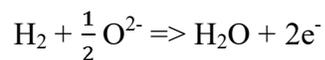
Desventajas. Las altas temperaturas de las SOFT, tiene sus desventajas, ejemplo de ello es la expansión térmica de los materiales y el sellado entre los platos es difícil. Las altas temperaturas de operación resultan de una selección especial de los materiales, así como una dificultad en su fabricación. La corrosión en los componentes metálicos representa un reto de diseño. Estos factores son los que determinan tanto su densidad de energía, como la vida útil de la celda. [2]

Fórmulas

En el ánodo



En el cátodo



2.3. Aplicaciones y estado actual

Las características, ventajas y desventajas descritas en los apartados anteriores son la base para seleccionar la celda de combustible que responda a una variedad de necesidades de aplicación. La mayoría de las aplicaciones de las celdas de combustible son para plantas estacionarias de potencia eléctrica, incluyendo unidades de cogeneración, fuerza motriz en vehículos y como propulsores eléctricos en vehículos espaciales o en ambientes cerrados.

2.3.1. Potencia eléctrica estacionaria

Una de las características de los sistemas de celdas de combustible, es que el tamaño casi no afecta a la eficiencia de las mismas. Esto significa que se pueden desarrollar sistemas pequeños y de alta eficiencia. Como inicio, las plantas estacionarias de celdas de combustible han sido desarrolladas para producir cientos de kW y pocos KW. Celdas pequeñas pueden desarrollar cientos de kW hasta 1 o 2 MW, diseñadas para que el usuario pueda utilizar, estos sistemas producen energía eléctrica y calorífica. Las plantas, por lo general, son alimentadas con gas natural. Las celdas de combustible son consideradas como sistemas de carga de base, debido a su alta eficiencia. Las plantas de carga de base pueden ser alimentadas con gas natural o carbón. El producto de gasificar el carbón, es compatible para el uso en las celdas de combustible.

Los sistemas portátiles o independientes siguen probándose como los sistemas de celdas de combustible tipo PEFC, PAFC, AFC, SOFC y MCFC. Una de las primeras plantas de energía que apareció en el mercado es la PC-25, que es una planta de celdas de combustible tipo AFC, que alcanza los 200 MW.

La PC-25 fue desarrollada por la UTC, (United Tecnolgies Corporation). Esta celda pretende ser una solución económica y benéfica para las empresas a nivel comercial e industrial. Por las ventajas que presenta la PC-25, está siendo instalada en hospitales, hoteles, edificios grandes de oficinas, sitios de manufactura, plantas de tratamiento de aguas residuales e instituciones donde requieran las siguientes condiciones:

- Conocer las demanda de energía requerida.
- Sistemas de respaldo de energía continuo.
- Suministro de energía continuo.
- Energía de alta calidad.
- Fuente de energía independiente.



Figura 14. Sistema de energía PC-25

Las características de la planta son las siguientes.

Tabla 6. Características de la planta PC-25

Capacidad de energía	De 0 a 200 MW, cuando se usa con gas natural.
Voltaje y fases	480/277 volts a 60 Hz, 400/230 volts a 50 Hz.
Energía térmica	740,000 Kj/hora a 60° C
Conexión eléctrica	Conexión de rejilla para el servicio de energía demandada y rejilla independiente, para servicio premium.
Factor de poder	Se ajusta entre el .85 y 1.0
Oscilación de sobrecarga	Ninguna
Desbalance de rejilla de voltaje	1 %
Rango de frecuencia de rejilla	+/- 3 %
Limite armónico de voltaje	<3 %
Dimensiones de la planta	3m de ancho 3m de alto y 5.5m de largo, no incluye el pequeño ventilador de enfriador.
Peso de la planta	17,230 Kg.

2.3.2 Generación distribuida

La generación distribuida abarca sistemas modulares pequeños, que son instalados cerca del lugar donde se usarán. Los sistemas típicos, por lo general, generan menos de 30 MW y se usan para producir y almacenar energía. Estas tecnologías de generación distribuidas, se usan en turbinas de gas, máquinas recíprocas, generadores a base de biomasa, sistemas fotovoltaicos, celdas de combustible, turbinas de viento, micro-turbinas, dispositivos de almacenamiento de rotor (flywhele).

Tabla 7. Generación distribuida

Tipo	Tamaño	Eficiencia
Máquinas recíprocas	50 kW – 6 MW	33 – 37
Micro-turbinas	10 kW – 300 kW	20 – 30
Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico	50 kW – 1 MW	40
Celdas de Combustible de Membrana Protónica	<1 kW – 1 MW	34 – 36
Celdas de Combustible de Óxido Sólido	5 kW – 3 MW	45 – 65
Sistemas fotovoltaicos.	1 kW – 1 MW	NA
Turbinas de viento	150 kW – 500 kW	NA
Sistemas híbridos	<1 kW – 1 MW	40 – 50

Hay muchas aplicaciones para los sistemas de generación distribuida:

- Los costos de picos de potencia.
- Sistemas combinados de calor y energía.
- Red de apoyo para la colocación estratégica.
- Sistemas de reserva de poder.
- Sistemas independientes y remotos.

2.3.4. Fuerza motriz en vehículos

Desde los años 80s, se han hecho grandes avances aplicando celdas de combustible en el ramo automotriz, especialmente, en vehículos pesados. El mayor desarrollo de estas

tecnologías es debido a que se necesitan transportes eficientes, limpios, que trabajen con combustibles convencionales, así como con energías renovables. Con el hidrógeno se podrían elaborar vehículos cero emisiones. Estos desarrollos los han empezado países como Estados Unidos, Europa y Japón, que son los mayores productores de coches en el mundo. En mayo de 1998, varios vehículos a base de celdas de combustible, fueron exhibidos.

En febrero de 2002, la UTC y la NISSAN, firmaron un acuerdo para producir vehículos con celdas de combustibles como componentes. La alianza entre RENAULT y NISSAN también participa en el desarrollo de prototipos. La UTC Fuel Cell será la que proporcione las celdas de combustible de intercambio protónico a usarse en los prototipos.

Toyota Motors Cp. y Honda Motors Cp. han anunciado sus avances en el uso de plantas de celdas de combustible en sus vehículos. Honda anunció que los FCX-V4 serán lanzados con los certificados CARB y EPA de cero emisiones. El vehículo de Honda también fue el primero en recibir el certificado Ballard's.

Otras empresas automovilísticas entre las que se encuentran Chrysler, Volkswagen, Nissan, General Motors, Ford y Volvo, han anunciado también la elaboración de prototipos que utilicen las celdas de combustible de intercambio protónico, a base de hidrógeno, alcohol o gasolina.

2.3.5. Potencia para ambientes cerrados y espaciales

En la década de los 60's, se demostró la aplicación de las celdas de combustible en los programas espaciales (1 kW PEFC en el programa Géminis y 1.5 kW AFC en el programa Apolo). Recientemente, tres unidades AFC de 12 kW se utilizaron en, al menos, 87 misiones con 65,000 horas de vuelo en el transbordador espacial. En estas aplicaciones espaciales, las celdas de combustible utilizaron gases reactivos puros. La IFC fabrica celdas de combustible que utilizan O₂ / H₂, para vehículos navales de exploración profunda Lockheed de 30 kW de potencia, los cuales operan a profundidades de 1,500 metros. Los sistemas de generación de energía Ballard de celdas de combustible de tipo PEFC, base de metanol de 80 kW de potencia, son producidos para uso en submarinos y para sistemas portátiles.

2.4. Consideraciones de costo

Como cualquier clase de producto nuevo, el total de inversión y de operación de las celdas de combustible es elevado para su comercialización, a lo largo de un poco de ofrecimiento de su funcionalidad y eficiencia. La primera inversión, por lo general, tiene un gran impacto para las celdas de combustible.

El costo principal de los componentes de la celda de combustible es el que se genera por la manufacturación o elaboración, el cual está relacionado directamente a la configuración física del sistema, así como a los métodos de manufacturación usados. La configuración y el diseño del sistema están relacionados a su eficiencia y funcionalidad. Mientras que la manufacturación está relacionada fuertemente a la producción en masa.

Arthur D. Little realizó un estudio de costo estructural de varias celdas de combustible, para ampliar su rango de aplicaciones, entre las que se incluyen la tubular y plana de las celdas•

Bibliografía

[1].<http://appice.es>, última entrada, el 20 de enero de 2010.

[2].DOE, “Handbook Fuel Cell”. EEUU 7`Ed, noviembre de 2004.

[3].<http://www.rae.es>

CAPÍTULO III

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta una comparación de las celdas de combustible de acuerdo a sus características, aplicaciones, eficiencia y precio. Para poder seleccionar o mencionar cuál podría ser la mejor para aplicaciones futuras. Y se darán conclusiones al respecto.

3.2. Tablas de comparación

Tabla 8. Tabla general de las celdas de combustible. [1]

Tipo	Electrolito	Temperatura de operación en °C	Usos	Ventajas	Desventajas
Celdas de Combustible de Membrana Protónica (PEMFC)	Polímero Sólido	60 – 100	Generación estacionaria portátil y vehículos	Electrolito sólido reduce la corrosión y rápido arranque.	Catalizadores costosos. No soporta impurezas en H ₂ u otros combustibles.
Celdas de Combustible Alcalinas (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio	90 – 100	Espacio militar	Reacción catódica más rápida en electrolito alcalino. Mayor eficiencia.	Sensible a impurezas.
Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)	Ácido Fosfórico Líquido	175 – 200	Generación estacionaria portátil	85% de eficiencia en cogeneración de electricidad y calor. Acepta H ₂ impuro.	Catalizador de Pt. Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen.
Celdas de combustible de Carbonatos Fundidos (MCFC)	Solución líquida de litio, sodio y potasio	600 – 1000	Generación estacionaria	Ventajas por temperatura: mayor eficiencia y catalizadores más baratos.	Corrosión por altas temperaturas, baja vida útil.
Celdas de combustible de Óxidos Sólidos (SOFC)	Óxido de Zr con adiciones de litio	600 – 1000	Generación estacionaria	Ventajas de alta temperatura. Ventajas de electrolito sólido.	Corrosión por altas temperaturas, baja vida útil.

Tabla 9. Características de las celdas de combustible [2], [3], [16]

Tipo	MW	Eficiencia conv. eléctrico (cogeneración)	Eficiencia eléctrica	Ion móvil
PEM	Hasta 0.25	>40 %	Celda: 50-70% Sistemas: 30-50%.	H+
AFC	.01 - .1		Celda: 60-70% Sistemas: 62%	
PAFC	0.2 a 10	40 a 80 %	Celda: 55% Sistema: 40%	H+
MCFC	.25 – 100 y mayor	45 a 70 %	Celda: 55% sistema: 47%	CO32
SOFC	1 – 50 y mayor	>50 hasta > 80 %	Celda: 60-65% Sistemas: 55-60%	O2-

En la Tabla 9, se puede apreciar, de manera resumida, las ventajas y desventajas que tienen las celdas de combustible, así como sus aplicaciones. De éstas la que más nos interesa o la que puede dar más información de las celdas de combustible en un ámbito más útil, será el de transporte, en el cual se han desarrollado prototipo de coches que funcionan con celdas de combustible. Estos vehículos, en su mayoría, aún no se están comercializando, porque todavía están en período de prueba.

En comparación, la Tabla 2 muestra su eficiencia en cogeneración de combustibles, así como su capacidad de producción de energía en MW. Esta tabla muestra de manera más sencilla, que las celdas que generan mayor energía son las MCFC y las SOFC, mientras que las PAFC y las PEMFC, son las que producen menor energía; debiendo tomar en cuenta, las aplicaciones que se les da a cada una de ellas. Ya que las aplicaciones de las PAFC y las PEMFC, siendo más para uso personal, no requieren una alta producción de energía, pero se han diseñado celdas de este mismo tipo para uso en transporte. Y su eficiencia en cogeneración del combustible no es muy buena y cabe mencionar que en especial la PEMFC, requiere de una alta calidad en el combustible, hidrógeno en este caso, ya que

alguna impureza afectaría de manera crítica a la eficiencia de la misma. Así que hay que tener en cuenta que la mayor parte del combustible que se consume, no se podría volver a usar. Mientras las SOFC y las MCFC no requieren un hidrógeno puro.

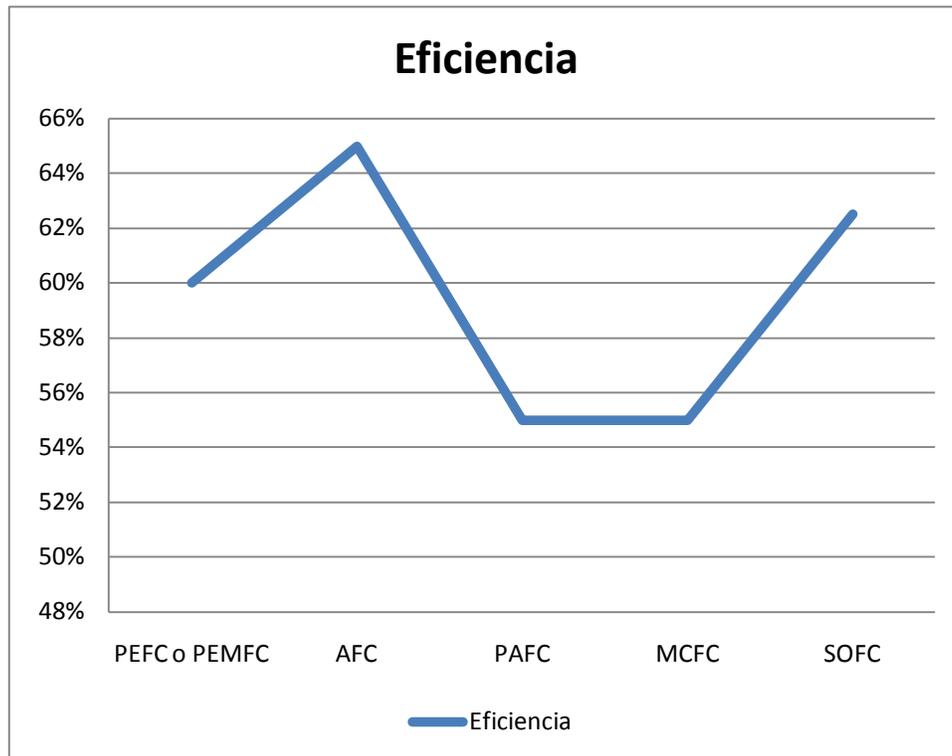


Figura 15. Gráfica de eficiencia de las celdas de combustible

En la gráfica de eficiencia se logra apreciar de manera más rápida, que la celda de combustible de hidrógeno AFC es la de mayor eficiencia, con un promedio de 65%. Pero sus aplicaciones son más enfocadas al ámbito militar o espacial, ya que es la preferida para el uso en los transbordadores espaciales.

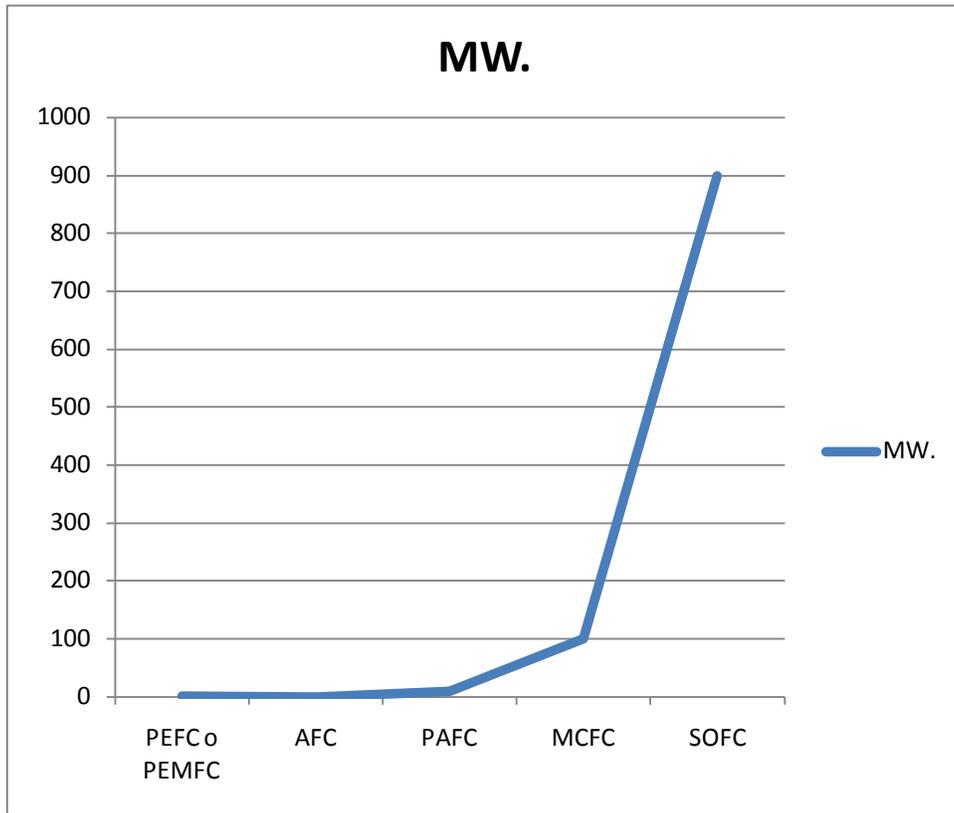


Figura 16. Mega wat de las celdas de combustible

En otro caso, la gráfica de producción de MW revela que la que produce mayor cantidad de MW es la SOFC, produciendo arriba de 100 MW, estas celdas son las de mayor tamaño y de un costo menor a escala de las PEMFC, ya que estas celdas son usadas en hospitales, fábricas y como sistemas de apoyo de energía en varios sitios, la hace viable, ya que puede mantener una autonomía mayor al mantenimiento, porque no requiere de combustibles puros para la generación de energía.

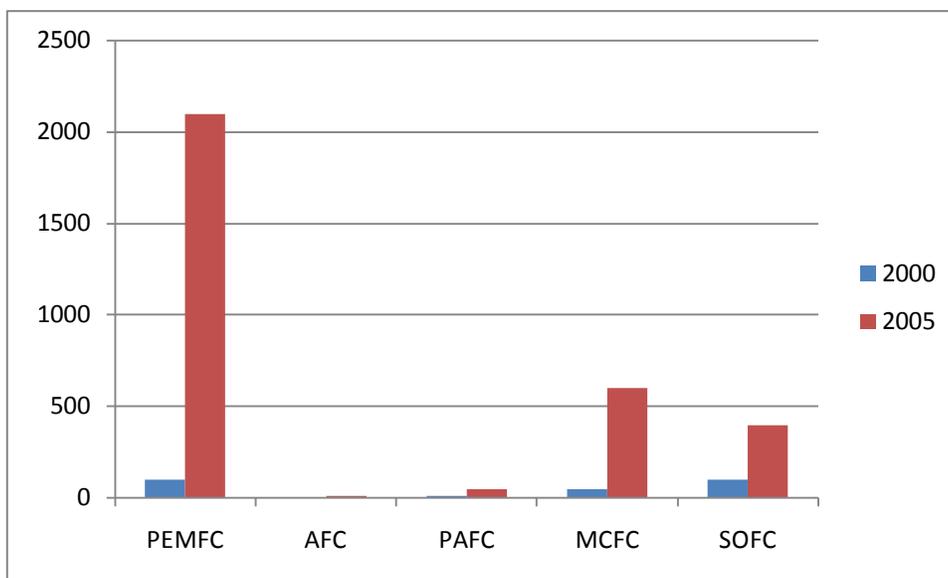


Figura 17. Datos de inversión de las celdas de combustible

En la Figura 17, se pueden apreciar los costos de las celdas de combustible. Las cifras están representadas a escala de millones de dólares.

3.3. Los motores a base de celdas de combustible

Se trata de un motor eléctrico con la facilidad de almacenaje de una gran cantidad de energía en forma de combustible en un tanque. La electricidad no se almacena en baterías, se genera en el propio vehículo, gracias a una reacción química llamada combustión fría.

La celda de combustible es la opción con mayor futuro dentro de los sistemas de impulsión alternativos. De hecho, protagoniza un programa de ensayo práctico de autobuses con celdas de combustible, el experimento más ambicioso que existe sobre energías alternativas para la automoción. Lo patrocina la Comisión Europea y se está llevando a cabo en diez ciudades de la Unión, entre las que se encuentran Madrid y Barcelona. La celda de combustible que alimenta el motor produce corriente eléctrica gracias a una reacción generada entre el hidrógeno y el oxígeno del aire, otorgando a estos autobuses una autonomía de ocho horas. El precio de uno de estos autocars puede ser ocho

veces superior al de un modelo diesel habitual. En cambio, sus motores sólo emiten a la atmósfera vapor de agua. El director general de ARIEMA, la consultora española con experiencia en tecnologías de hidrógeno y pilas de combustible, Rafael Luque, asegura que “el hidrógeno se puede producir a partir de cualquier energía capaz de producir electricidad”. Para él, la principal ventaja del hidrógeno frente a la electricidad, es que puede almacenarse y utilizarse de manera más eficiente, mediante una pila de combustible (proceso inverso a la electrolisis que genera electricidad, explica). [15]

Tabla 10. Tabla de inversiones de empresas automovilísticas en prototipos de celdas de combustible

Empresa.	Inversión	Fabricante de las celdas
Chrysler	US \$ 4,000,000	Ballard
Ford motors	US \$420,000,000	Ballard/Benz
Daimler Benz	US \$ 725,000,000	Ballard
Honda	US \$ 2,000,000	Ballard
Nisan	Ca \$ 2,200,000	Ballard

3.4. Costo de las celdas de combustible en los automóviles.

No es sensato crear falsas expectativas, ni creer que el hidrógeno, como vector energético, será la panacea en el sector de la automoción y en otros muchos. Los fabricantes no pueden generalizar una innovación hasta que precios y prestaciones puedan competir con lo existente. La buena noticia, para Luque, es que todas las empresas energéticas, las eléctricas y las grandes entidades financieras dedican grandes recursos a investigar en estas tecnologías.

Según Daimler Chrysler, uno de los fabricantes de los autobuses que forman parte del referido programa “Cero emisiones” de la Comisión Europea, los vehículos de la célula de combustible alimentados por hidrógeno son aptos para el uso en flotas, es decir, para los servicios que vuelven al mismo punto central a reaprovisionarse. Este motor sería básicamente el mismo que el del modelo Nekar 4, un turismo con el diseño de Clase A de Mercedes.

Sin embargo, Juan Bañeres considera, desde Daimler Chrysler España, que para el transporte personal, los motores que convierten el metanol en hidrógeno serán los más operativos, pues este combustible puede ser transportado y suministrado como la gasolina. El metanol puede ser producido a partir de cualquier combustible fósil, pero emite dióxido de carbono, aunque en proporciones mucho menores que los motores actuales. El modelo que incorpora un motor así, es el Nekar 5.

Los Nekar salieron al mercado en Estados Unidos a finales de 2005. No puede “aventurar” ni el precio y ni el número de unidades, ya que estas variables dependen de múltiples factores, entre los que se encuentran las subvenciones, el desarrollo de las infraestructuras de combustible, etc. Tampoco puede hablarse de costos de producción, “ya que no ha de repercutirse en una unidad todo un proceso de investigación”. De todas formas serán “bastante caros”, aduce, “ya que las membranas responsables de la ósmosis están compuestas de platino y el motor incorpora otros materiales muy costosos”. [15]

Tabla 11. Tabla de electricidad de las celdas de combustible [4-10]

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Rango de la unidad. En MW	.001 - .25	.001 - .1	.05 – hacia arriba.	.3 – hacia arriba.	.3 – hacia arriba.
Eficiencia Nominal					
I. Sólo para generación de electricidad	28 – 40	30 – 40	37	50 – 55	28 – 55
II. Para combinación de calor y poder	80 – 90	70 – 80	80 – 90	80 – 90	80 – 90
Eficacia a carga parcial	La misma que la nominal	La misma que la nominal	La misma que la nominal	La misma que la nominal	La misma que la nominal
Combustible	Hidrógeno puro	Hidrógeno	Hidrógeno o combustibles reformados de metanol, gas natural y otros.	Hidrógeno, CO, gas natural, cualquier hidrocarburo.	Hidrógeno CH ₄ , CO ₂ + H ₂ O, CO, metanol, cualquier hidrocarburo.
Flexibilidad de					

explotación					
• Arranque en Frio. (minutos)	10 – 60	10 – 60	180 – 240	60 – 1200	60 – 1440
• Arranque tibio (minutos)	4.3 seg a 293.15 K y 8.3 seg a 253.15 K	<1	<5	<10	<10
• Descontrol de variación en carga	Insignificante	Insignificante	Insignificante	Insignificante	Insignificante

Tabla 12. Tabla económica de las celdas de combustible [6], [8], [10],[11-14]

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Costo de la Inversión (euro/MW)	1 000 000 a 70 000 000	1 900 000	4 500 000	2 800 000 a 5 000 000	15 000 000 a 30 000 000
Disponibilidad (horas por año)	No hay datos	No hay datos	8410 (96%)	No hay dato	No hay datos
Horas Operativas	No hay datos	No hay datos	No hay datos	No hay datos	No hay datos
Fiabilidad	No hay datos	No hay datos	No hay datos	No hay datos	No hay datos
Duración de la vida técnica	2.3 años a sistemas móviles y 11 años a los estacionarios	De 2 a 4 años	11 para stack y 20 para plantas.	3 a 4 años	8 a 11 en stack y 20 para plantas.

Conclusiones

En conclusión, las energías no convencionales como están en pleno desarrollo, aún tienen mucho camino por delante para alcanzar la eficiencia requerida para su utilización en la satisfacción de las necesidades sociales y la protección del ambiente.

Las celdas de combustibles, por el momento, resultan onerosas por los altos costos de los materiales que se necesitan para su producción, aunque en la actualidad se estudian las formas en que puedan hacerse socialmente accesibles.

Para el caso de celdas de combustible de hidrógeno, hay que destacar que, no obstante el alto costo de sus materiales, su eficiencia es mayor en comparación a las demás energías no convencionales, de las cuales la más destacada en desarrollo para uso común, es la celda tipo PEM.

No obstante lo anterior, no se puede determinar cuál de ellas es la mejor, ya que de acuerdo a las necesidades que se pretendan satisfacer con su aplicación, será la celda de combustible que se seleccione.

Cabe destacar que, con el presente trabajo de investigación, se cumplió con el objetivo de hacer un documento, que pudiera servir como de fuente de información esencial sobre el tema, así como sus aplicaciones.

Bibliografía

- [1] Martos Aranza, Manuel Jesús; técnica Industrial – eficiencia energética – noviembre de 2005.
- [2] Scientia et Technica Año XIII, No 37, diciembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN.
- [3] Cano Castillo, Ulises; boletín iie septiembre/octubre de 1999.
- [4] Schaller, Karl Viktor and Gruber, Christian 2000, CITY BUSES WITH FUEL CELL DRIVE, Blomen, Leo. Fuel Cell 2000. 265-272, Switzerland, European Fuel Cell Forum.
- [5] Krewitt, Wolfram et al, 2004, BRENNSTOFFZELLEN IN DER KRAFT-WARME-KOPPLUNG: OKOBILANZEN, SZENARIEN, MARKTPOTENZIALE, Berlin.
- [6] Dicks, Andrew and Larminie, James 2000, REFORMING OF FOSSIL FUELS (STATUS SURVEY), Blomen, Leo. Fuel Cell 2000. 357-366, Switzerland, European Fuel Cell Forum.
- [7] Kordesch, Karl, et al 2000, ALKALINE FUEL CELLS APPLICATIONS, Journal of Power Sources 86, [1-2], 162-165, <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TH1-3YYV71V-X/2/83423bfecee34684ee3a2ed0bc609fb5>>
- [8] Anahara, Rioji, 1993, RESEARCH, DEVELOPMENT, AND DEMONSTRATION OF PHOSPHORIC ACID FUEL CELL SYSTEMS, Blomen, Leo and Mugerwa, Michael. Fuel Cell Systems. [8], 271-343, New York, Plenum Press.
- [9] Selman, J 1993, RESEARCH, DEVELOPMENT, AND DEMONSTRATION OF MOLTEN CARBONATE FUEL CELL SYSTEMS, Blomen, Leo and Mugerwa, Michael. Fuel Cell Systems. [9], 345-463, New York, Plenum Press.
- [10] Energy Nexus Group 2002, TECHNOLOGY CHARACTERIZATION: FUEL CELLS, 2005. <<http://www.epa.gov/chp/pdf/EPA%20Fuel%20Cell%20final%2006-18-02.pdf>>

- [11] Karakoussis, Vasilis et al 2000, ENVIRONMENTAL EMISSIONS OF SOFC AND SPFC SYSTEM MANUFACTURE AND DISPOSAL,
- [12] Dries, Haeseldonckx 2005, FUEL CELLS COSTS, 2005. <Personal Communication>
- [13] McLean, G. F. et al 2002, AN ASSESSMENT OF ALKALINE FUEL CELL TECHNOLOGY, International Journal of Hydrogen Energy 27, [5], 507-526, <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V3F-44PKMJ2-2/2/32e6630a22d7b8f5239702c44e8530ed>>
- [14] Thomas, Ditoro 2000, FUEL CELLS: IMPROVING THE BOTTOM LINE, 2005. <<http://www.distributedgeneration.com/Library/Ditoro.ppt>>
- [15] http://www.consumer.es/web/es/especiales/2004/03/08/96795_print.php
- [16] http://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible

ANEXO I. Glosario

Electrodo: El electrodo de una celda electroquímica es el lugar donde se produce la reacción de oxidación.

Ánodo: Se denomina ánodo al electrodo positivo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones negativos dentro del electrolito.

Cátodo: Se denomina cátodo al electrodo negativo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones positivos.

Plato Monopolar: Se define como plato monopolar a la placa por la cual circula una carga eléctrica, dada por el gas que se le introduzca.

Plato Bipolar: Se define plato bipolar al que maneja dos cargas eléctricas, una por cada cara, los cuales están definidas por el gas introducido en él.

Membrana Protónica: Son de base de polímeros que permite el paso únicamente de los protones de un lado a otro.

Sellos: Por lo general, están constituidos por silicona, su función es el simple sellado para que no se mezclen los gases.

Placa Aislantes: También conocidos como placas de presión, su función es mantener el sellado y la estructura de la celda de combustible, constituidas generalmente de acero inoxidable o plástico.

Placa Colectora: Su función es coleccionar la potencia total del stack, construidas de cobre.

Monocelda de Combustible: Sandwich