



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“HIPÓTESIS PARA LA GENERACIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE PILAS DE
COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N :

HÉCTOR HUGO ESPINOSA HERNÁNDEZ
JOSÉ ALFREDO RUIZ ZÁRATE

ASESOR: ING. MARCOS BELISARIO GONZÁLES LORIA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

A la mujer más grandiosa, aquella que se entrega a su familia sin exigir nada a cambio; que sacrifica todo por sus hijos; que es la última que se duerme y la primera que se despierta; que siempre tiene la comida caliente; esa mujer siempre tan fuerte, pero tan frágil; a quien debo todo.

A mi mamá

Al hombre de la casa, ese que desde pequeño he admirado; el que me ha demostrado con el ejemplo, aquel que no se derrumba ni ante las peores adversidades, por darme no solo ayuda económica y moral, si no amor.

A mi papá

A mis hermanos Luis y Cielo, por su apoyo y cariño, porque aunque a veces peleamos, ¿qué hermanos no lo hacen?

A mis hermanos

A las personas que más quiero, que me dieron la vida y que han estado en todo momento junto a mí para apoyarme. Quiero decirles que esto es SUYO porque sin ustedes jamás lo hubiera logrado.

GRACIAS

Héctor Hugo Espinosa Hernández

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México nuestra máxima casa de estudios por brindarme la oportunidad de formarme no solo como profesionista si no también como una mejor persona y porque ser puma de sangre azul y piel dorada no tiene precio.

A mi asesor de tesis, el Ing. Marcos Belisario González Loria por su apoyo, su tiempo, su paciencia y por todos sus valiosos consejos que hicieron posible la culminación de este trabajo.

A los miembros del jurado: Ing. Gabriel Vázquez Castillo, Ing. Marcos Belisario González Loria, Ing. Fernando Fierro Téllez, Ing. César Sinhue Moreno Varela y al Ing. Gilberto Chavarría Ortiz por el tiempo dedicado a la elaboración de este trabajo.

A mis profesores de la carrera, por sus valiosas enseñanzas y porque siempre tuvieron tiempo para resolver todas mis dudas.

A mis amigos de la carrera quienes para mi fueron y seguirán siendo mi familia.

A todas las personas que creyeron en todo momento en mí GRACIAS.

Héctor Hugo Espinosa Hernández

DEDICATORIAS

Este trabajo está dedicado especialmente a mi padre RODRIGO RUIZ HERNÁNDEZ por sus consejos, cariño y motivación. Porque gracias a su ejemplo he logrado cumplir mis metas.

A mi madre LUDIVINA ZÁRATE MORALES por todo el apoyo que me ha brindado a lo largo de mi vida.

A mi hermana MARLEN RUIZ ZÁRATE en reconocimiento al gran esfuerzo realizado por su familia, ya que gracias a él pude culminar mis estudios.

A mis hermanos RODRIGO RUIZ ZÁRATE y DANIEL RUIZ ZÁRATE por haberme brindado su ayuda en todo momento.

A GUADALUPE CERVANTES RODRIGUEZ por su apoyo y compañía.

José Alfredo Ruiz Zárate

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero CARLOS ERNESTO PINEDA GARCÍA por sus enseñanzas, apoyo y amistad.

Al Ingeniero ALEJANDRO MARTINEZ MONCADA por brindarme su amistad.

Al Ingeniero MANUEL TORRES MERINO por su apoyo y comprensión.

Al Ingeniero CESAR SINHUE MORENO VARELA por su valiosa orientación.

Al Ingeniero MARCOS BELISARIO GONZALEZ LORIA por su asesoría en la realización del presente trabajo.

A los miembros del jurado: Ing. Gabriel Vázquez Castillo, Ing. Marcos Belisario González Loria, Ing. Fernando Fierro Téllez, Ing. César Sinhue Moreno Varela y al Ing. Gilberto Chavarría Ortiz por el tiempo dedicado a la elaboración de este trabajo.

José Alfredo Ruiz Zárate

INDICE

Introducción.	1
Objetivos.	4

Capítulo I

Análisis del funcionamiento de una celda de combustible.

1.1 ¿Qué es una pila, célula o celda de combustible?	5
1.2 Antecedentes históricos.	7
1.3 Tipos de celdas.	11
1.3.1 Pilas de combustible alcalinas.	13
1.3.2 Pilas de polímeros sólidos.	16
1.3.3 Pilas de combustión directa de metanol.	18
1.3.4 Pilas de ácido fosfórico.	19
1.3.5 Pilas de carbonatos fundidos.	22
1.3.6 Pilas de óxidos sólidos.	24
1.4 Componentes de una celda de combustible H ₂ /O ₂ .	27
1.4.1 Placas bipolares.	32
1.4.2 Capa difusora de gases.	32
1.4.3 Membrana electrolítica.	33
1.4.4 Capa catalizadora	33
1.5 Aplicaciones de las pilas de combustible.	34
1.5.1 Celdas PEM para usos móviles.	38
1.5.2 Celdas PEM de metanol directo para usos portátiles.	43
1.5.3 Celdas estacionarias para generación distribuida.	45
1.6 Beneficios ambientales.	46
1.7 Características de los diferentes tipos de pilas de combustible.	49

Capítulo II

Principio de funcionamiento de los elementos que conforman una celda de combustible.

2.1 Principios básicos de funcionamiento.	51
2.2 Reacción en la celda.	54
2.2.1 Reacciones en ánodo y cátodo.	56
2.3 Electrodo poroso.	57
2.4 Electrolitos y Catalizadores.	61
2.5 Funcionamiento de una celda de combustible.	62
2.6 Estructura básica de una pila de combustible.	66
2.6.1 Placas de cierre.	66
2.6.2 Soportes.	67
2.6.3 MEA (Membrane Electrode Assembly).	67
2.6.4 Placas Refrigeradoras.	67

Capítulo III

Elementos que podrían formar junto con la pila de combustible un sistema de generación de energía eléctrica.

3.1 Pila de combustible.	68
3.2 El hidrógeno como combustible.	69
3.2.1 Propiedades del hidrógeno.	72
3.2.2 Obtención y manejo del hidrógeno.	76
3.2.3 Producción de hidrógeno vía solar-fotovoltaico.	78
3.2.4 Producción de hidrógeno vía carbón.	78
3.2.5 Producción de hidrógeno vía energía eólica.	79
3.2.6 Producción de hidrógeno vía energía nuclear.	79
3.2.7 Producción de hidrógeno vía gas natural.	80
3.2.8 Uso del hidrógeno en las celdas de combustible.	81

3.3 Características de los concentradores y colectores solares.	83
3.3.1 Tipos de colectores solares.	86
3.4 Funcionamiento de un motor Stirling.	89
3.5 Función de un generador eléctrico.	91
3.6 Descripción del funcionamiento del electrolizador.	92

Capítulo IV

Hipótesis para crear un ciclo de energía renovable usando pilas de combustible capaz de satisfacer la demanda energética.

4.1 Justificación de los siguientes elementos: Concentradores solares, motor Stirling, generador eléctrico, electrolizador.	96
4.2 Elementos del ciclo.	97
4.3 Descripción de la hipótesis.	97
4.4 Rendimiento de una pila de combustible.	102
4.5 Consideraciones de diseño en las pilas de combustible.	104
Conclusiones.	106
Glosario de términos técnicos.	107
Bibliografía	110

INTRODUCCIÓN

El rostro de la civilización se ha formado con el uso de la energía, durante el pasado siglo el carbón, el petróleo, el gas natural y la electricidad han transformado la condición humana. Pero con el aumento de la población mundial crece la demanda, la sed de energía no puede ser satisfecha solamente con los combustibles fósiles su suministro limitado y las repercusiones al medio ambiente han desencadenado la búsqueda de algo mejor, el objetivo es utilizar energías y combustibles limpios y eficientes procedentes de energías renovables como el sol y el viento. Ya se ha hallado una solución posible para un futuro limpio, sostenible, es el combustible que nos ha llevado a la luna, el hidrógeno. ¿Será la gasolina del siglo XXI?

¿Podrá ser el átomo más sencillo del universo el combustible del futuro? Los gobiernos de los grandes países y las principales empresas lo creen así y están invirtiendo miles de millones para desarrollar este sistema de energía. Algunos dicen que el desarrollo de la energía del hidrógeno será una revolución tan dramática como la bombilla o el microchip.

El hidrógeno está en todas partes, más del 90% de los átomos del universo son de hidrógeno combinado con el oxígeno forma el agua, añadiéndole carbono es la base de nuestra vida, en estado puro puede ser un combustible potente, limpio y seguro.

El hidrógeno no es una fuente de energía como el carbón o el petróleo, es un combustible manufacturado como la gasolina y la electricidad, se pueden utilizar fuentes de energía renovables como la energía solar y la energía eólica para extraer moléculas de hidrógeno y oxígeno del agua, así se dispone de hidrógeno para utilizarlo como combustible para nuestros automóviles, para nuestras casas e incluso en la industria.

El hidrógeno es la respuesta a una necesidad fundamental porque ¿Cómo llenamos los depósitos de combustible de nuestros coches con energías como el viento y la luz solar?

Otra cosa positiva del hidrógeno es que podemos obtenerlo en un corto periodo de tiempo del gas natural y otros combustibles fósiles, por eso la era del hidrógeno podría comenzar casi inmediatamente.

El hidrógeno está por todas partes, pero es difícil encontrarlo sobre la tierra como elemento separado. En cambio se encuentra en combinación con el carbono en todo, desde los hidrocarburos a las plantas y animales pero la forma más rápida de obtener hidrógeno es algo que tenemos a nuestro alrededor, el agua.

El rocío que cae en la tierra cada hora contiene el hidrógeno suficiente para proporcionar varias veces la energía que necesitamos anualmente y de hecho ya existe la tecnología para separarlo del agua usando electricidad. Un proceso que los científicos llaman la electrolisis.

La electrolisis puede utilizar cualquier fuente de electricidad y desde que los electrolizadores pueden ser de un tamaño muy pequeño son un buen complemento para la energía solar y energía eólica. Usando energía renovable se produce un ciclo de hidrógeno muy limpio pero además la cantidad de energía disponible de los recursos renovables es inmensa. Una buena meta sería producir hidrógeno a partir de la energía solar, eólica y la biomasa.

El hidrógeno es un portador de energía muy versátil como cualquier otro combustible puede quemarse e impulsar un cohete como el transbordador espacial de la NASA o un motor de combustión interna.

Se puede utilizar hidrógeno en motores similares a los que hoy alimentamos con gas natural y gasolina pero también puede usarse como un dispositivo llamado

pila de combustible. Hoy uno de los tipos más populares de pilas de combustible es el llamado PEM o Membrana de Protones Intercambiable.

Las pilas de combustible producen electricidad muy eficazmente y pueden ser utilizadas en automóviles y camiones e incluso en edificios y barcos. Una de las grandes virtudes de las células de combustible de hidrógeno es que pueden tener infinidad de tamaños, desde las baterías de los audífonos hasta las de los teléfonos móviles o las de las computadoras.

Además una característica muy importante de las pilas de combustible es que no contaminan, ya que el único producto que resulta de la transformación del hidrógeno en electricidad es agua pura, por lo tanto de esta forma podríamos acabar con emisiones de gases al ambiente que producen el llamado efecto invernadero.

La mayoría del hidrógeno disponible se produce hoy a partir del gas natural utilizando un proceso llamado reformado por vapor, que esencialmente es una reacción del vapor con el gas natural extrayendo el hidrógeno de ambos componentes.

El matrimonio del hidrógeno y las fuentes de energía renovables ofrecen una oportunidad única, el hidrógeno es el eslabón perdido para el uso extendido de las energías renovables, cuando la energía se genera usando por ejemplo el sol o el poder del viento el problema recurrente es que la energía es intermitente solo puede usarse mientras el sol brilla o sopla el viento, desgraciadamente la disponibilidad de energía no siempre coincide con la demanda y por eso debe almacenarse para tenerla en todo momento; en éste trabajo de titulación se mostrará y demostrará la viabilidad de un proyecto que promete ser el futuro en el sector energético de nuestro país.

OBJETIVOS

Con la realización de este trabajo se pretende lograr una serie de objetivos que puedan sentar un precedente en la búsqueda de fuentes de energía alternas teniendo en cuenta la situación por la que atraviesa el país con respecto a la explotación de los hidrocarburos.

- Proporcionar una amplia explicación sobre el funcionamiento de una celda de combustible.
- Dar a conocer todos los beneficios que se obtienen al utilizar estas celdas como fuente de energía renovable.
- Proponer un método sencillo y eficaz para la obtención del hidrógeno que es combustible utilizado en estas celdas.
- Intentar mediante esta hipótesis revertir el problema ambiental causado por la explotación y uso de los hidrocarburos mediante este proceso de obtención de energía que no contamina.
- Demostrar que el hidrógeno puede sustituir en un futuro no muy lejano al petróleo y gas natural.
- Ofrecer una alternativa viable para la obtención de energía en el país cuando se termine con la explotación de los combustibles fósiles.

I.- ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.

1.1 ¿QUÉ ES UNA PILA, CÉLULA O CELDA DE COMBUSTIBLE?

Una pila de combustible, también llamada célula o celda de combustible es un dispositivo electroquímico capaz de convertir directamente la energía química de un combustible, alimentado ininterrumpidamente en energía eléctrica (corriente continua). La pila de combustible es similar a una batería, pero se diferencia de esta última en que está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos, es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería. Además, los electrodos en una batería reaccionan y cambian según como esté de cargada o descargada; en cambio, en una celda de combustible los electrodos son catalíticos y relativamente estables.

La situación por la que atraviesa nuestro país respecto a la explotación del petróleo y gas natural hace que tengamos la imperiosa necesidad de buscar nuevas fuentes de energía. Hoy por hoy sabemos que los combustibles fósiles son una fuente importante de energía, pero la conversión de un combustible fósil en energía eléctrica es un proceso poco eficiente. La planta de energía más eficiente convierte solamente 40% de la energía química original en electricidad. Además las emisiones de este tipo de tecnología tienen un fuerte impacto en el medio ambiente.

Una posible solución a este problema puede ser el uso de las celdas de combustible antes mencionadas cuyo funcionamiento consiste en la producción de electricidad mediante el uso de químicos, que usualmente son hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible y el oxígeno es obtenido directamente del aire. En la celda de combustible los reactivos deben

renovarse en forma continua y los productos deben eliminarse de forma constante. Producirá energía en forma de electricidad y calor mientras se le provea de combustible. El único subproducto que se genera, cuando se usa H_2 , es agua 100% pura, también pueden ser usados otros tipos de combustible que contengan hidrógeno en su molécula, tales como el gas metano, metanol, etanol, gasolina o diesel entre otros.

Las principales ventajas de estos sistemas son la alta eficiencia en la producción de electricidad (al no tener la limitación de Carnot), el bajo impacto ambiental (nulo si opera con hidrógeno), ausencia de ruidos por no tener partes móviles, modularidad, flexibilidad y cortos tiempos de montaje, debido a que se fabrican en módulos de no muy alta potencia, fácilmente conectables para adaptarse a las necesidades sin perder rendimiento, y posibilidades de emplearse para generación distribuida y cogeneración, así como en el transporte.

En la figura 1.1 se presenta un esquema comparativo entre la tradicional obtención de energía eléctrica en máquinas térmicas y la obtención en la pila de combustible, es importante destacar cómo la mayor cantidad de procesos involucrados en la obtención de energía eléctrica mediante métodos tradicionales, implica claramente una menor eficiencia debido principalmente a las pérdidas asociadas a cada una de las conversiones, inicialmente se produce una conversión de la energía química del combustible en energía calorífica, ésta energía calorífica se convierte en energía mecánica, finalmente esta energía mecánica se convierte en energía eléctrica; en una pila de combustible la conversión de la energía química del combustible en energía eléctrica es directa sin ninguna conversión intermedia, por lo que las pérdidas son mucho menores.

La desventaja reside actualmente en el precio, pero las enormes inversiones que se están realizando en Norteamérica y Japón, recientemente en la Unión Europea, pueden eliminar esta barrera posiblemente en muy poco tiempo.

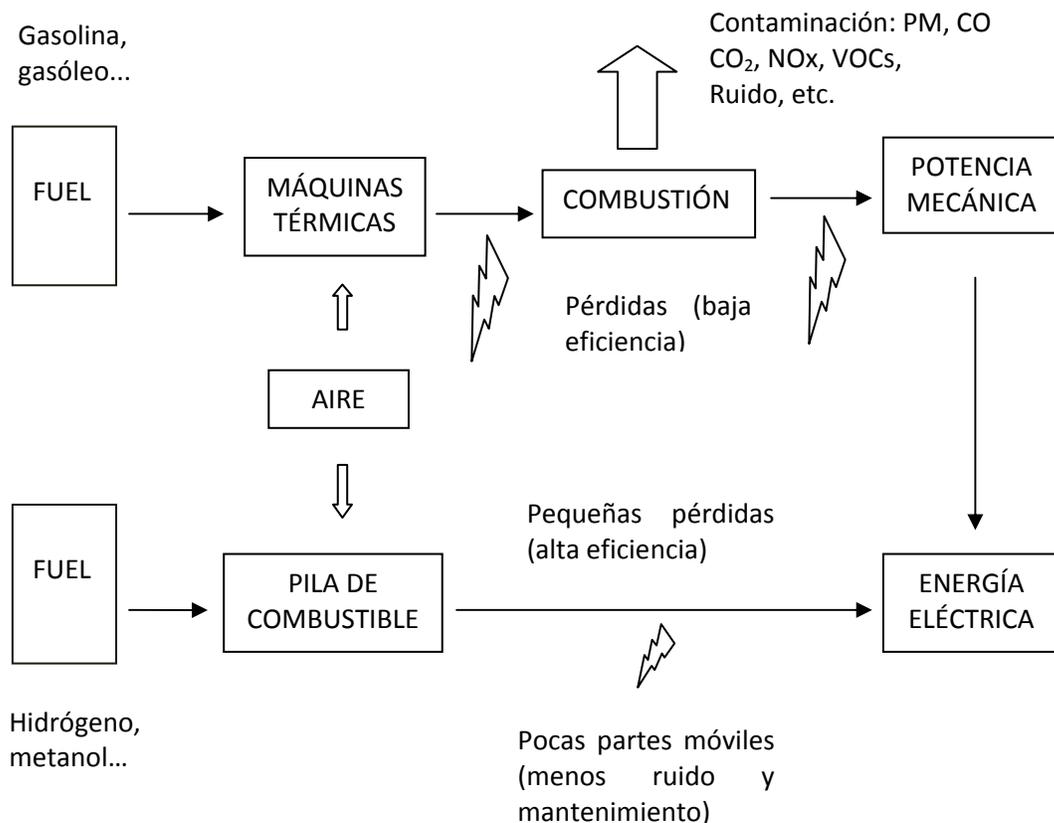


Figura 1.1 Obtención de energía eléctrica convencional y mediante pila de combustible.

1.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

En 1839, unos pocos años después que Michael Faraday descubriera las leyes de la electrólisis, el abogado galés William Grove, había hecho público un experimento que demostraba la posibilidad de generar corriente eléctrica a partir de la reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno. Su original experimento consistía en unir en serie cuatro celdas electroquímicas, cada una de las cuales estaba compuesta por un electrodo con hidrógeno y otro con oxígeno, separados por un electrolito. Grove comprobó que la reacción de oxidación del hidrógeno en el electrodo negativo combinada con la de reducción del oxígeno en el positivo, generaba una corriente eléctrica que se podía usar a su vez para generar hidrógeno y oxígeno.

Grove desarrolló los primeros prototipos de laboratorio de lo que él llamaba "batería de gas" y hoy conocemos como "pila de combustible" (en 1839 realizó sus primeros experimentos y en 1845 la demostración definitiva de su sistema). Sin embargo, los principios básicos de funcionamiento de la pila de combustible los descubrió algo antes (en 1838) el profesor suizo Christian Friedrich Schoenbein (1799–1868).

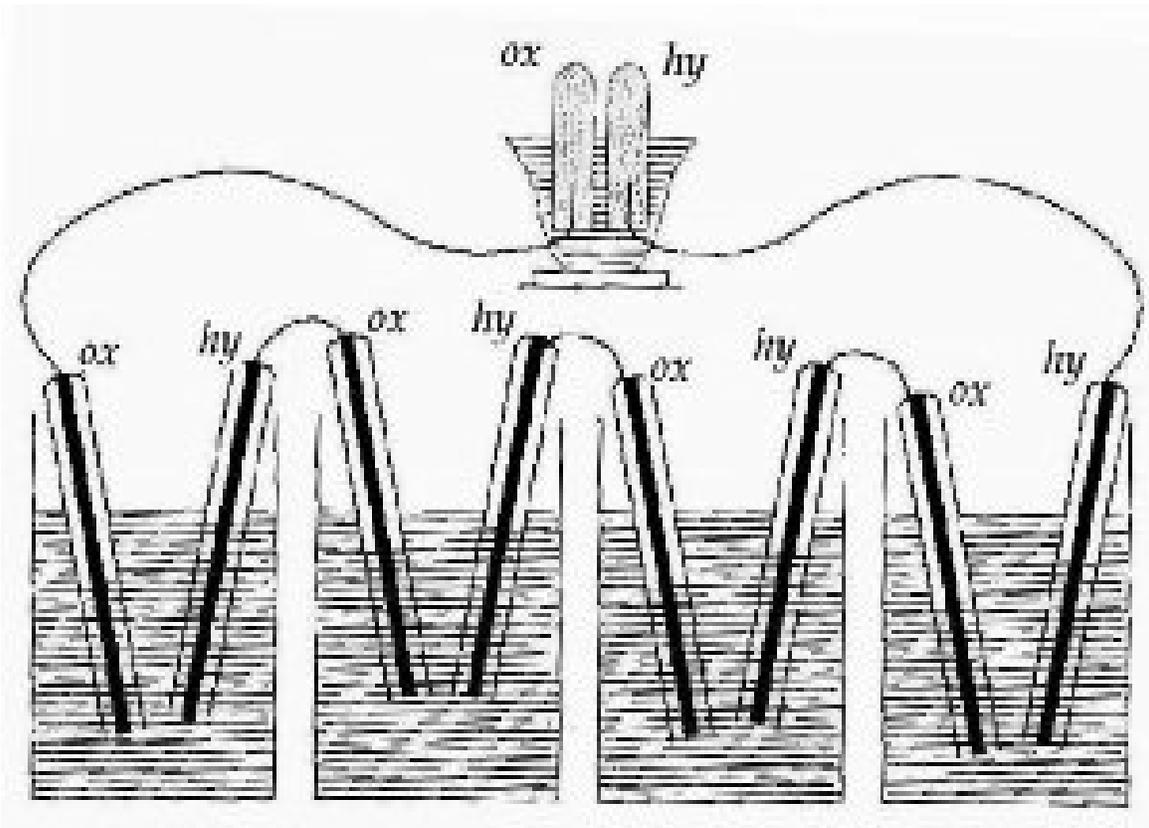


Figura 1.2 Pila de combustible de Grove.

Grove usó cuatro celdas grandes, con H_2 y O_2 para producir energía eléctrica que a su vez se podía usar para generar hidrógeno y oxígeno (en la celda superior, más pequeña). El experimento de Grove mostraba la esencia y el camino. La esencia, la interconvertibilidad entre la energía química de un combustible y la energía eléctrica; el camino, la posibilidad de convertir esa energía directamente en electricidad sin pasar por un proceso intermedio de combustión.

Y es que la manera tradicional de aprovechar la energía potencial de los combustibles quemándolos para que la energía térmica producida se convierta a su vez en energía mecánica es poco eficiente. Ése es precisamente el proceso que siguen nuestros motores de combustión interna y también nuestras grandes centrales térmicas. El paso intermedio a través de la energía térmica limita drásticamente la eficiencia y la limita de forma inherente, debido a las leyes de la termodinámica, sin que ningún proceso de optimización lo pueda corregir.

La ciencia de materiales no estaba muy desarrollada por aquel entonces y la invención de Grove pasó a ser una mera curiosidad debido al bajo rendimiento de este proceso. Pero casi un siglo después, Francis T. Bacon desarrolló una celda de combustible utilizando electro-catalizadores de platino y solución alcalina como medio conductor. Esta celda alcalina se perfeccionó rápidamente y en la década del 60 una celda alcalina de 1 KW se utilizó en el módulo espacial "Gemini" que llevó al primer hombre a la Luna.

Las celdas de combustible permiten promover una diversidad de energía y una transición hacia fuentes de energía renovables. Así, una variedad de distintos combustibles pueden ser usados en éstas, combustibles tales como hidrógeno, metanol, etanol, gas natural así como gas licuado (LPG). La energía también podría ser provista a partir de biomasa, sistemas eólicos ó bien solares.

En principio, 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. Producirá energía en forma de electricidad y calor mientras se le provea de combustible. El único subproducto que se genera es agua 100% pura.

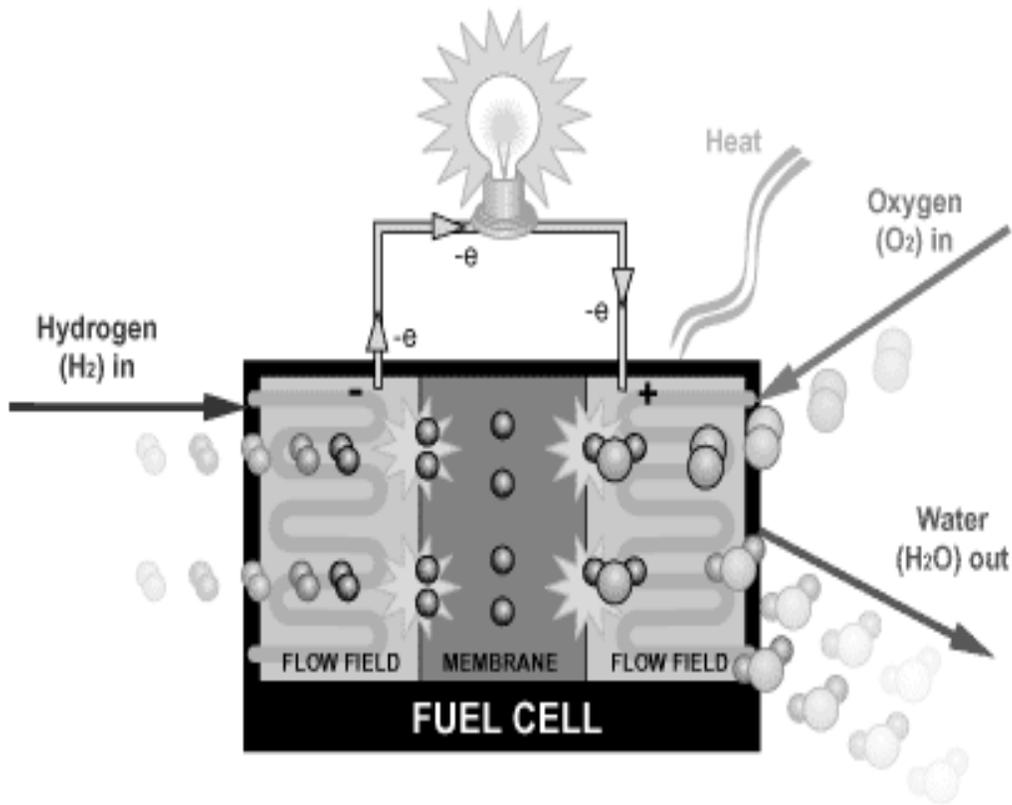


Figura 1.3 Pila de combustible.

Pero además las pilas de combustible y los nuevos modelos energéticos que representan están empezando ya a tomar forma palpable y magnitud global en algunos rincones de nuestro planeta como Islandia, que a través de una iniciativa pionera y esperanzadora, pretende convertirse en el primer país con un nuevo modelo energético renovable basado en el hidrógeno gracias a su abundante energía geotérmica e hidroeléctrica. Podemos recordar la alianza estratégica que se ha formado entre el gobierno islandés y las compañías Daimler-Chrysler, Shell Oil, una compañía hidroeléctrica noruega, la Norsk Hydro, y la compañía canadiense líder en el diseño de pilas de combustible Ballard Power Systems. Todas están ahora en el mismo barco, un barco que podría mostrar el camino hacia la reducción drástica y necesaria de gases de efecto invernadero e inaugurar una nueva revolución limpia en nuestras calles.

En años más recientes, alrededor de 60 empresas en todo el mundo, de las cuales siete de estas se encuentran dentro de las 10 más grandes del mundo en cuanto a ganancias se refiere, trabajan en su investigación, desarrollo y determinación de sus potenciales aplicaciones, con el objeto de hacerlas más confiables, durables y reducir su costo. Se considera que esta tecnología revolucionará el mundo como en su momento lo hizo el motor de combustión interna, teniendo impactos positivos tanto económicos como en el medio ambiente.

1.3 TIPOS DE CELDAS.

Las celdas de combustible bien diseñadas pueden llegar a tener una eficiencia de hasta 75%, dos veces más que un motor de combustión interna. Las celdas de combustible pueden clasificarse en función de determinados parámetros: por su temperatura de trabajo, tipo de electrolito, tipo de combustible y oxidante, combustible directo e indirecto, etc. De todos estos criterios, el que ha predominado es por la clasificación según el electrolito empleado, que puede ser ácido o básico, que condiciona la temperatura de operación, rendimiento y el campo de aplicación.

<p>Pilas de combustible de baja temperatura</p>	<p>AFC (Alcalinas) PEMFC (Membrana de intercambio protonico) DMFC (Metanol directo) PAFC (Ácido fosfórico)</p>
<p>Pilas de combustible de alta temperatura</p>	<p>MCFC (Carbonato fundido) SOFC (Oxido sólido)</p>

Tabla 1.1 Clasificación de la pilas de combustible de acuerdo a su temperatura de operación.

Tipo	Acrónimo	T.O, °C	Material del electrolito	Capacidad	Eficiencia
Alcalinas	AFC <i>(Alcaline Fuel Cell)</i>	65-220	Hidróxido de potasio	Hasta 250 KW	70%
Membrana de intercambio protónico y metanol directo	PEMFC <i>(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)</i> DMFC <i>(Direct Methanol Fuel Cell)</i>	25-80	Membrana de intercambio protónico	De 3 KW hasta 250 KW	60%
Ácido fosfórico	PAFC <i>(Phosporic Acid Fuel Cell)</i>	175-205	Ácido fosfórico líquido disperso en teflón y silicio	De 12 KW hasta 11 MW	40% y 75%
Carbonato fundido	MCFC <i>(Molten Carbonate Fuel Cell)</i>	540-650	Carbonato de sodio o potasio en una matriz de óxido de aluminio y litio	De 250 KW hasta 2 MW	50% y 65%
Oxido Sólido	SOFC <i>(Solid Oxide Fuel Cell)</i>	600-1000	Zirconia sólida itria estabilizada	Hasta 250 KW	50% y 65%

Tabla 1.2 Clasificación de las pilas de combustible.

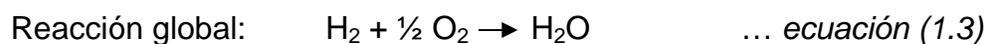
Como se puede observar en la tabla 1.2 existen varios tipos de pila de combustible, sin embargo en esta investigación solo se utilizará un tipo de pila que sea capaz de satisfacer todas las necesidades del ciclo que se propone en esta tesis y que más adelante se describirá a detalle el porqué de su elección.

1.3.1 PILAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS.

Las AFC emplean usualmente hidróxido potásico (KOH) en disolución acuosa como electrolito, en concentraciones del 30 al 35 % en peso, y operan entre 60 y 100 °C. Tienen el inconveniente de que el electrolito reacciona con CO₂, que podría llegarle a través de impurezas en el O₂ o en le H₂, lo que no permite emplear directamente aire para aportar O₂ ni el reformado de un combustible para aportar H₂.

Las celdas de energía alcalinas funcionan con hidrógeno comprimido y oxígeno. Su eficacia es aproximadamente del 70 %, la energía producida por esta celda se extiende de 300 watts (W) a 5 kilowatts (KW).

Las reacciones anódica y catódica son las siguientes:



La principal razón para su limitado interés, radica en que las AFC no toleran ni siquiera bajas concentraciones de CO₂. Por encima de 50 ppm el CO₂ reacciona químicamente con el electrolito alcalino para obturar irreversiblemente el electrolito y los electrodos con los carbonatos sólidos formados en la reacción. Por consiguiente, y teniendo en cuenta su posible aplicación al automóvil, el hidrógeno

puro tendría que ser almacenado a bordo del vehículo, y el aire, prácticamente la única fuente para el O₂ requerido, tendría que ser purgado para eliminar el CO₂ mediante un limpiador químico. Un combustible carbonáceo como el metanol obtenido recién salido de un reformador, no podría ser usado.

El CO₂ forma carbonatos que bloquean la buena conducción del electrolito y los poros de los electrodos mediante la siguiente reacción.



Existen básicamente dos tipos de pilas de combustible alcalinas, que se diferencian por tener el electrolito fijo o circulante.

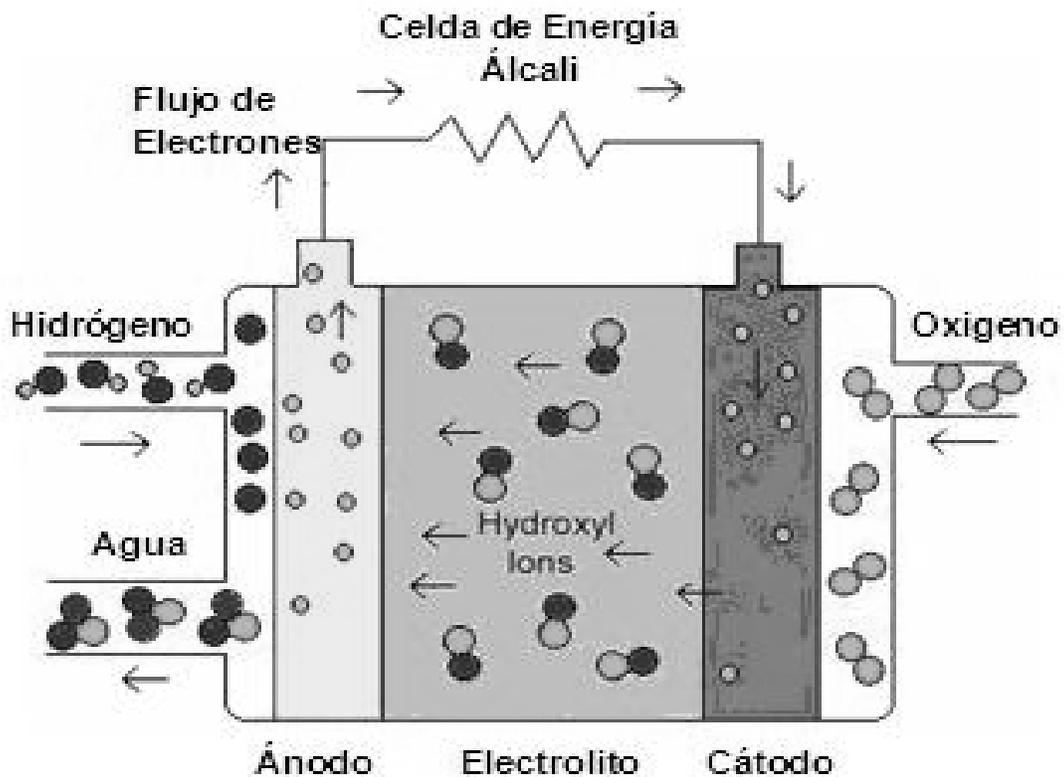


Figura 1.4 AFC con electrolito fijo.

Una ventaja de la AFC con electrolito circulante comparada con la de electrolito fijo, especialmente para aplicaciones en el automóvil, es que el electrolito puede ser utilizado como un medio limpiador. Las impurezas acumuladas, como los carbonatos, pueden ser eliminadas. Por tanto, la eliminación completa del CO_2 proveniente del aire no es necesaria con un electrolito circulante. Además, el electrolito circulante elimina de forma más efectiva el calor, y el agua producida en el ánodo. Sin embargo, esto representa un problema porque parte de la corriente es cortocircuitada por el electrolito circulante. Un ejemplo de este tipo son las pilas por Zevco en Bélgica.

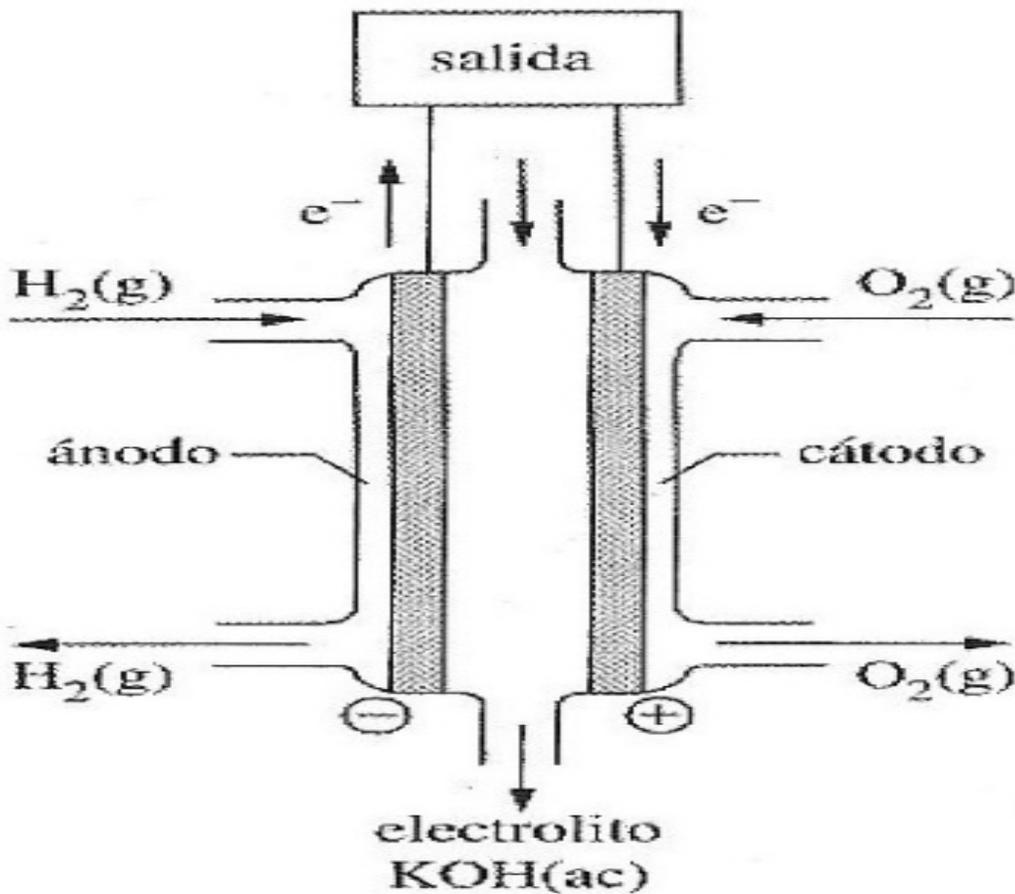


Figura 1.5 AFC con electrolito circulante.

Aplicaciones.

Las principales aplicaciones de las AFC son en el espacio (donde se vienen empleando ampliamente por su alto rendimiento y por la disponibilidad de H₂ y O₂ puros) y en una mucha menor medida en la automoción, donde han sido reemplazadas rápidamente por las pilas de polímero sólido.

1.3.2 PILAS DE POLÍMEROS DE SÓLIDOS.

Las PEMFC utilizan un electrolito formado por una red de polímero que está unida a grupos funcionales capaces de intercambiar cationes o aniones, en general el electrolito es un ácido con un grupo sulfónico incorporado en la matriz, que es capaz de transportar iones H⁺, mientras que el anión es inmovilizado por la estructura del polímero. Por lo tanto en estas celdas ocurren las mismas reacciones que en las celdas de electrolito ácido.



Las celdas de combustible de membrana de electrolito polimérico tienen la ventaja de que son más simples y compactas que otros tipos de celdas, además no necesitan reservas de electrolito ni recirculación. La temperatura de operación oscila en un intervalo de 60 a 130°C.

En la figura 1.6 se representa un esquema del funcionamiento de una celda de polímero sólido.

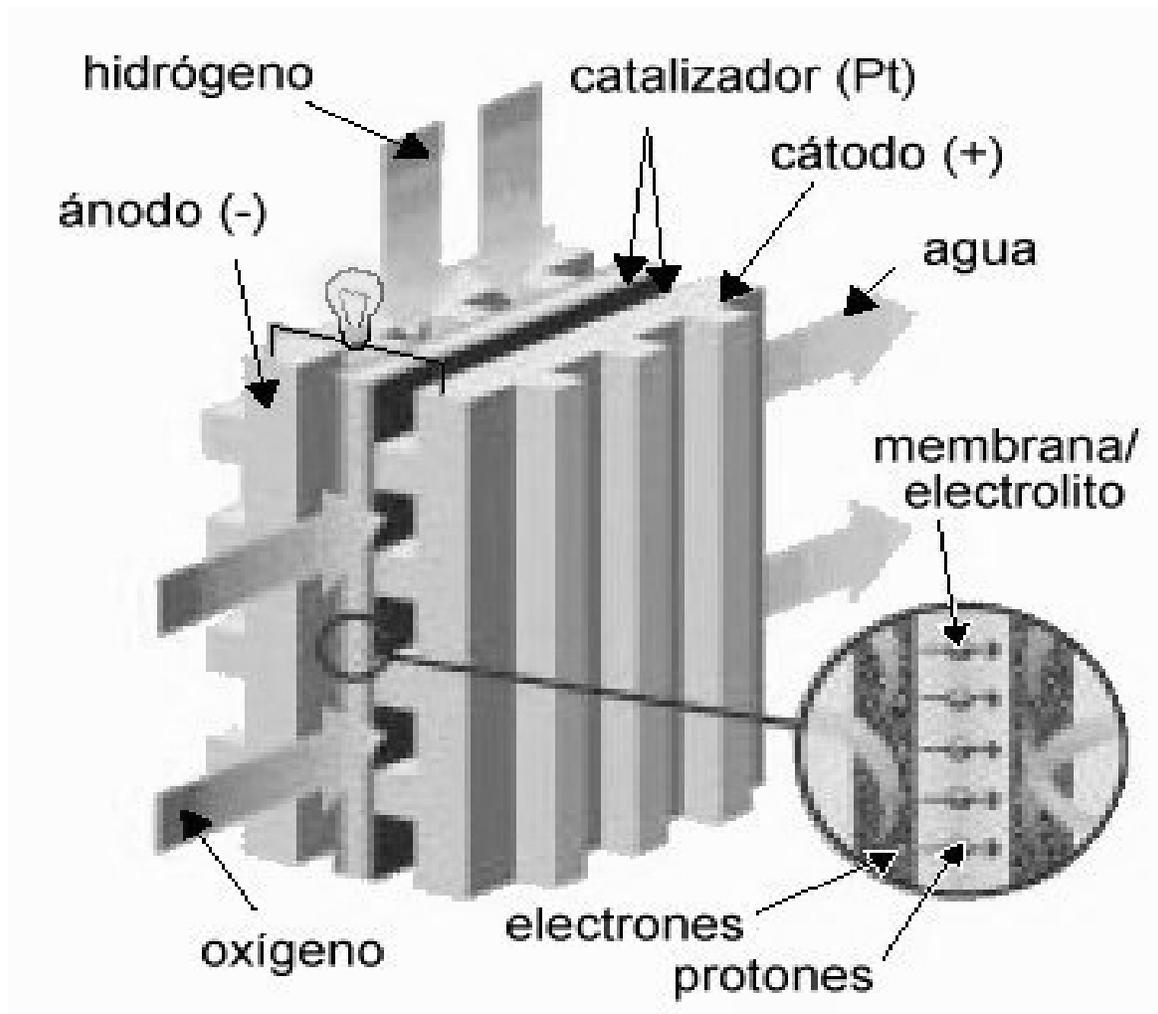


Figura 1.6 Esquema de una PEMFC.

Aplicaciones.

Las aplicaciones de las PEMFC son diversas, aunque destacan principalmente su uso en los automóviles. Prácticamente la totalidad de los prototipos de automóviles que funcionan con celdas de combustible utilizan esta tecnología. Además empieza a ganar terreno su uso en el ámbito residencial y doméstico para la producción de electricidad y agua caliente.

La principal productora de PEMFC en el mundo es la compañía canadiense Ballard Power Systems, aunque existen muchas más empresas dedicadas a esta tecnología.

1.3.3 PILAS DE COMBUSTIÓN DIRECTA DE METANOL.

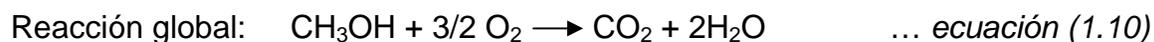
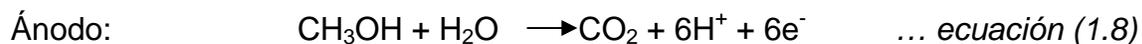
Como su propio nombre lo indica, el metanol es usado directamente como combustible en este tipo de pila. En las DMFC, como en las que usan hidrógeno, el oxígeno del aire actúa como oxidante. Sin embargo, no hay una oxidación del hidrógeno. El metanol líquido es el combustible que se oxida directamente en el ánodo.

Esta tecnología se desarrolla paralelamente a la de las PEMFC puesto que principalmente su uso se sitúa en el campo de la automoción. La tecnología de las DMFC, única de las pilas de baja temperatura que no utilizan hidrógeno, es todavía relativamente nueva comparada con la tecnología de las PEMFC, con muchos problemas todavía pendientes de solucionarse.

Para lograr una alta corriente, la cantidad de platino usado como catalizador es todavía muchísimo mayor que la usada para obtener la misma cantidad en las pilas PEMFC. Además, un importante problema añadido es que el metanol atraviesa la membrana desde el ánodo hasta el cátodo disminuyendo el funcionamiento del cátodo y aumentando el consumo de combustible.

Por otra parte, un sistema DMFC para automóviles no requiere un voluminoso y pesado depósito como en el caso del hidrógeno, ni de un subsistema de reformado del combustible. Esta ventaja, en términos de simplicidad y coste, significan que las DMFC presentan una atractiva alternativa a los sistemas de hidrógeno o de combustibles reformados.

Las reacciones en ánodo y cátodo son:



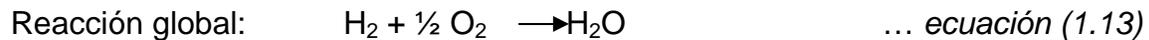
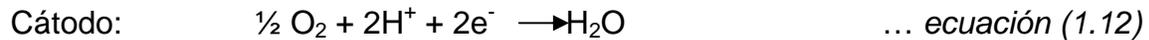
Aplicaciones.

Aunque la principal aplicación de esta tecnología es en el transporte, su uso para generar energía portátil gana terreno. Recientemente científicos de Motorola y del Los Alamos National Laboratory (LANL) en EEUU, han comunicado haber hecho grandes progresos en el desarrollo de una miniaturizada DMFC que podría reemplazar un día a las tradicionales baterías de los móviles, videocámaras... Motorola pone como ejemplo, que mediante el empleo de este tipo de minipila en un móvil, un pequeño cartucho de metanol podría alimentar al móvil durante más de un mes.

1.3.4 PILAS DE ÁCIDO FOSFÓRICO.

Como electrolitos, los ácidos tienen la ventaja de que no reaccionan con el dióxido de carbono, y por tanto se pueden utilizar con combustibles que contengan hasta un 30 % de CO_2 disminuyendo el coste de purificación del hidrógeno y del aire, ya que sólo será necesario para evitar el envenenamiento del ánodo por monóxido de carbono o compuestos de azufre.

Las reacciones electroquímicas que se dan en las AFC son:



De entre los ácidos utilizados como electrolitos el más habitual es el ácido fosfórico (H_3PO_4) por presentar características apropiadas de estabilidad, conductividad iónica y baja conductividad eléctrica a alta temperatura. La concentración del ácido fosfórico suele estar entre el 85 y el 98 %.

La temperatura de operación de la celda suele oscilar entre los 150 y los 220 °C. Este es un nivel interesante para algunas aplicaciones de cogeneración, y también aprovechable mediante máquinas de absorción para producir frío.

Este tipo de celdas tienen una eficiencia del 40 a 80 %, tienen la capacidad de producir energía hasta de 200 KW, y han probado algunas de hasta 11 MW. Para su correcto funcionamiento son necesarios unos electrodo-catalizadores a base de platino, ya que sus partes internas deben ser capaces de resistir el ácido corrosivo.

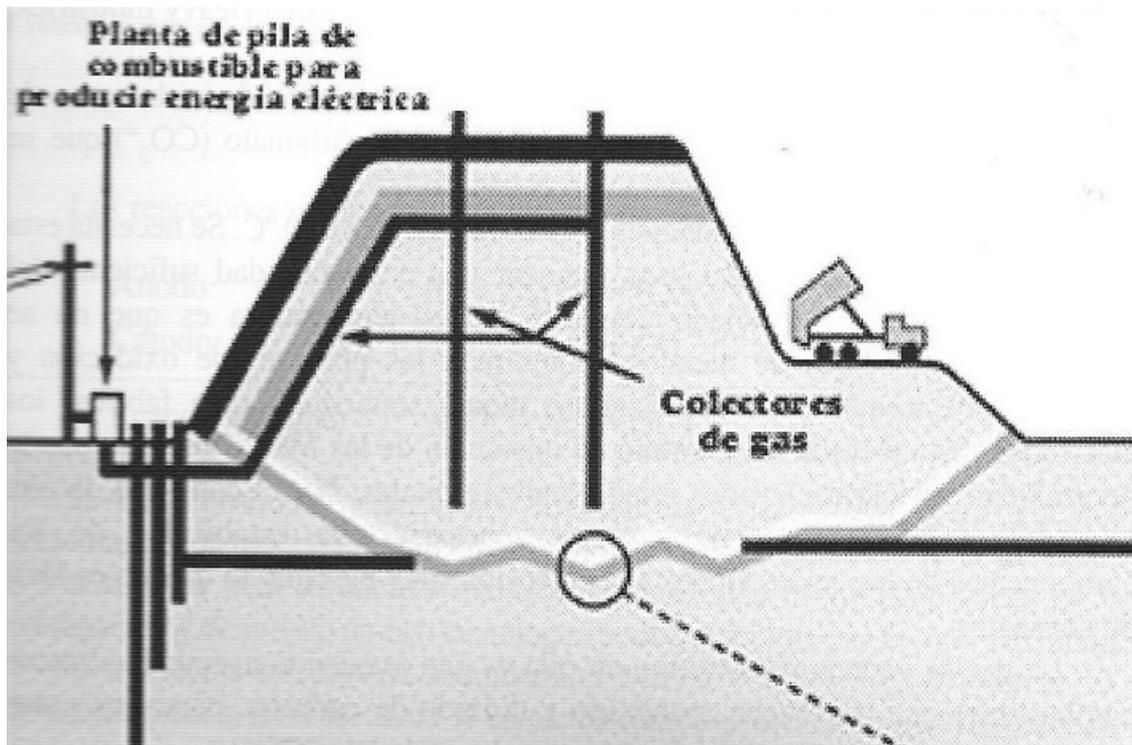


Figura 1.7 Uso de gases de vertedero en pilas de combustible.

Aplicaciones.

Las principales aplicaciones de esta tecnología son la generación de energía eléctrica en el lugar de consumo (on-site) y la producción masiva de electricidad. Es una tecnología que se encuentra desde hace tiempo en fase comercial, siendo la compañía americana International Fuel Cells (IFC), a través de su filial ONSI Corp, y la japonesa FUJI Electric Company los principales fabricantes de estos sistemas a escala mundial.

Otros usos de estos sistemas que están empezando a funcionar son lo que utilizan el metano producido en el tratamiento de las aguas residuales en las ciudades para producir energía eléctrica. Los gases de los tanques digestores, o "gases pobres" emitidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales están

compuestos por un 60 % de metano, un 40 % de dióxido de carbono y ppm de H_2S . Una vez eliminado el H_2S del gas residual, éste puede ser usado en un sistema de pila de combustible. Las emisiones de metano provenientes de ciertos tratamientos de aguas residuales contribuyen al calentamiento del planeta. Utilizando estas pilas podemos eliminar el metano y otros elementos secundarios de contaminación al mismo tiempo que estamos generando electricidad.

También el tratamiento de los residuos sólidos urbanos mediante su acumulación en vertederos, genera gases, denominados gases de vertedero, con una gran parte de su composición formada por CH_4 , que pueden ser utilizados en estos sistemas para producir también energía eléctrica. Este uso cada vez es más estudiado debido a la gran cantidad de residuos que genera la sociedad actual, y a la gran cantidad de enormes vertederos que existen por todo el mundo. En la siguiente figura se representa de manera esquemática el uso de los gases de vertedero es una planta de producción de energía eléctrica basada en pilas de combustible.

1.3.5 PILAS DE CARBONATOS FUNDIDOS.

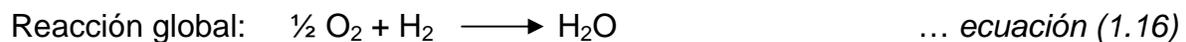
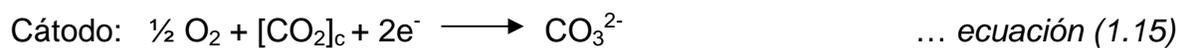
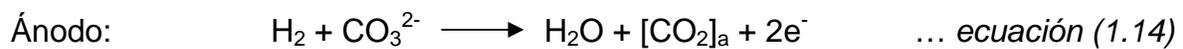
Las MCFC operan con un electrolito fundido, mezcla de carbonatos de metales alcalinos. El transporte lo realizan los iones carbonato (CO_3^-) que se consumen en el ánodo y se regeneran en el cátodo.

La temperatura de funcionamiento es de unos 600 a 650 °C. Se necesita esta temperatura de operación alta para alcanzar una conductividad suficiente del electrolito. Un efecto asociado con esta mayor temperatura es que no se requieren catalizadores de metales nobles para los procesos de oxidación y reducción electroquímicos, empleándose níquel sinterizado para fabricar los electrodos. Esta elevada temperatura de funcionamiento hace necesaria una estabilidad de los

componentes de las celdas frente a la corrosión muy elevada, lo que no es fácil de conseguir.

La mayor ventaja de este tipo de pila es que pueden consumir fácilmente combustibles que contengan monóxido y dióxido de carbono, como los gases que se obtienen por reformado de gas natural e incluso carbón.

Las reacciones en ánodo y cátodo son las siguientes:



Los rangos de eficacia son del 60 al 80 %, increíblemente se han construido y ensayado unidades de hasta 2 MW, pero aún hay problemas pendientes de resolver como la corrosión acelerada. Se estima que faltan de 5 a 10 años para su comercialización, aunque dada la inversión actual en la investigación y desarrollo de esta tecnología, podría reducirse este tiempo a la mitad.

La eficiencia eléctrica de una planta de MCFC ó SOFC está en torno al 50-55 % alcanzando, a veces, un 65% en ciclos combinados, mayor que la alcanzada en los sistemas PAFC y PEMFC que oscila alrededor del 40 %.

En la figura 1.8 se representa claramente a una pila de combustible de carbonatos fundidos (MCFC).

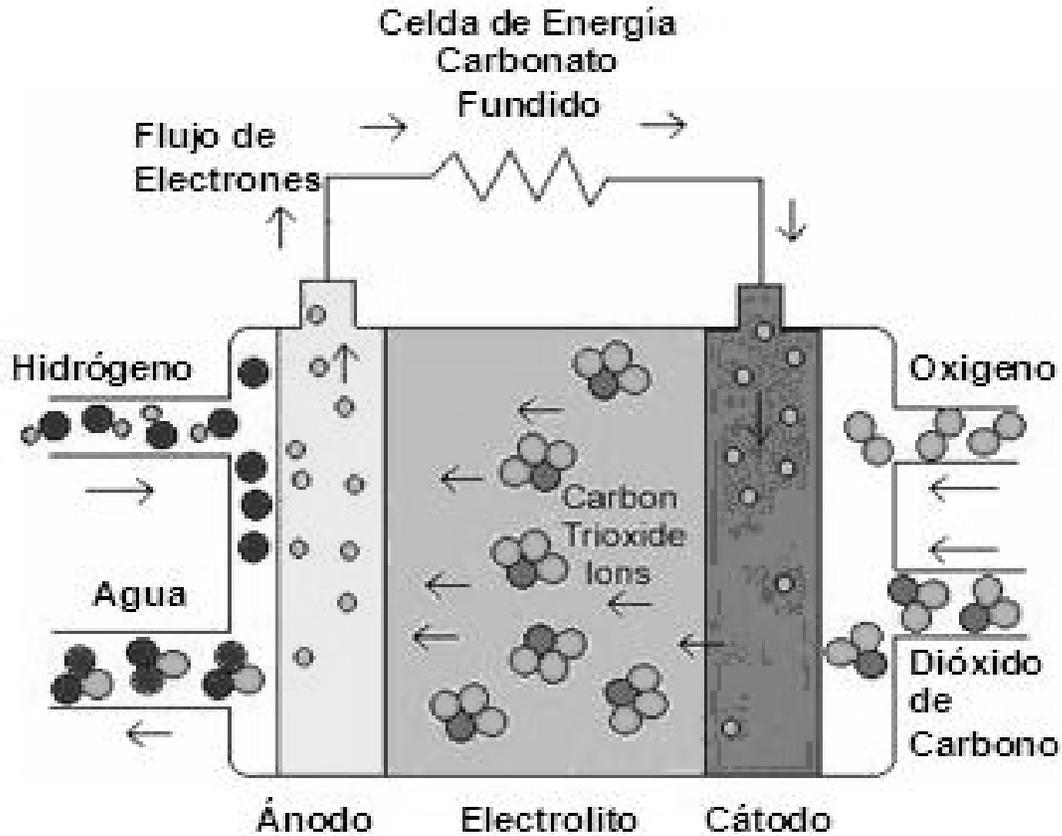


Figura 1.8 Esquema de una MCFC.

Aplicaciones.

Las principales aplicaciones se prevén en el campo de la cogeneración y la generación o producción centralizada de electricidad.

1.3.6 PILAS DE ÓXIDOS SÓLIDOS.

Las SOFC utilizan como electrolito óxidos sólidos, es decir, cerámicas impermeables que tienen la capacidad de conducir carga por el transporte de iones de oxígeno (O^-) a través de una red cristalina a temperatura suficientemente

alta (de 800 a 1000 °C, aunque hay intentos de desarrollar sistemas que operen a 700 °C).

El material más usual es el óxido de circonio (ZrO₂) estabilizado en su forma cúbica con pequeñas cantidades de óxidos de calcio (CaO), ytrio (Y₂O₃), yterbio (Yb₂O₃) o una mezcla de Tierras Raras pesadas. Su atractivo se centra en su naturaleza de estado sólido, su potencial para reformar combustibles gaseosos en la pila de combustible y su alta temperatura de operación (que puede proporcionar calor de alta calidad para la producción adicional de energía eléctrica u otros usos). El electrolito sólido elimina los problemas de su contaminación y permite diseños que utilizan el electrolito como parte estructural.

Las reacciones que tienen lugar en una SOFC son las siguientes:



Existen dos tipos de pilas de combustible de óxidos sólidos. La pila plana y la tubular. La pila plana denominada Planar Solid Oxide Fuel Cell (PSOFC) tiene una configuración similar a las demás pilas ya mencionadas y no presenta sustanciales diferencias respecto de las mismas. Sin embargo la configuración tubular es muy distinta a todo lo visto hasta ahora. En la figura 1.9 se representa un esquema de la configuración de una pila tubular, también denominada *Tubular Solid Oxide Fuel Cell* (TSOFC).

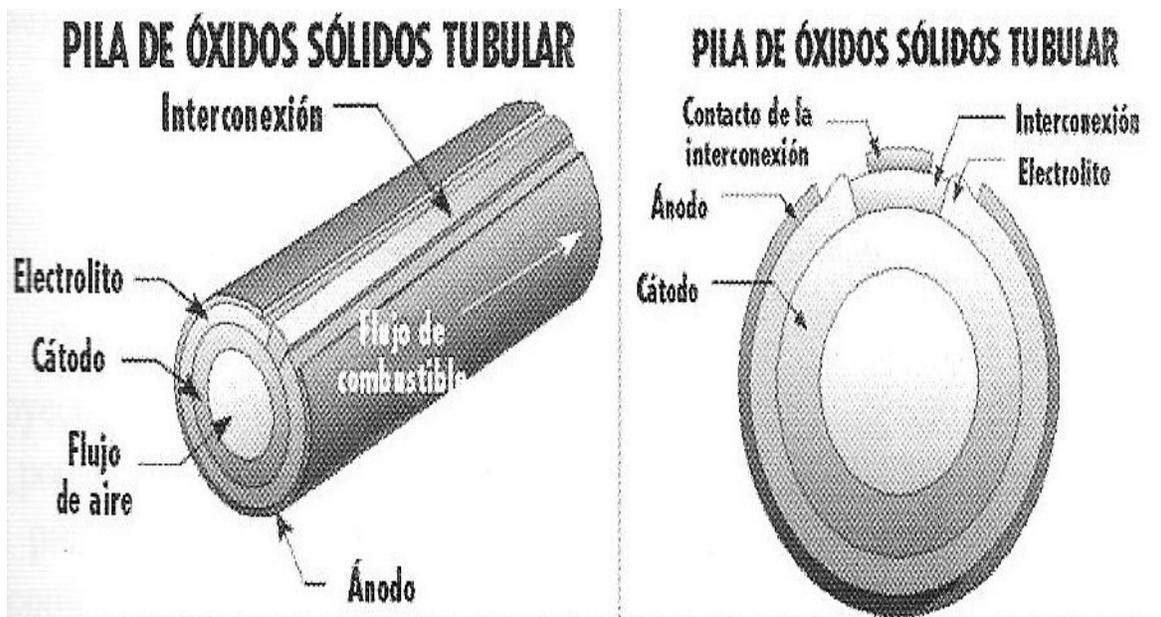


Figura 1.9 Esquema de una TSOFC.

La conexión entre celdas es distinta de la habitual. En la figura 1.10 se aprecia interconexión entre las celdas tubulares y el recorrido del combustible y el oxidante respectivamente.

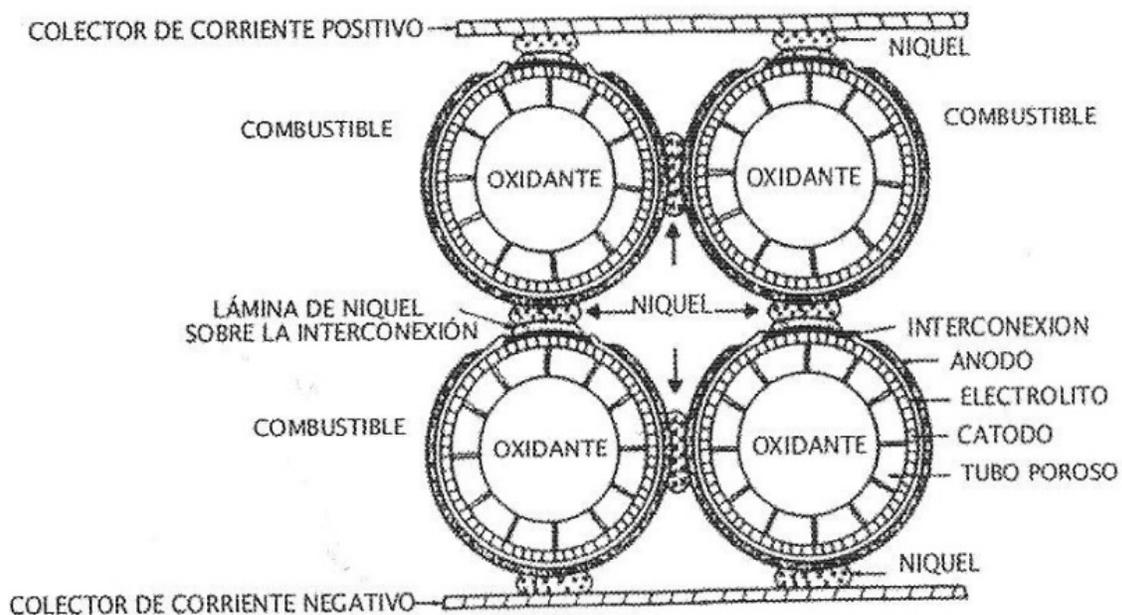


Figura 1.10 Esquema de la interconexión de celdas en una TSOFC.

La figura 1.11 muestra el aspecto real que presenta el ensamblaje de dichas pilas.

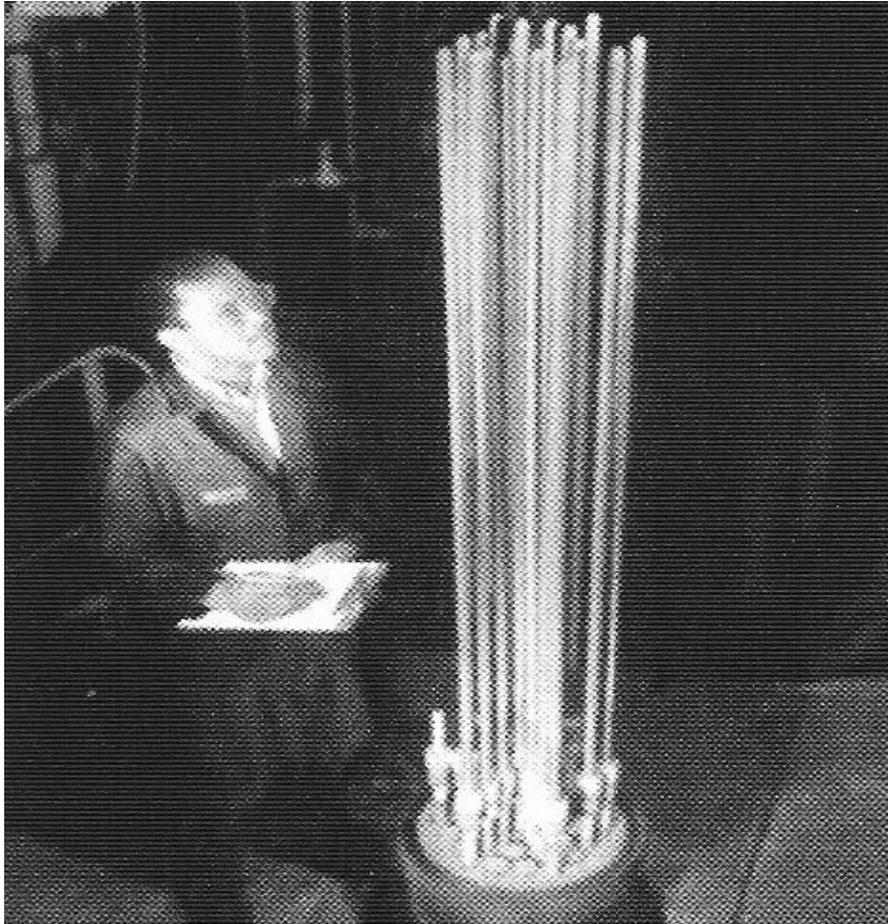


Figura 1.11 Aspecto real de un ensamblaje de celdas TSOFC.

1.4 COMPONENTES DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE H_2/O_2 .

El funcionamiento de una celda de combustible consiste básicamente en la oxidación del hidrógeno en agua, generando energía eléctrica y calor directamente, sin pasar por generadores u otros artefactos.

Toda celda de combustible está compuesta por un ánodo, un cátodo y electrolitos. Sin embargo, siendo la oxidación del hidrógeno igual para todos los tipos de celdas de combustible, los materiales usados en éstas son muy variados.

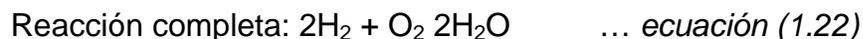
La reacción producida da lugar a la formación de electricidad, calor y agua. Esto se logra alimentando el hidrógeno en el ánodo de la celda y el oxígeno en el cátodo, los cuales están separados por una membrana electrolítica. La reacción se produce dentro de la celda misma. La producción de agua toma lugar en distintas partes de la celda dependiendo del electrolito utilizado.

El hidrógeno fluye hacia el ánodo de la celda, donde una cubierta de platino ayuda a quitar los electrones a los átomos de hidrógeno dejándolo ionizado, o sea, en forma de protones (H^+). La membrana electrolítica permite el paso solo de los protones hacia el cátodo.

Debido a que los electrones no pueden pasar a través de la membrana, se ven forzados a salir del ánodo por un circuito externo como forma de corriente eléctrica, ésta es la corriente eléctrica que se utiliza para hacer funcionar los artefactos.

Luego, a medida que el cátodo deja fluir a través de él al oxígeno, éste se combina con los protones y los electrones anteriormente citados para formar agua. Como esta reacción naturalmente está desplazada hacia la formación de agua, cuando se produce, se libera energía en forma de calor. Esta es una reacción positiva y por lo tanto exotérmica.

El proceso químico que se lleva a cabo es el siguiente:



Esta operación se puede hacer de manera continua si los suministros de componentes se hacen en forma constante y a un régimen de flujo estable.

En este tipo de operación, al hacerse en forma isotérmica, las limitaciones termodinámicas para el rendimiento no existen (Ciclo de Carnot).

En el ciclo del hidrógeno solar la electricidad producida por los módulos solares opera un equipo de electrólisis que divide el agua en sus dos componentes elementales, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). El oxígeno se libera al aire y el hidrógeno se bombea a los tanques, donde es almacenado en el lugar de producción.

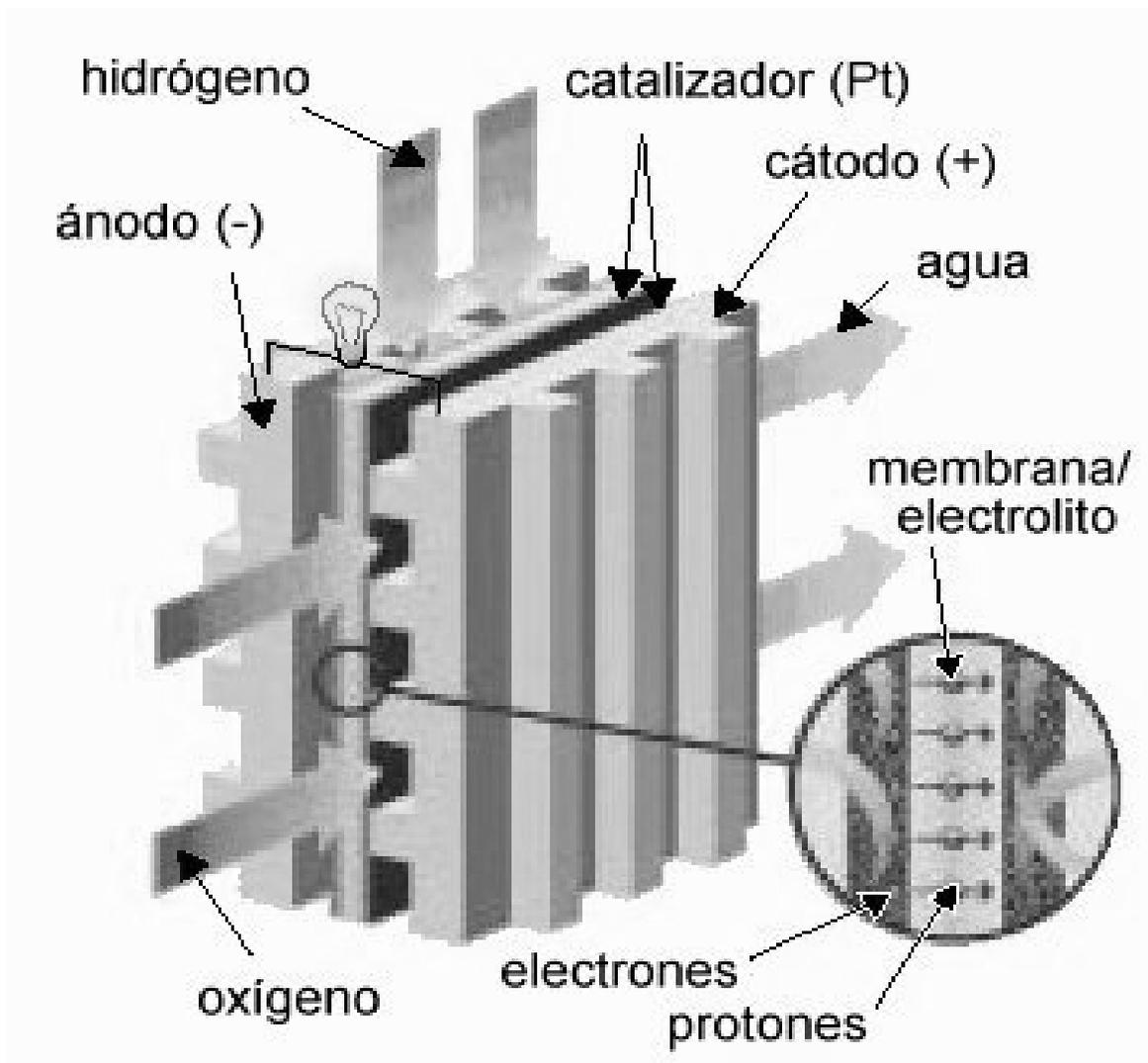


Figura 1.12 Pila de combustible (PEMFC).

Las partes de una celda de combustible (PEMFC) son las siguientes:

1. Placas bipolares.
2. Capa difusora.
3. Electrodo.
4. Electrolitos.

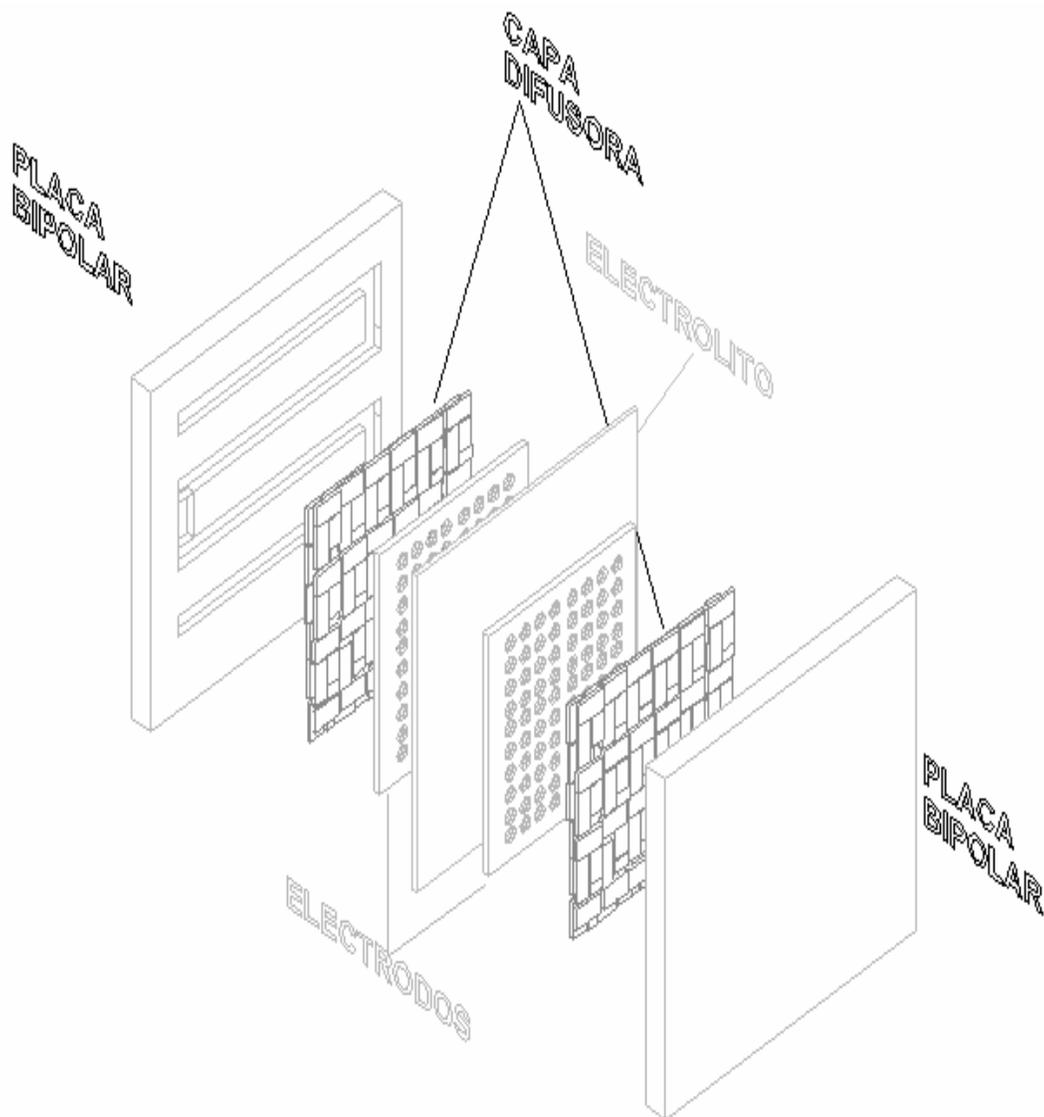


Figura 1.13 Partes de una célula de combustible (PEMFC).

PARTES	MATERIALES
Placas bipolares	Grafito, materiales compuestos de grafito, acero inoxidable, titanio.
Capa difusora de gases	Teflón, negro de humo, tela de carbón y papel carbón.
Electrodos	Pt o aleaciones de Pt soportados en carbón; Impregnados de polímero Nafión y/o glicerol.
Electrolito	Polímero intercambiador de protones.

Tabla 1.3 Partes y materiales de la célula de combustible (PEMFC).



Figura 1.14 El apilamiento de células de combustible forman la pila.

1.4.1 PLACAS BIPOLARES.

Una placa bipolar actúa como ánodo y cátodo a la vez. Ésta debe permitir el fácil flujo de los electrones por lo que su resistividad debe ser baja. Las funciones de una placa bipolar son:

- Permitir el flujo de los gases para que sean distribuidos en la capa difusora, coleccionar la corriente eléctrica,
- Interconectar eléctricamente las celdas adyacentes a una pila, remover el exceso de agua producida por la reacción electroquímica en el cátodo,
- Permitir la alimentación del líquido en el ánodo

Las placas bipolares están hechas de grafito de alta densidad, metales (acero inoxidable y titanio) con o sin revestimientos en la superficie y materiales compuestos de carbón.

1.4.2 CAPA DIFUSORA DE GASES.

La función de la capa difusora es la de difundir los gases uniformemente a la capa catalizadora, además de alimentar y remover de una manera efectiva el agua (líquido y vapor).

Ésta se elabora a partir de tela de carbón poroso hidrofobizado con PTFE. Una mezcla de negro de humo y teflón se deposita sobre la tela de carbón y se sinteriza alrededor de 450 °C para obtener una capa de carbón con un espesor entre 100 y 300 Vm.

1.4.3 MEMBRANA ELECTROLÍTICA.

La Función de la membrana electrolítica o membrana de intercambio protónico es la de transportar los iones H^+ y separar el combustible (Hidrogeno) del gas oxidante (O_2 o aire). Estas membranas tienen un espesor entre 50 y 175 μm . Como su estructura molecular es a base de teflón, presentan una gran estabilidad química en medios reductores y oxidantes.

1.4.4 CAPA CATALIZADORA.

La capa catalizadora consiste en un material conductor donde se encuentra soportado un catalizador. En las celdas de combustible de polímero de intercambiador de protones, el material de soporte más utilizado es el carbón o negro de humo, y como catalizador el Pt. En ella se lleva a cabo la reacción de oxidación del Hidrogeno (ROH) y la reacción de reducción del Oxigeno (RRO). La capa tiene un espesor entre 5 y 50 μm , y es colocada entre la capa difusora y la membrana electrolítica.

La estructura de la capa juega un papel importante en las PEMFC. La estructura de la capa catalítica en las celdas de combustible consiste en:

- El camino que sigue el gas para llegar al sitio de catálisis;
- El camino eléctrico que siguen los electrones para salir o entrar en el electrodo;
- El camino iónico que necesitan los protones para entrar a la membrana.

La capa catalítica tiene 3 interfaces de sitio de reacción: gas/catalizador; electrolito/catalizador; carbón/catalizador. Las partículas de catalizador que cumplan con estas 3 interfaces son las que llevarán a cabo las reacciones

electroquímicas y por lo tanto al conjunto de estas partículas se le conocerá como área activa del catalizador. Esto se puede observar en la figura 1.15.

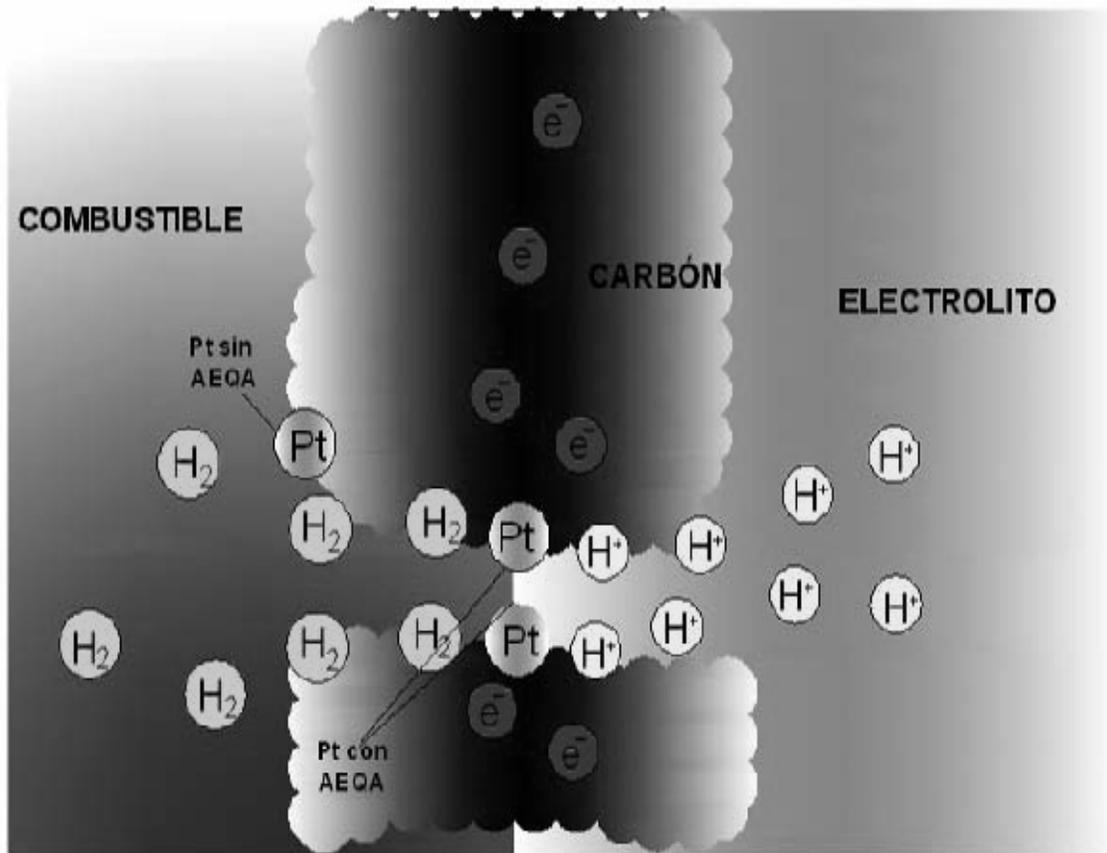


Figura 1.15 Interfaces Electroquímicas.

1.5 APLICACIONES DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.

La tecnología de la pila de combustible y el proceso de la fuente de hidrógeno dependen de la aplicación y de las opciones disponibles. Los mayores constructores de autos y colectivos han estado probando la tecnología, trabajando con investigadores para determinar la forma mejor y más barata de almacenamiento del hidrógeno. Los avances en la nanotecnología permiten la incorporación de una pequeña celda de combustible con fines portátiles (celulares y computadoras laptop, por ejemplo). Una generación más grande de energía también ha sido investigada con mini centrales eléctricas que

optimizan la energía de las reacciones exotérmicas (que liberan calor) y endotérmicas (que necesitan calor) además de un control particular del agua para proveer electricidad, calefacción y agua caliente. A partir de todas estas opciones, un debate internacional se ha empezado para conversar sobre el apoyo de esta tecnología por varias iniciativas privadas, gubernamentales y académicas.

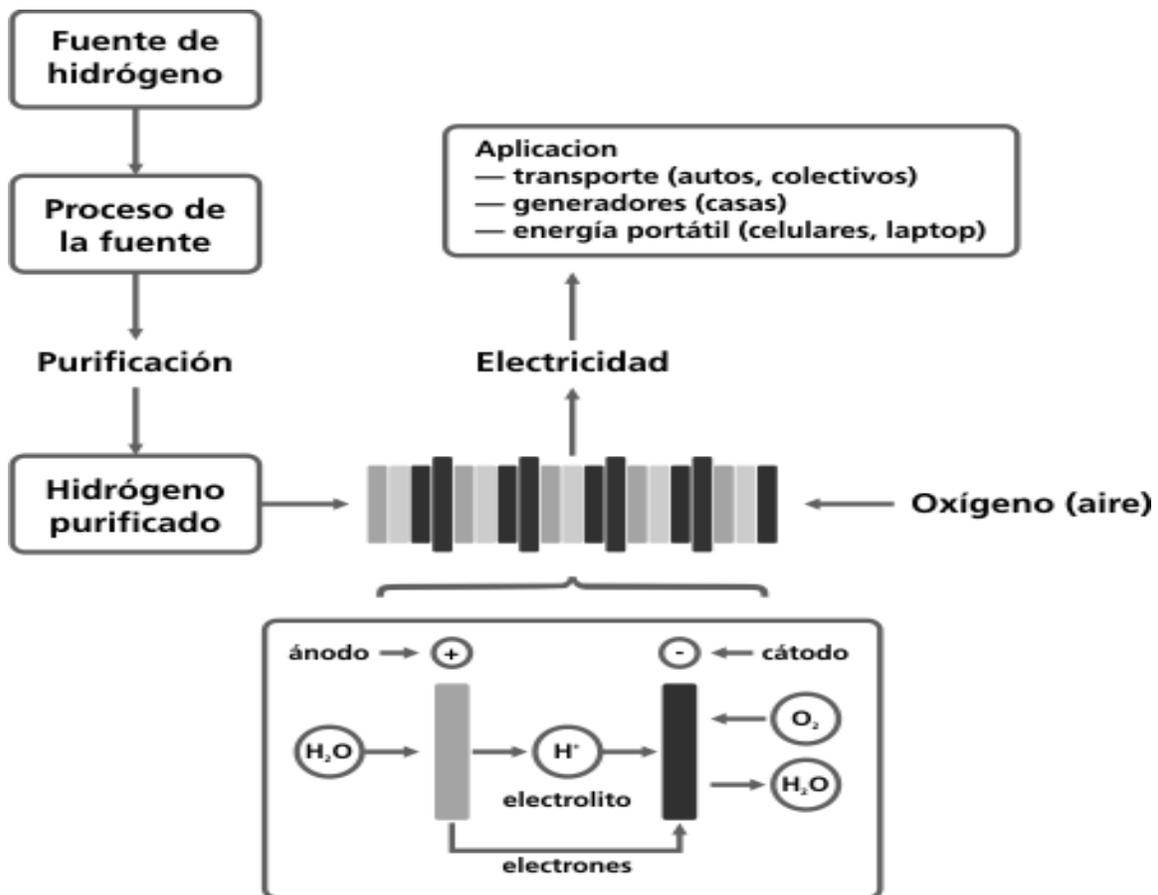
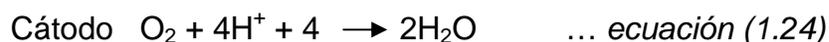


Figura 1.16 Proceso de transformación de energía que involucra a la pila de combustible.

Una celda tiene dos electrodos (el ánodo y el cátodo) separados por un electrolito:



El protón (H^+) viaja del ánodo al cátodo por el electrolito, mientras los electrones viajan en un circuito eléctrico exterior (con un voltaje de 0.8V). La recombinación en el cátodo con el oxígeno del aire genera agua (H_2O), así la electricidad puede ser utilizada entre los electrodos para diversas aplicaciones. La combinación en serie de muchas celdas permite la generación de un voltaje mayor.

La utilización del hidrógeno como vector energético está cobrando una importancia creciente en todo el mundo. La posibilidad de su producción vía electrólisis a través de fuentes renovables de energía ha impulsado una enorme cantidad de esfuerzo de investigación y desarrollo con financiamiento público y privado, sobre todo en el mundo industrializado (debido a las ventajas de limpieza y reducida polución) y en menor medida en países en vías de desarrollo como Argentina y Brasil. Por otro lado, existe una importante demanda de sistemas energéticos limpios para sitios aislados en zonas rurales de la Patagonia Austral. Para sistemas diesel-eólico, dada la naturaleza intermitente y aleatoria del viento, tradicionalmente se ha resuelto la necesidad de almacenamiento de energía eléctrica exclusivamente con baterías, y el respaldo o backup con un equipo generador tradicional diesel o naftero. Sin embargo, los costos del sistema y los problemas técnicos limitan el tamaño y capacidad de sistemas viables a potencias de menos de 10KW aproximadamente. Si bien se han ensayado múltiples alternativas para combinación eólica-diesel ó diesel-batería en sistemas aislados hasta 4MW, el almacenamiento práctico vía baterías dura sólo algunos minutos, hasta el recambio a equipos diesel tradicionales, con sus habituales problemas de suministro de combustible, ruido, contaminación del aire y emisiones de carbono.

Además, el costo de este tipo de sistemas es enorme dada la complejidad del control de frecuencia y tensión trifásicas en una red débil.

La combinación de almacenamiento de hidrógeno (H_2), con su producción vía electrolizador y reconversión a electricidad con celdas de combustible (Fuel Cells - FCs), es una de las tecnologías más prometedoras que han surgido en los últimos

años, con aplicabilidad en sistemas aislados. A esto se suma el abaratamiento y mayor confiabilidad de la electrónica de potencia asociada, para conversión de corriente continua a alterna de red. Si bien existen aún múltiples problemas técnicos, las FC han experimentado un avance significativo en la década del 90, con el compromiso de múltiples empresas (sobre todo automotrices) a nivel mundial que las ven como la próxima alternativa masiva al motor de combustión interna.

Utilización del hidrógeno en la industria petrolera-gasífera, en las siguientes aplicaciones:

- Combinación de hidrógeno con gas natural, para transporte, compresión y distribución a través de la infraestructura existente.
- Sistemas extractivos tipo gas-lift, en pozos petroleros sin extracción natural.
- Sistemas de recuperación secundaria, utilizando el hidrógeno para aumentar la presión del reservorio.

En la figura 1.17 se muestra el rango de potencia típico de cada celda, incluyendo las bioceldas de combustible capaces de funcionar utilizando metabolitos de seres vivos como combustible. Las celdas PEM pueden utilizar también metanol en lugar de H_2 como combustible en el ánodo y en ese caso se denominan celdas PEM de metanol directo (DMPEM).

Las celdas PEM alimentadas con H_2 tienen como nicho de aplicación principal, pero no único, la impulsión de vehículos. Por otra parte, las celdas de alta temperatura tienen como principal aplicación la generación de energía estacionaria y distribuida.

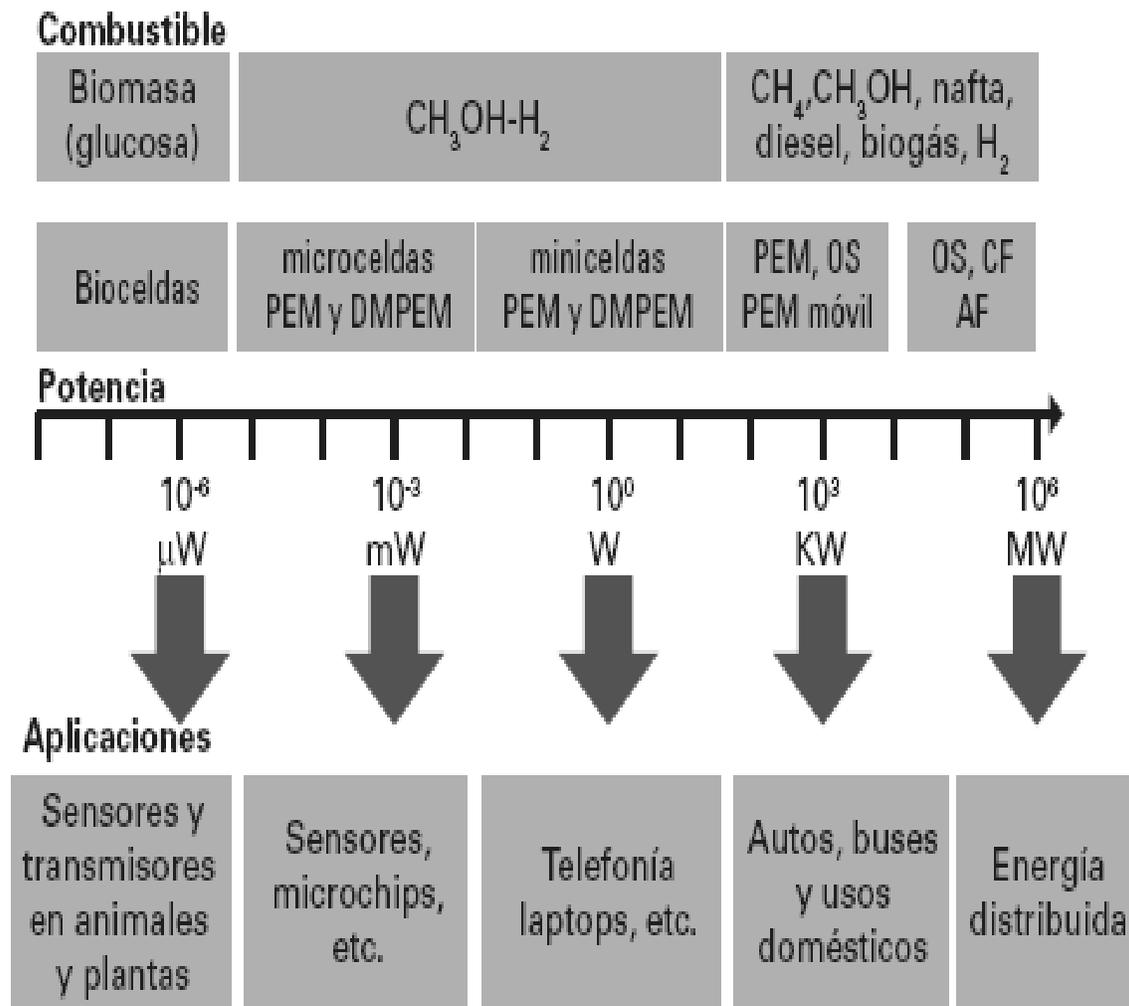


Figura 1.17 Potencia y posibles aplicaciones de los distintos tipos de celdas de combustible.

1.5.1 CELDAS PEM PARA USOS MÓVILES.

La figura 1.18 muestra un esquema de la anatomía de una celda de combustible PEM. El componente central de la celda es el conjunto membrana-electrodo, formado por la membrana conductora de protones (Nafion) sobre cuyas caras se depositan las capas de catalizadores (electrodos) anódicas y catódicas.

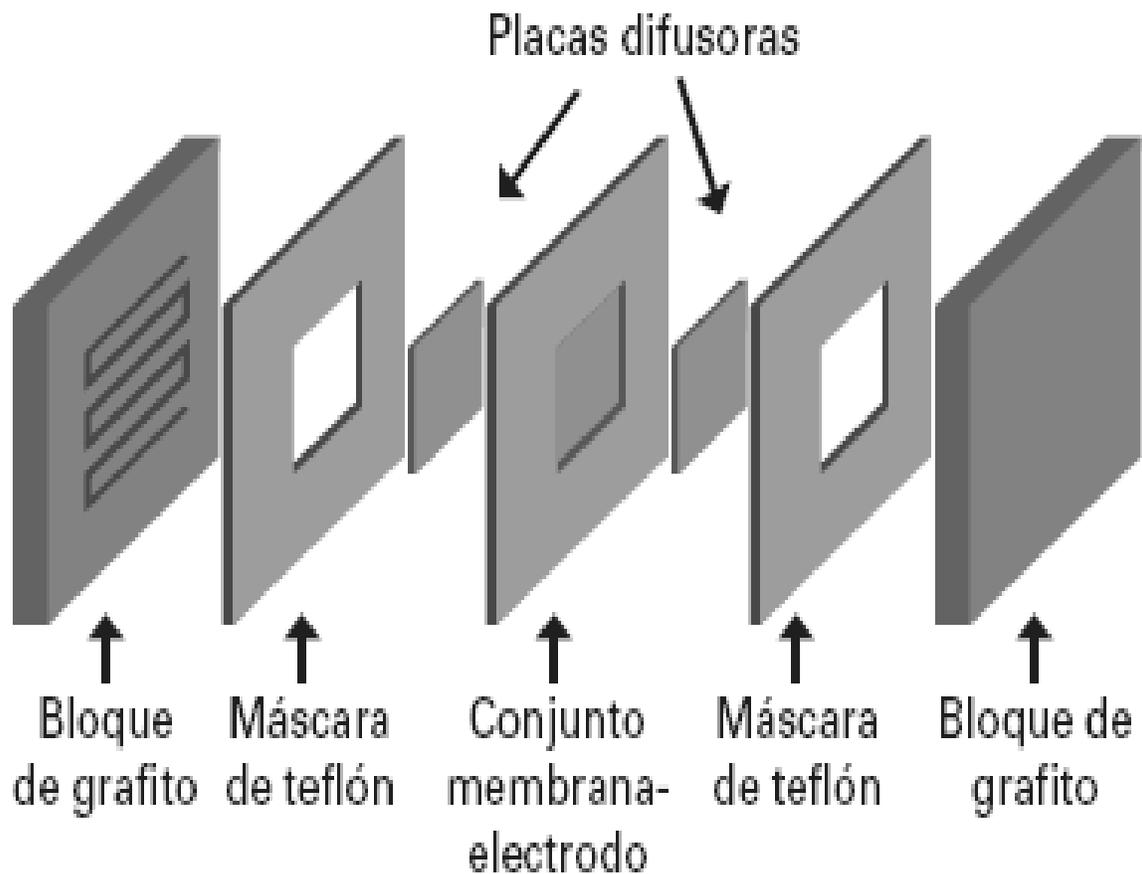


Figura 1.18 Anatomía de una celda de combustible PEMFC.

Este conjunto se encuentra entre dos capas difusoras de gases fabricadas de tela o lámina de grafito porosa que tiene por función distribuir homogéneamente el hidrógeno y el aire (oxígeno) sobre la superficie del catalizador. Las placas bipolares de grafito tienen a cada lado canales en forma de serpentina por donde se alimentan el hidrógeno y el oxígeno a cada electrodo. La hermeticidad del sistema se logra con sellos de teflón.

Este conjunto representa una mono-celda, es decir el componente unitario de la celda de combustible PEM, cuyo detalle se muestra en la figura 1.19.

Allí se pueden ver los catalizadores anódico y catódico formados por nano partículas de platino de 2 a 5 nm de tamaño sobre soporte de carbono, típicamente Vulcan XC-72, que consiste en micro-esferas de carbón con un área específica mayor de $200 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. La carga de platino en las primeras celdas era de 2 a 4 mg Pt/cm^2 , pero en la actualidad esto ha disminuido hasta valores de 0,1 mg Pt/cm^2 .

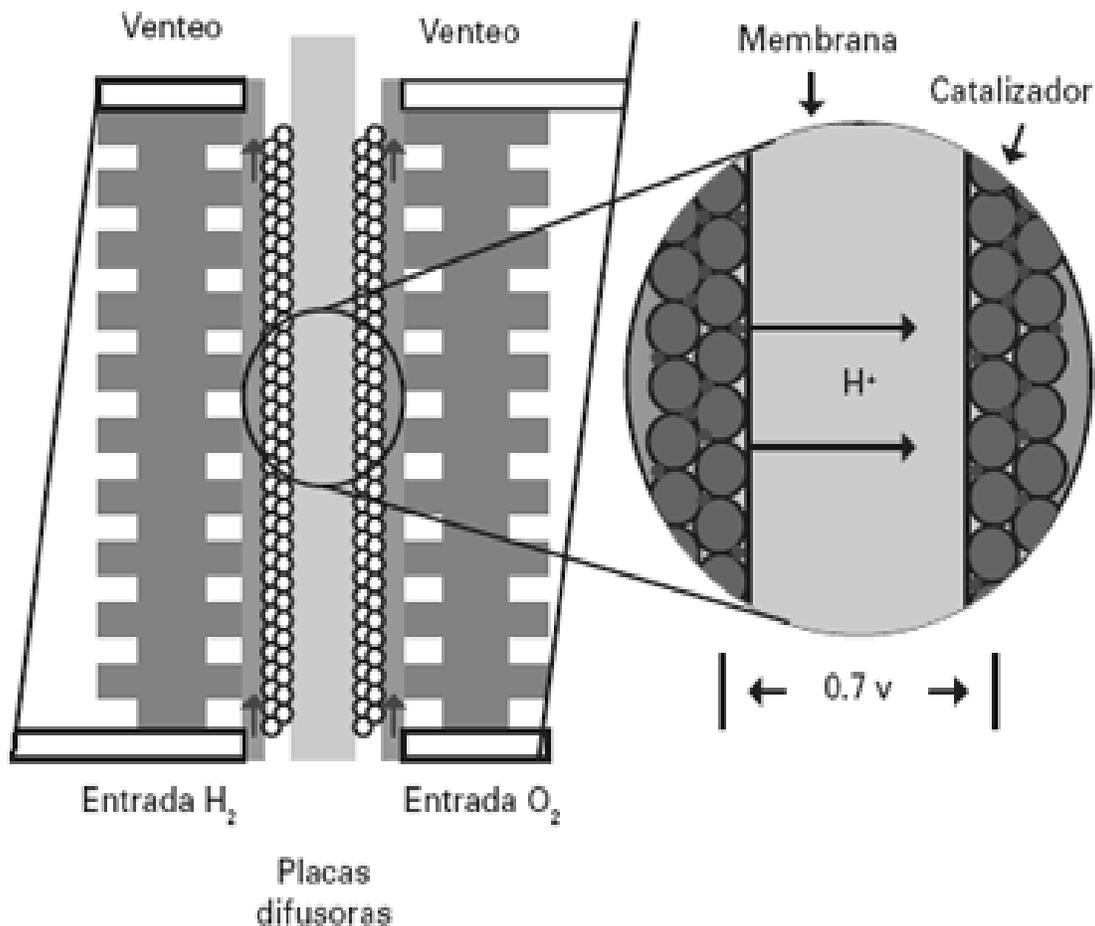


Figura 1.19 Esquema de una mono-celda PEM. La parte ampliada muestra las partículas de carbono (grises) y las partículas de platino (rojas) depositadas sobre ellas.

Cada mono-celda PEM en condiciones óptimas puede entregar una corriente de 600 mA/cm^2 a 0,7 V, de modo que para lograr la potencia y voltaje adecuada a

cada uso se apilan varias mono-capas formando un 'stack', como el mostrado en la figura 1.20.

El área de cada mono-celda determina la corriente máxima extraíble, mientras que el número de mono-celdas fija el voltaje del *stack*. Los vehículos eléctricos son alimentados por *stacks* de celdas PEM como los mostrados en la figura 1.20.

Casi todas las empresas fabricantes de automóviles tienen un prototipo de auto eléctrico impulsado con celdas PEM.

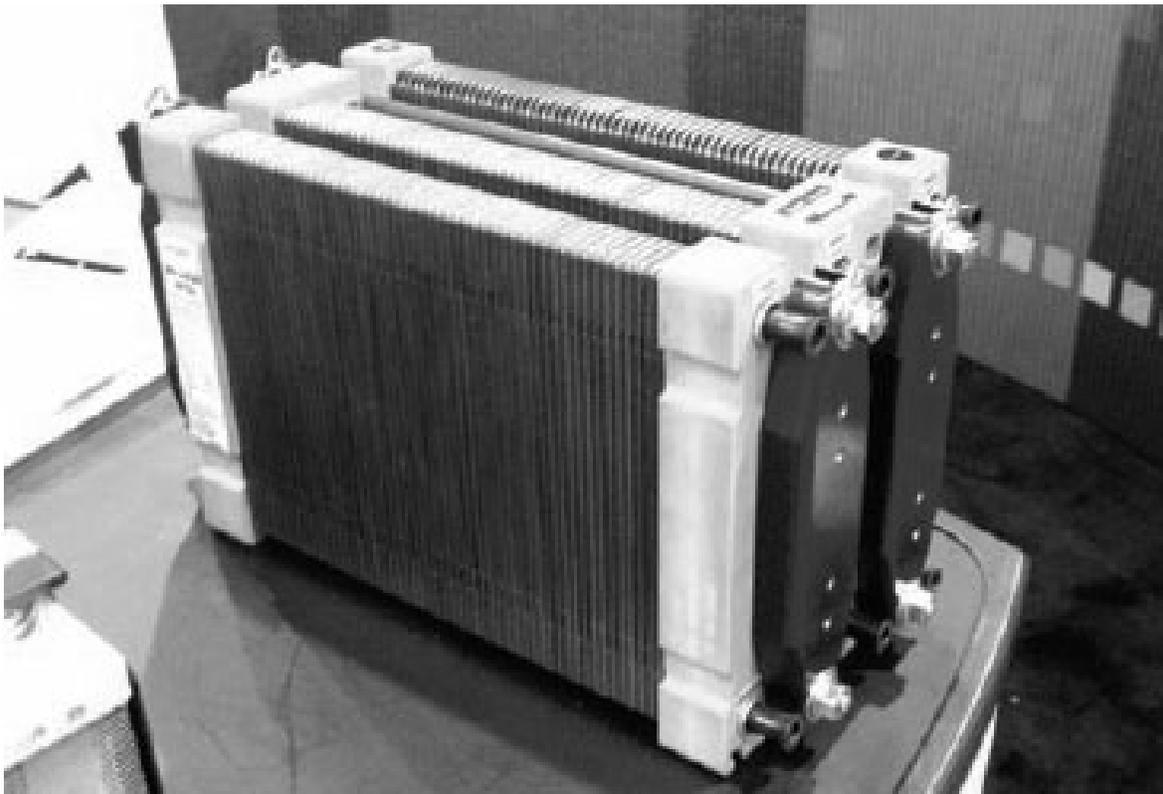


Figura 1.20 Stack de celda de combustible PEM.

En algunos modelos, como el Nekar 4 de Daimler Chrysler, se utilizan tanques de H₂ comprimido que alimentan dos *stacks* de 35 kW y tienen una autonomía de 450 km. Sin embargo, el uso de H₂ tiene el inconveniente de la recarga, ya que las

estaciones de servicio están preparadas para manejar combustibles líquidos. Por esta razón se piensa en utilizar combustibles líquidos, como el metanol, que puedan ser reformados a bordo del vehículo.

La planta motriz de un vehículo eléctrico se esquematiza en la figura 1.21, donde el proceso comienza en el reformador que convierte el metanol en una mezcla rica en H_2 que alimenta el ánodo de la celda de combustible y aire que alimenta el cátodo. La celda produce corriente eléctrica continua (DC) y agua. El agua es reciclada al reformador y la carga DC se transforma en alterna (AC) y alimenta los motores eléctricos ubicados en cada rueda del automóvil. El sistema de control es complejo, ya que debe proveer la cantidad de H_2 que necesita el vehículo según la potencia instantánea que desarrolle y además debe mantener el balance de agua dentro de la celda (no debe inundarse ni secarse la membrana de Nafion pues esto lleva a un deterioro de su conductividad eléctrica).

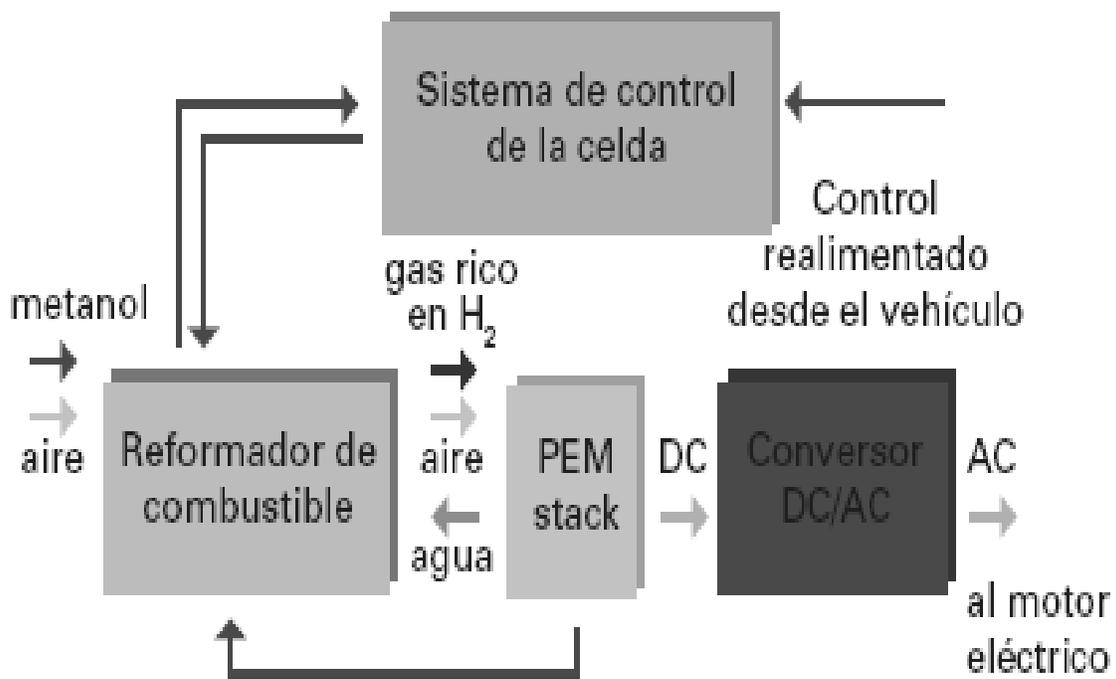


Figura 1.21 Planta de un vehículo eléctrico.

En la figura 1.22 se muestra un automóvil eléctrico, el Honda FCX, provisto con tanques de H₂ comprimido y celdas de combustible. En el caso de los buses, el H₂ se almacena comprimido en tanques que se ubican en el techo de este.



Figura 1.22 Auto eléctrico Honda (izq.), detalle de su planta motriz (centro) y bus eléctrico en Madrid.

1.5.2 CELDAS PEM DE METANOL DIRECTO PARA USOS PORTÁTILES.

En la década de los '90, investigadores en Los Alamos National Laboratories (Estados Unidos) mostraron que era posible oxidar directamente metanol (CH₃OH) en lugar de H₂ en una celda de combustible PEM.

Esto solo es posible con la presencia de rutenio (Ru) metálico en el catalizador anódico, pues evita que el CO, que es el producto final de la oxidación del metanol, envenene el catalizador de Pt. El mecanismo de la reacción anódica comprende la sucesiva desprotonación de metanol sobre el Pt hasta llegar a la etapa de CO adsorbido sobre Pt, mientras que el agua se adsorbe sobre los sitios contiguos de Ru con la liberación de H₂ y la formación de O adsorbido que reacciona con el CO según:



Este tipo de celdas está en plena etapa de desarrollo y ellas son especialmente atractivas para su uso como fuentes portátiles en potencias del orden del Watt. Teóricamente, su densidad de energía por peso o por tamaño es varias veces superior al de las baterías de Li-ion y Ni-hidruro, y podrían alimentar equipos electrónicos tales como teléfonos celulares, computadoras personales, reproductores de sonido y otros equipos, en reemplazo de las baterías recargables.

La ventaja adicional es que no habría tiempo de recarga, pues con un cartucho que contenga unos pocos cm³ de metanol se podría tener energía por varios días, y una vez agotado el metanol el recambio del cartucho insume solo unos pocos segundos.



Figura 1.23 Prototipo de minicelda DMPEM para telefonía celular y celda de 40 W para comunicaciones.

La figura 1.23 muestra un prototipo de minicelda PEM de metanol directo de Toshiba para teléfonos celulares y una celda de 40 W para su uso en comunicaciones.

1.5.3 CELDAS ESTACIONARIAS PARA GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

Las celdas de ácido fosfórico y las de alta temperatura (carbonato fundido óxido sólido) son las más apropiadas para generación distribuida, dado que no tienen requerimientos tan extremos en cuanto a la pureza del H_2 .

Las pilas de combustible de ácido fosfórico han alcanzado su madurez tecnológica y son las únicas que se encuentran disponibles comercialmente. La empresa United Technologies Corporation (UTC) produce celdas de 200 kW, conocidas como PC25, que tienen una potencia de 200 kW y cuya eficiencia es de 40% pero pueden alcanzar el 80% en cogeneración (cuando se aprovecha el agua y los gases del reformado en calentar la propia celda y en calefacción de las instalaciones). Estas unidades tienen un costo de U\$S 4.500/kW y se alimentan generalmente con gas natural (el consumo es de 256 m³/MWh), aunque pueden alimentarse también con gas de digestores anaeróbicos (CH₄ + CO₂). Su tiempo de vida útil es de alrededor de 40.000 horas.

Existen más de 300 unidades instaladas en todo el mundo, la mayor parte de ellas en instalaciones militares estadounidenses y también en centros de cómputo, bancos, hospitales y otros lugares donde es necesario energía con disponibilidad mayor de 99,9999% (la denominada "energía premium"). En Brasil hay 4 celdas PC 25 operando desde el año 2002.

1.6 BENEFICIOS AMBIENTALES.

El hidrógeno ha sido un combustible confiable por varios años, desde su uso como un gas doméstico en muchas casas en el siglo XIX hasta los poderosos motores de los cohetes espaciales de hoy. Ahora con el desarrollo de la celda de combustible, el hidrógeno tiene la gran oportunidad de convertirse en el mayor portador de energía para nuestra sociedad.

Utilizar la tecnología del hidrógeno tiene muchas ventajas. No produce contaminación ni consume recursos naturales. El hidrógeno se toma del agua y luego se oxida y se devuelve al agua. No hay productos secundarios ni tóxicos de ningún tipo que puedan producirse en este proceso.

El impacto medioambiental, depende de la forma de extracción que se utilice para la obtención del hidrógeno. Hoy aproximadamente el 95% de la producción del hidrógeno se realiza a través de la quema de combustibles fósiles, por tanto las emisiones de gases invernaderos a la atmósfera están presentes en estas extracciones. Solo el 5% aproximadamente de la producción del hidrógeno se realiza a través de la electrolisis, la separación del hidrógeno que contiene el agua común, este método no es el más apropiado, ya que la energía utilizada para este proceso de extracción es mayor que la producida posteriormente del hidrógeno.

La limitada cultura del uso del hidrógeno hace que muchos teman que pueda originar explosiones. Sin embargo, otros consideran que no es más peligroso que el gas en nuestras cocinas o la propia gasolina, con la ventaja de que al ser más ligero que el aire se disipa más rápido. Si bien este gas ocupa un volumen mayor que la gasolina, lo cierto es que se utiliza de él tres veces menos peso para producir una misma cantidad de energía. La mayoría de los científicos considera que se aprenderá a manejarlo, como se hizo con la gasolina y el gas.

Las celdas de combustible normalmente funcionan con gas de hidrógeno puro, el cual se puede producir sin contaminación utilizando la energía solar, tanto como otras fuentes renovables de energía. Las celdas de combustible que utilizan hidrógeno no producen ninguna forma de contaminación, y el único producto secundario es agua pura. Las celdas de combustible son eficientes en un 50% aproximadamente, en comparación con los motores de combustión interna, que logran apenas 12% a 15% de eficiencia. Además, en vista de que las celdas de combustible no tienen componentes móviles, pueden ser muy confiables y casi completamente silenciosas.



Figura 1.24 La pila de combustible disminuirá la contaminación global.

1.7 CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE			
CARACTERÍSTICA O PROPIEDAD	TIPO DE PILA DE COMBUSTIBLE		
	AFC	PEMFC	DMFC
ELECTROLITO	Hidróxido Potásico 6-12 N	Ácido Sulfónico fluorado incorporado en una membrana polimérica conductora de protones con un contenido de agua del 28%	Metanol líquido o gaseoso
MATRIZ DEL ELECTROLITO	Matriz porosa de asbestos		Polímeros como Alcohol Polivinílico (PVA)
COMBUSTIBLE	Hidrógeno muy puro	Gas rico en hidrógeno con poco CO	Agua/Metanol
OXIDANTE	Oxígeno de alto grado de pureza (CO ₂ < 50 ppm)	Aire/Oxígeno	Aire/Oxígeno
ÁNODO	Níquel de doble porosidad	Carbón poroso con platino (0.2 mg/cm ₂) en dos capas como catalizador disperso impregnado de materiales de la membrana solubilizados	Catalizador con alta carga de platino (4mg/cm ₂)
CÁTODO	Estructura de óxido de níquel litiada porosa	Carbón poroso con platino	Platino negro
PLACA BIPOLAR		Grafito	
TEMPERATURA (°C)	25-120	<100	<130
PRESIÓN (Bar)	2	2	3
DENSIDAD DE ENERGÍA (KW/KG)	0.08-6	1	
DENSIDAD DE POTENCIA (KW/M ₂)		20	6
DENSIDAD DE CORRIENTE (MA/CM ₂)	420-1000	2000	100/800
EFICIENCIA ELÉCTRICA (%)		50	
REACCIÓN ANÓDICA	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$
REACCIÓN CATÓDICA	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$
APLICACIONES	Usos militares de corta duración y proyectos espaciales	Transporte Uso residencial en producción de electricidad y calor	Transporte
SITUACIÓN TECNOLÓGICA	Desarrollo total	Estado pre-comercial	Fases iniciales de I+D

Tabla 1.4 Resumen de las características de las AFC, PEMFC, DMFC.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE			
CARACTERÍSTICA O PROPIEDAD	TIPO DE PILA DE COMBUSTIBLE		
	PAFC	MCFC	SOFC
ELECTROLITO	Ácido fosfórico	Mezcla de carbonatos de litio, potasio, sodio y metales alcalinotérreos estabilizado	Óxido de circonio con ytrio
MATRIZ DEL ELECTROLITO	Carburo de silicio teflonado	Polvo cerámico en forma de baldosas o matriz de aluminato de litio	
COMBUSTIBLE	Eliminación del azufre de los gases de alimentación	Se viene a utilizar relaciones de 4/1 de moles de H ₂ /CO ₂	Hidrógeno con CO y CO ₂
OXIDANTE	Aire seco	Se requiere una composición superior a 2 moles de CO ₂ por cada mol de O ₂	Aire
ÁNODO	Carbón poroso dopado con platino (5kg/Mwe)	Polvo de níquel sinterizado con pequeñas cantidades de cromo o aluminio en espesores de 0.8-1mm	Material poroso compuesto (cerámico metálico) de óxido de níquel y circonio estabilizado con ytrio
CÁTODO	Carbón poroso dopado con platino (5kg/Mwe)	Óxido de níquel litiado de 0.4-0.8 mm de espesor	Manganito de lantano dopado con estroncio
PLACA BIPOLAR	Grafito	Acero inoxidable de 0.4-0.6 mm	Cromito de lantano dopado
TEMPERATURA (°C)	190	650	850-1000
PRESIÓN (Bar)	8	Variable de diseño	Variable de diseño
DENSIDAD DE ENERGÍA (KW/KG)			
DENSIDAD DE POTENCIA (KW/M ₂)	0.8-9.2	0.8-1.3	16
DENSIDAD DE CORRIENTE (MA/CM ₂)	300	170-300	350-400
EFICIENCIA ELÉCTRICA (%)	40-50	50-55	50
REACCIÓN ANÓDICA	H ₂ → 2H ⁺ +2e ⁻	H ₂ +CO ₃ ²⁻ → H ₂ O+{CO ₂ } _a +2e ⁻	H ₂ → 2H ⁺ +2e ⁻
REACCIÓN CATÓDICA	½O ₂ +2H ⁺ +2e ⁻ → H ₂ O	½O ₂ +{CO ₂ } _c +2e ⁻ → CO ₃ ²⁻	½O ₂ +2H ⁺ +2e ⁻ → H ₂ O
APLICACIONES	Cogeneración en unidades de 200 kWe	Cogeneración y producción centralizada de electricidad (>1MW)	Uso residencial y pymes en generación de energía eléctrica, ACS y energía térmica para calefacción (1kW).
SITUACIÓN TECNOLÓGICA	Fase comercial	Fase de I+D Experimentación con prototipos	Fases de I+D Experimentación con prototipos

Tabla 1.5 Resumen de las características de las PAFC, MCFC y SOFC.

II.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.

2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO.

Las pilas de combustible han irrumpido en los últimos años como una tecnología avanzada para la generación de energía eléctrica tanto móvil como estacionaria.

Una pila o celda de combustible, aunque posee componentes y características similares a algunas de las típicas baterías, difiere de ellas en varios aspectos. La batería es un dispositivo de almacenamiento de energía. La máxima energía disponible está determinada por la cantidad de reactivo químico almacenado dentro de la propia batería. La batería cesará de producir energía eléctrica cuando los reactivos químicos se hayan consumido (es decir, se habrá descargado). En una batería secundaria, los reactivos químicos son regenerados mediante recarga, lo que consiste en suministrar energía a la batería desde una fuente externa. La pila de combustible, por el contrario, es un dispositivo de conversión de energía que teóricamente tiene la capacidad de producir energía eléctrica durante tanto tiempo como sean suministrados el combustible y el comburente a los electrodos.

En realidad, la degradación, principalmente corrosión o mal funcionamiento de los componentes, limitan la vida práctica de operación de las pilas.

La pila de combustible está formada por un ensamblaje o apilamiento de celdas o células elementales, en número suficiente para asegurar la producción electroquímica de electricidad. El término “pila” de combustible no proviene como se podría pensar en un principio de su carácter electroquímico, sino que está asociado al término inglés “fuel cell stack”, cuya traducción literal es “apilamiento de celdas de combustible”. Así pues, aunque muchas veces se hable en español de pilas de combustible, realmente se estará haciendo mención en ocasiones a la

celda elemental de una pila de combustible, y en otras a la propia pila o conjunto de celdas. La estructura física básica o bloque constructivo de una celda elemental de una pila de combustible consta de una capa de electrolito en contacto con un ánodo y un cátodo poroso a cada lado. Una representación esquemática de una pila de combustible con los gases reactivos (combustible y comburente u oxidante), productos y la dirección del flujo de iones a través de la celda se muestra en la figura 2.1.

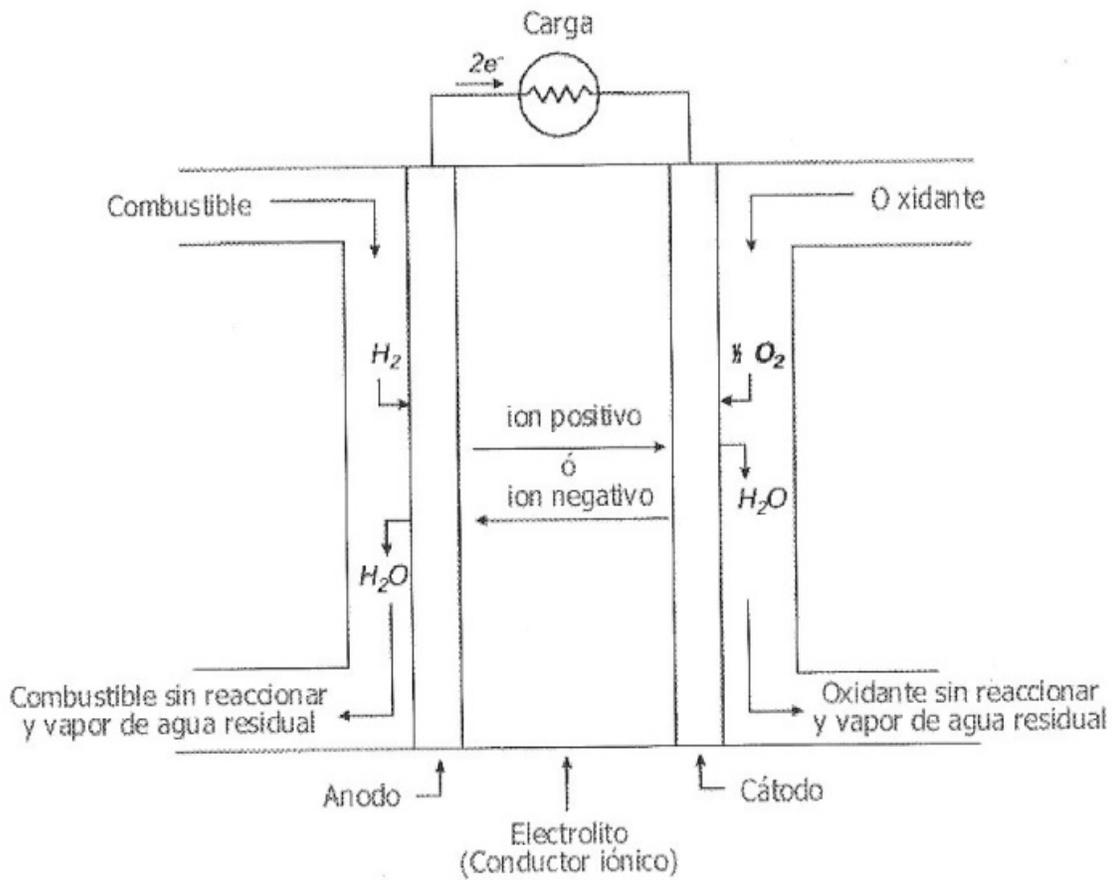


Figura 2.1 Esquema de una celda elemental de la pila de combustible

En una pila de combustible típica, el ánodo es alimentado continuamente por un gas oxidante (habitualmente oxígeno del aire); las reacciones electroquímicas tienen lugar en los electrodos para producir corriente eléctrica.

El flujo de combustible o de gases oxidantes fluye hacia la superficie del ánodo o cátodo opuesta al electrolito y genera energía eléctrica mediante la oxidación electroquímica del combustible, habitualmente hidrógeno, y la reducción electroquímica del oxidante, generalmente oxígeno. En teoría, cualquier sustancia capaz de oxidarse químicamente que pueda ser suministrada de forma continua (como un fluido) puede ser “quemada” galvánicamente como combustible en el ánodo de la celda. Análogamente, el oxidante puede ser cualquier fluido que pueda ser reducido suficientemente. El hidrógeno gaseoso se ha convertido en el combustible elegido para la mayoría de las aplicaciones, por su alta reactividad cuando son usados los catalizadores adecuados, su capacidad para ser obtenido a partir de hidrocarburos para aplicaciones terrestres, y su alta densidad de energía cuando es almacenando criogénicamente para su uso en entornos cerrados como es su uso en el espacio. De forma similar, el oxidante más común es el oxígeno gaseoso en cual es fácil y económicamente viable de obtener del aire para aplicaciones terrestres, y fácilmente almacenable para su uso.

En la figura anterior podemos apreciar claramente el funcionamiento de una pila de combustible ya que en esta una membrana polimérica conductora de protones (el electrolito), separa el lado del ánodo del lado del cátodo. En el lado del ánodo, el hidrógeno que llega al ánodo catalizador se disocia en protones y electrones.

Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo (produciendo energía) ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el catalizador del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y protones para formar el agua. En este ejemplo, el único residuo es vapor de agua o agua líquida.

Además de hidrógeno puro, también se tiene el hidrógeno contenido en otras moléculas de combustibles incluyendo el diesel, metanol y los hidruros químicos, el residuo producido por este tipo de combustibles además de agua es dióxido de carbono, entre otros

2.2 REACCIÓN EN LA CELDA.

Desde el punto de vista físico, una pila de combustible consta de dos electrodos separados por un electrólito. El combustible, por ejemplo, el hidrógeno, es conducido de forma continua a unos de estos electrodos: El ánodo. Como electrólito sólo pueden emplearse conductores iónicos tales como bases, ácidos y sales.

Hay que hacer notar que tanto la especie iónica como su dirección de transporte pueden variar, influyendo sobre el lugar de producción de agua y su evacuación.

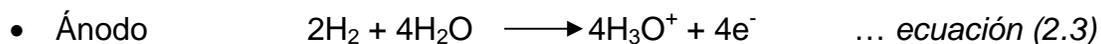
El ión puede ser tanto positivo como negativo, lo que significa que la carga del ión puede ser positiva o negativa (déficit o superávit de electrones).

Según la naturaleza del electrolito, ácido o básico, el agua formada por la oxidación del hidrógeno es producida en el cátodo o en el ánodo.

Para una pila alcalina tendremos las siguientes semi-reacciones:

- Ánodo $2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \longrightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$... ecuación (2.1)
- Cátodo $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{OH}^-$... ecuación (2.2)

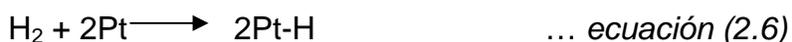
Para una pila ácida tendremos las siguientes semi-reacciones:



Globalmente la reacción, en ambos casos, es la siguiente:



Estas dos semi-reacciones, ya sean en medios ácidos o básicos, ocurren normalmente de manera muy lenta por lo que es normal que se utilicen catalizadores tanto en cátodo como en el ánodo para modificar la cinética de la reacción. Uno de los catalizadores que mejor trabaja es el platino, un material bastante caro. Las semi-reacciones que ocurren en cada electrodo sólo se ven incrementadas en su velocidad si ocurren en la superficie del catalizador. El Pt realiza en lances intermedios para facilitar el proceso en el electrodo. Por ejemplo, el proceso anódico requiere zonas de Pt para unirse a los átomos de H cuando la molécula de H_2 reacciona, y estas zonas de Pt liberan después los átomos de H como $\text{H}^+ + \text{e}^-$.



Esta reacción neta (ecuación 2.5) produciría una explosión si se mezclaran ambos reactivos y se calentaran o se aplicara una chispa, por lo que una pila de combustible H_2/O_2 se conoce también con el nombre de <<pila de de gas detonante>>. En tal caso, la totalidad de la energía de reacción se disiparía en forma de calor. En la pila de combustible esta reacción exotérmica, que genera una gran cantidad de calor, es reversible. La reacción se regula para que se desarrolle de forma lenta y controlada sin que prácticamente se ceda calor.

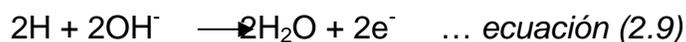
2.2.1 REACCIONES EN ÁNODO Y CÁTODO.

El proceso reversible correspondiente a la reacción neta en la ecuación 2.5 se subdivide en dos reacciones parciales. La figura 2.2 muestra la constitución esquemática y el funcionamiento de una pila de combustible H₂/O₂.

1. En el material catalíticamente activo, que constituye uno de los electrodos (el ánodo), se oxida el hidrógeno cediendo electrones. Estos electrones circulan por el circuito externo hacia el cátodo, desarrollando trabajo.



Reacción anódica



2. En el cátodo, situado a una cierta distancia, se reduce el oxígeno con incorporación de los electrones cedidos por el ánodo.

Reacción catódica



El electrolito, en este caso una solución concentrada de potasa cáustica (KOH), transporta las cargas, es decir, los iones hidroxilo negativos (iones OH⁻) formados en el electrodo de oxígeno, hacia el ánodo por el interior de la pila. Conectando en ánodo con el cátodo, a través de una resistencia externa o de carga, la pila suministra energía eléctrica (U*I*t).

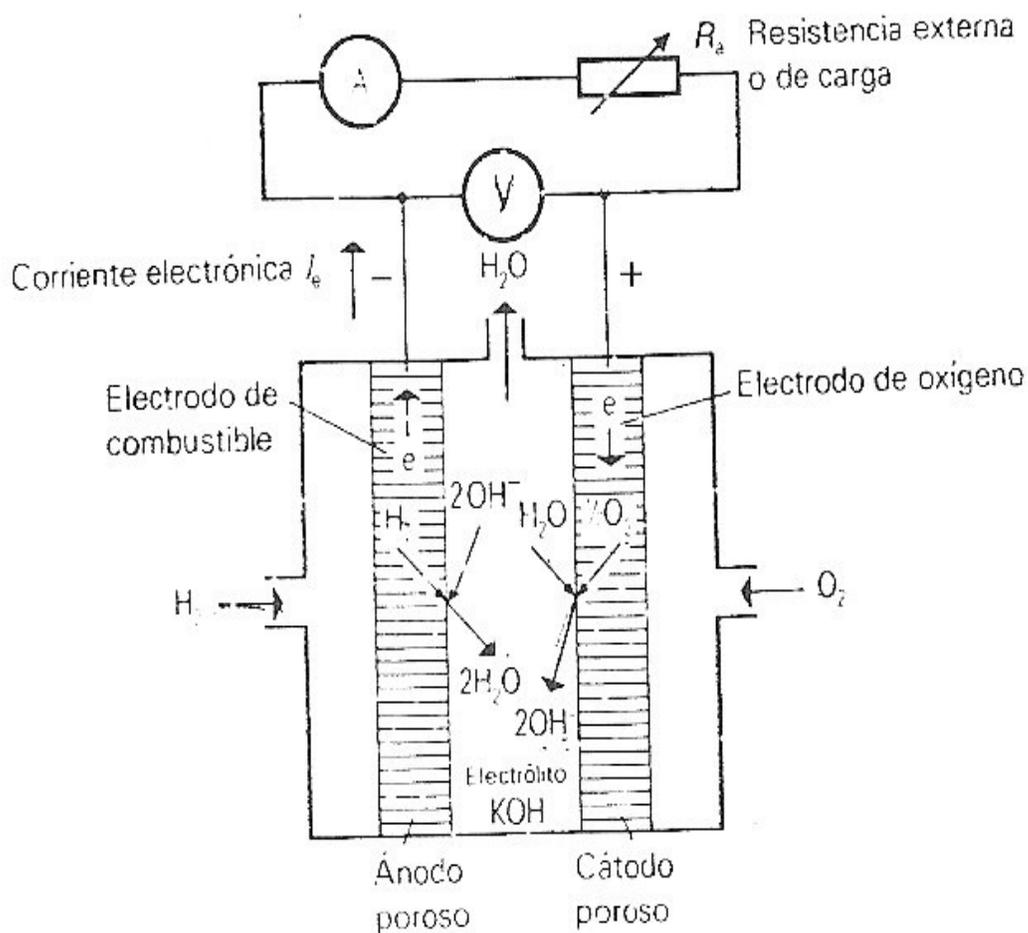


Figura 2.2 Pila de combustible.

2.3 ELECTRODOS POROSOS

Todos los convertidores electroquímicos tienen electrodos porosos, en cuyos poros se introduce el material catalítico (por ejemplo, platino) en donde tiene lugar la transferencia de carga. De esta forma puede establecerse un buen contacto entre las tres fases que participan en la reacción. En estos puntos se forma la interface ternaria a través de la que entran en contacto el gas de reacción, el electrodo y el electrolito.

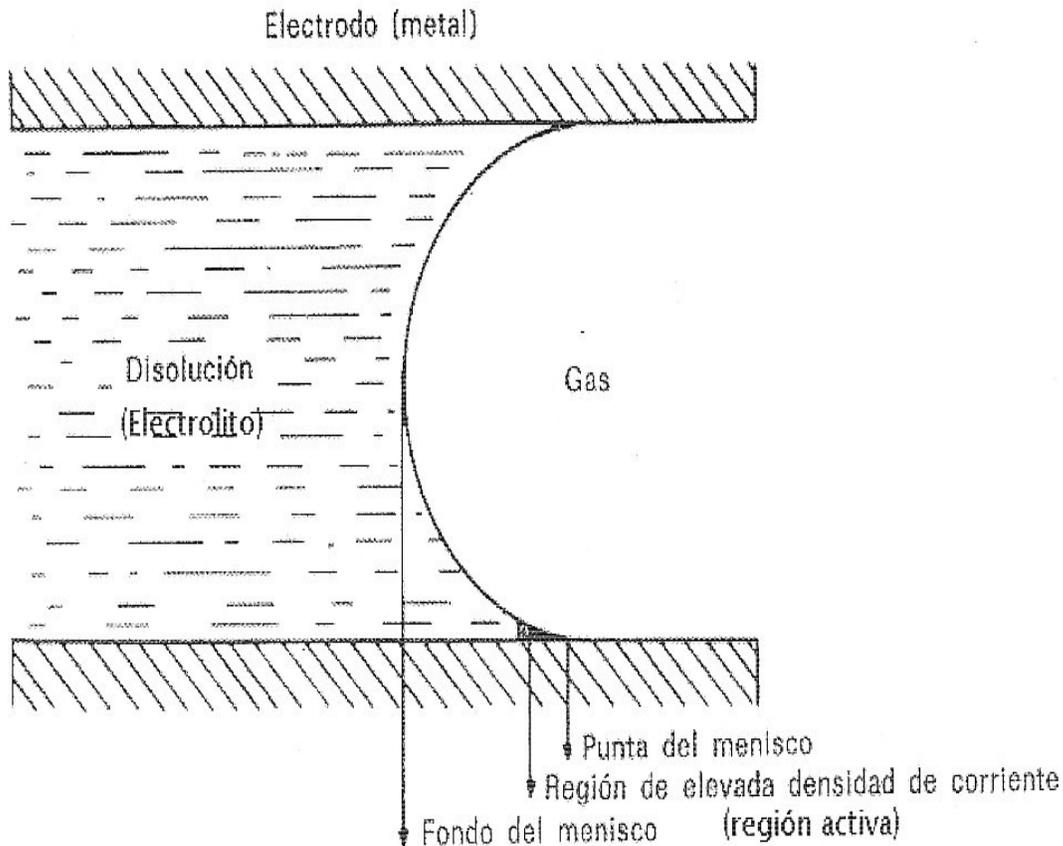


Fig. 2.3 Representación esquemática de la interfase ternaria en un poro (región activa), en una pila de combustible con electrolito líquido.

La naturaleza de esa interfase, denominada región activa, juega un papel crítico e importantísimo en el funcionamiento electroquímico de la pila de combustible, particularmente en aquellas pilas que usan electrolitos líquidos. En dichas pilas los gases de reacción se difunden a través de una delgada capa de electrolito que moja porciones de electrodo poroso y reacciones electroquímicamente en sus respectivas superficies de electrodo.

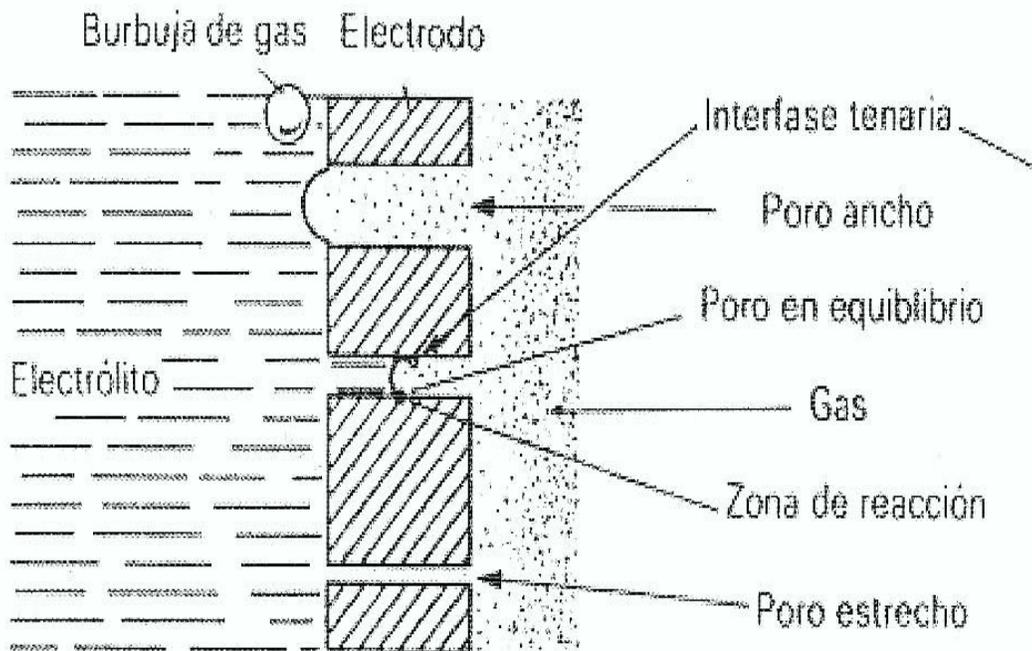


Figura 2.4 Electrodo poroso donde se muestra un poro en equilibrio, uno demasiado estrecho y otro excesivamente ancho, en una celda de combustible con electrolito líquido.

En una parte de los poros, como se puede apreciar en la figura 2.4, se alcanza el equilibrio entre la fuerza capilar y la presión del gas. En ellos tiene lugar la reacción en la que se generan la corriente y la tensión. Por tanto en un electrodo poroso solo contribuyen a la generación de energía eléctrica aquellos poros en los que la presión capilar y la presión del gas se equilibran (poros en equilibrio). Los poros excesivamente estrechos se llenan de electrolito. Si el electrodo poroso contiene una excesiva cantidad de electrolito, el electrodo puede “inundarse” y restringir el transporte de las especies gaseosas en la fase electrolítica hacia el emplazamiento de la reacción. La consecuencia es una reducción en el funcionamiento electroquímico del electrodo poroso. En los poros demasiados anchos el gas circula libremente sin llegar a reaccionar. Tampoco es recomendable por tanto que los gases penetren en los poros más de la cuenta

“secando” los mismos. Así pues, debe ser establecido un delicado balance entre el electrodo, electrolito y las fases gaseosas en la estructura del electrodo poroso. Muchos de los recientes esfuerzos en el desarrollo de la tecnología de las pilas de combustible han sido dedicados a reducir el grosor de los componentes de celda mientras se perfecciona y mejora la estructura del electrodo y la fase electrolítica, con el objetivo de obtener un rendimiento más elevado y una mejor estabilidad en el funcionamiento electroquímico así como disminución en los costes. Otra de las líneas de investigación que se desarrolla hace ya tres décadas es la disminución de cantidad de catalizador. La teoría indica que los catalizadores han de concentrarse sólo en una pequeña región de elevada densidad de corriente cerca del límite trifásico lo que disminuiría enormemente el coste de las pilas en las que se usa platino como catalizador.

En la República Federal de Alemania se desarrolló un tipo de electrodos para electrolitos alcalinos que se conoce con el nombre de electrodo con catalizador de doble esqueleto y está formado por níquel de Raney o por plata de Raney con níquel-carbonilo. Disolviendo el aluminio incorporado en la aleación, se obtiene un electrodo con una estructura de níquel o plata muy desordenada que presenta una actividad excelente.

En Siemens se desarrollan electrodos no aglomerados (electrodos soportados) de gran superficie formados por catalizadores de Raney no sinterizados de alta actividad y por una capa porosa de asbesto impregnada de electrolito. Estos electrodos pueden ser muy delgados y trabajar con presiones de gas relativamente pequeñas.

La constitución de este tipo de pilas está representada en la figura 2.5.

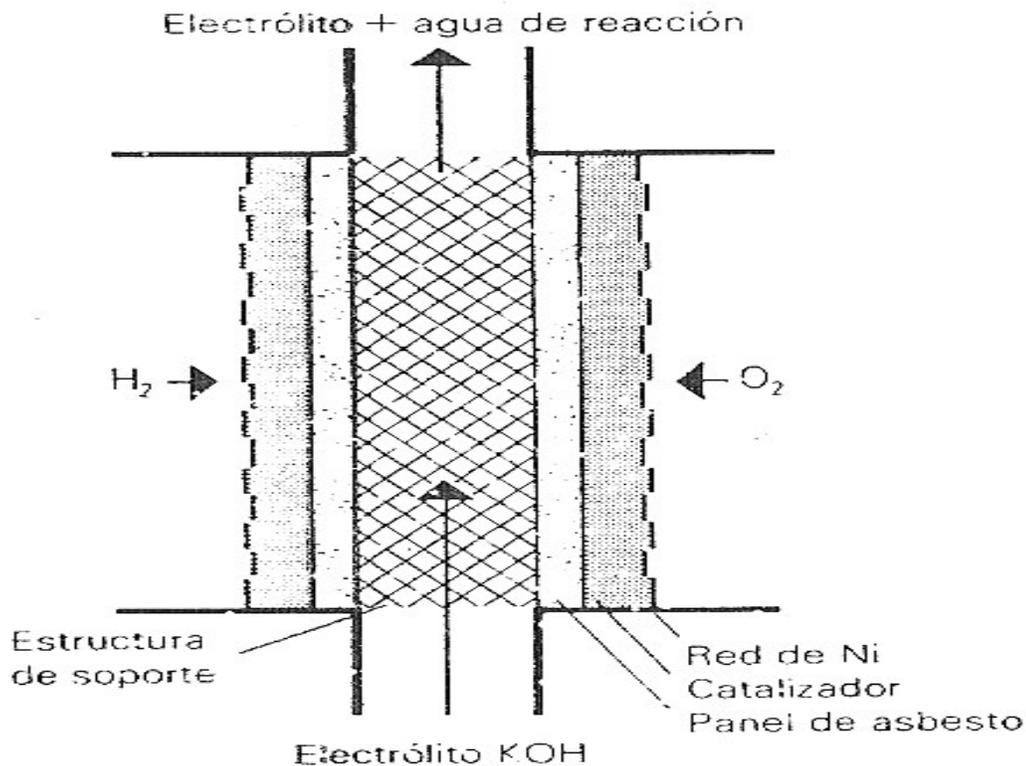


Figura 2.5 Representación esquemática de una pila de combustible H₂/O₂ desarrollada por Siemens.

2.4 ELECTROLITOS Y CATALIZADORES.

Si se desea reducir al máximo la resistencia interna de la pila, habrá que utilizar un electrolito con una conductividad específica elevada. Además, el espesor de la capa de electrolito debe ser lo menor posible. Las bases, los ácidos y las sales fundidas constituyen, por ejemplo, electrolitos de buena conductividad. Los hidróxidos alcalinos se distinguen por su gran estabilidad y su muy buena conductividad. Permiten utilizar electrodos compuestos por metales relativamente poco nobles, ya que la tendencia a la corrosión de los metales en, por ejemplo, una solución de potasa cáustica es muy reducida. Las dificultades aparecen si se desea utilizar un electrolito ácido, pues exceptuando los metales nobles de alto precio, hay pocas sustancias que pueden emplearse como catalizadores o para

fabricar las distintas piezas. Como catalizadores para la oxidación del combustible se están ensayando actualmente el carburo del wolframio, el fosfuro de cobalto (CoP_3) y el disulfuro de molibdeno. En medio ácido, la reducción del oxígeno se desarrolla con incorporación de cuatro electrones de acuerdo con la ecuación:



2.5 FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE.

La celda de combustible se trata de un dispositivo electroquímico que transforma de forma continua la energía química de un combustible (hidrógeno) y oxidante (oxígeno) directamente en energía eléctrica y calor, sin combustión. El proceso eléctrico hace que los átomos de hidrógeno cedan sus electrones. Es parecido a una batería en el sentido de que tiene electrodos, un electrolito y terminales positivos y negativos. Sin embargo no almacena energía en la forma en la que lo hace una pila. Como no existe combustión, las pilas de combustible emiten pocas emisiones; como no tiene componentes móviles, las células de combustible son silenciosas.

En síntesis, las pilas de combustible producen energía eléctrica mediante la combinación de hidrógeno y oxígeno que convierten en agua. De ahí su gran atractivo, pues las células de combustible producen una energía limpia que no daña el medioambiente y silenciosa.

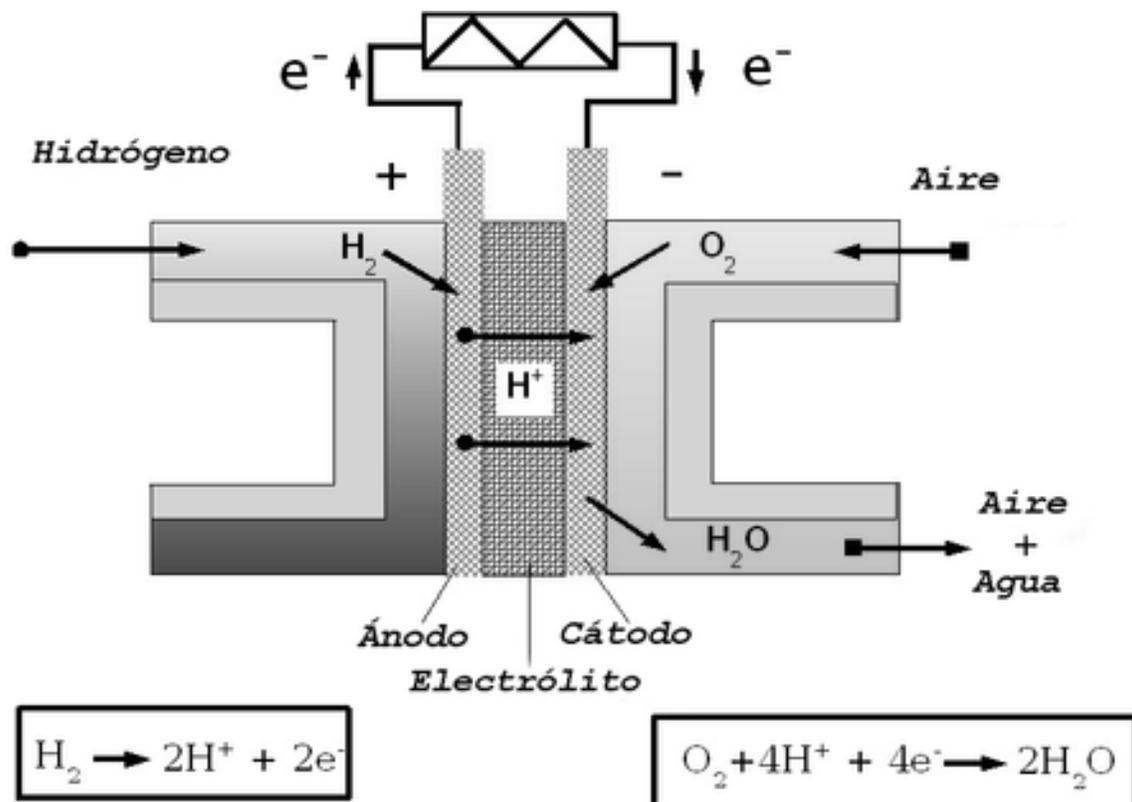


Figura 2.6 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible

En el ejemplo típico de una célula de membrana intercambiadora de protones (o electrolito polimérico) hidrógeno/oxígeno de una celda de combustible (PEMFC, en inglés: *proton exchange membrane fuel cell*), una membrana polimérica conductora de protones (el electrolito), separa el lado del ánodo del lado del cátodo.

En el lado del ánodo, el hidrógeno que llega al ánodo catalizador se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo (produciendo energía) ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el catalizador del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y protones para formar el agua. En este ejemplo, el único residuo es vapor de agua o agua líquida. Es importante

mencionar que para que los protones puedan atravesar la membrana, esta debe estar convenientemente humidificada dado que la conductividad protónica de las membranas poliméricas utilizadas en este tipo de pilas depende de la humedad de la membrana. Por lo tanto, es habitual humidificar los gases previamente al ingreso a la pila.

Además de hidrógeno puro, también se tiene el hidrógeno contenido en otras moléculas de combustibles incluyendo el diesel, metanol y los hidruros químicos, el residuo producido por este tipo de combustibles además de agua es dióxido de carbono, entre otros.

En esta celda ocurren los siguientes procesos:

- 1.- Al ánodo las moléculas de hidrógeno pierden sus electrones y forman iones de hidrógeno, un proceso que se hace posible por medio de catalizadores de platino.
- 2.- Los electrones se traspan al cátodo a través de un circuito externo que produce electricidad al pasar por un motor (u otro mecanismo eléctrico).
- 3.- Los iones de hidrógeno pasan al cátodo por la membrana de intercambio protónico, donde se unen con las moléculas de oxígeno y electrones para producir agua.
- 4.- De esta manera, se utiliza el proceso natural de producción de agua por medio de la oxigenación de hidrógeno, para producir electricidad y trabajo útil.
- 5.- No se produce ninguna contaminación y los únicos desechos son agua y calor.

El proceso químico es:

- Ánodo: $2\text{H}_2 \longrightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$... ecuación (2.12)
- Cátodo: $4\text{e}^- + 4\text{H}^+ + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$... ecuación (2.13)
- Reacción Completa: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$... ecuación (2.14)

Las pilas de combustible, se caracterizan por tener un electrolito en forma de fina membrana de polímero. Los reactivos son H_2/O_2 . Para reducir el O_2 en el cátodo el catalizador más eficaz es el platino con pequeñas incorporaciones de otros metales (Ru, Mo, Pb, Rh, Ir, Re). El hidrogeno entra a la célula y el catalizador divide la molécula en protones y electrones, los protones atraviesan la membrana y pasan al otro lado reaccionando con el oxígeno para formar agua. Los electrones recorren el circuito por la parte externa creando una corriente eléctrica. El voltaje de una célula individual de una célula es pequeño, por lo que deben unirse varias en serie formando un conjunto denominado stack.

Como se menciona anteriormente, como catalizador se utiliza el platino (Pt). Un metal noble muy caro, pero que es imprescindible para obtener velocidades significativas de reacción. En el ánodo el platino cataliza la disociación del hidrogeno molecular.



El movimiento de los protones se lleva a cabo mediante la membrana de electrolito cuya eficacia se ve limitada porque a la relativamente baja temperatura que se lleva a cabo la reacción (unos 80°C) la reducción del oxígeno es 100 veces más lenta que la oxidación del hidrogeno.

La pila proporciona entre 0.2 y 0.7 A/cm^2 , con 0.60 a 0.84 V, lo cual da una potencia de 0.12 a 0.54 W/cm^2 . Se necesita 1 Nm^3 de H_2 para obtener una potencia

media efectiva de 1.30 kw, por lo que el consumo específico sería, $1/1.30 = 0.77$ Nm³/kW.

2.6 ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE.

La estructura básica de la célula es la siguiente:

Placa de cierre - soporte del ánodo – mea - soporte del cátodo - placa de cierre

2.6.1 PLACAS DE CIERRE.

Se utilizan para comprimir de forma compacta las células individuales con la finalidad de mantener la conductividad eléctrica. Hay una placa de cierre positiva y otra negativa. La función de la placa de cierre es doble, por una parte facilitar la entrada del flujo de hidrógeno y del oxígeno que intervienen en la reacción electroquímica, también la salida flujo que no se ha utilizado. Por otra parte la placa de cierre actúa como colector de corriente dando salida a los electrones por el ánodo y entrada por el cátodo. Se fabrican en un material ligero, impermeable al gas y buen conductor de la electricidad, generalmente un metal o grafito.

Cuando se unen varias células para constituir un stack, las placas de cierre intermedias reciben el nombre de placas bipolares y las de los extremos son las propiamente placas de cierre. Las placas bipolares actúan como ánodo en una célula y cátodo en la célula adyacente.

2.6.2 SOPORTES.

Son el anode backing (soporte del ánodo) y el cathode backing (soporte del cátodo). Se fabrican en forma de papel carbón ultra poroso de 100 a 300 micras de espesor. Los poros del material permiten el acceso del gas a los electrodos.

2.6.3 MEA (MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY)

El conjunto formado por el electrolito en forma de membrana y los electrodos "MEMBRANE ELECTRODE ASSEMBLY". Puede tener un grosor de 200 micras (0.2 mm) aunque varía según la aplicación y la densidad de corriente que se desea tener. Los electrodos son de grafito con la inclusión de una cierta cantidad de catalizador (platino) cuya cantidad se da referida a la unidad de superficie de MEA. Con los años ha pasado de de 4 mg de pt/cm^2 que tenía las células primitivas a valores que actualmente están en torno a los $0.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$.

2.6.4 PLACAS REFRIGERADORAS

Se ponen a continuación de las placas bipolares y se fabrican de materiales inertes. El sistema de refrigeración tiene la misión de evacuar el calor producido en la reacción química de obtención de agua. Se utiliza un circuito de agua acoplado con un intercambiador de calor que consta de una bomba de circulación, un tanque de agua, un des-ionizador y los sensores pertinentes.

III.- ELEMENTOS QUE PODRÍAN FORMAR JUNTO CON LA PILA DE COMBUSTIBLE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

3.1 PILA DE COMBUSTIBLE.

La investigación hasta ahora realizada nos permite en este capítulo elegir la pila de combustible de todas las antes mencionadas que hoy en la actualidad es el mejor dispositivo para transformar el hidrógeno en electricidad y que por lo tanto será nuestra referencia en este trabajo de investigación.

Anteriormente vimos de manera detallada los tipos de pila de combustible que existen y sus características. Gracias a esto la PEMFC (pila de combustible de membrana de intercambio protonico) podemos afirmar que este tipo de pila es la ideal para nuestro proyecto.

Este tipo de pilas utilizan un electrolito formado por una red de polímero que está unida a grupos funcionales capaces de intercambiar cationes o aniones. En general el electrolito es un ácido con un grupo sulfónico incorporado en la matriz, que es capaz de transportar iones H^+ , mientras que el anión es inmovilizado por la estructura del polímero.

Las celdas de combustible de membrana de electrolito polimérico tienen la ventaja de que son más simples y compactas que otros tipos de celdas, y además no necesitan reservas de electrolito ni recirculación. La temperatura de operación oscila en un intervalo de 60 a 130°C y su eficiencia eléctrica se encuentra entre el 50 y 60%.

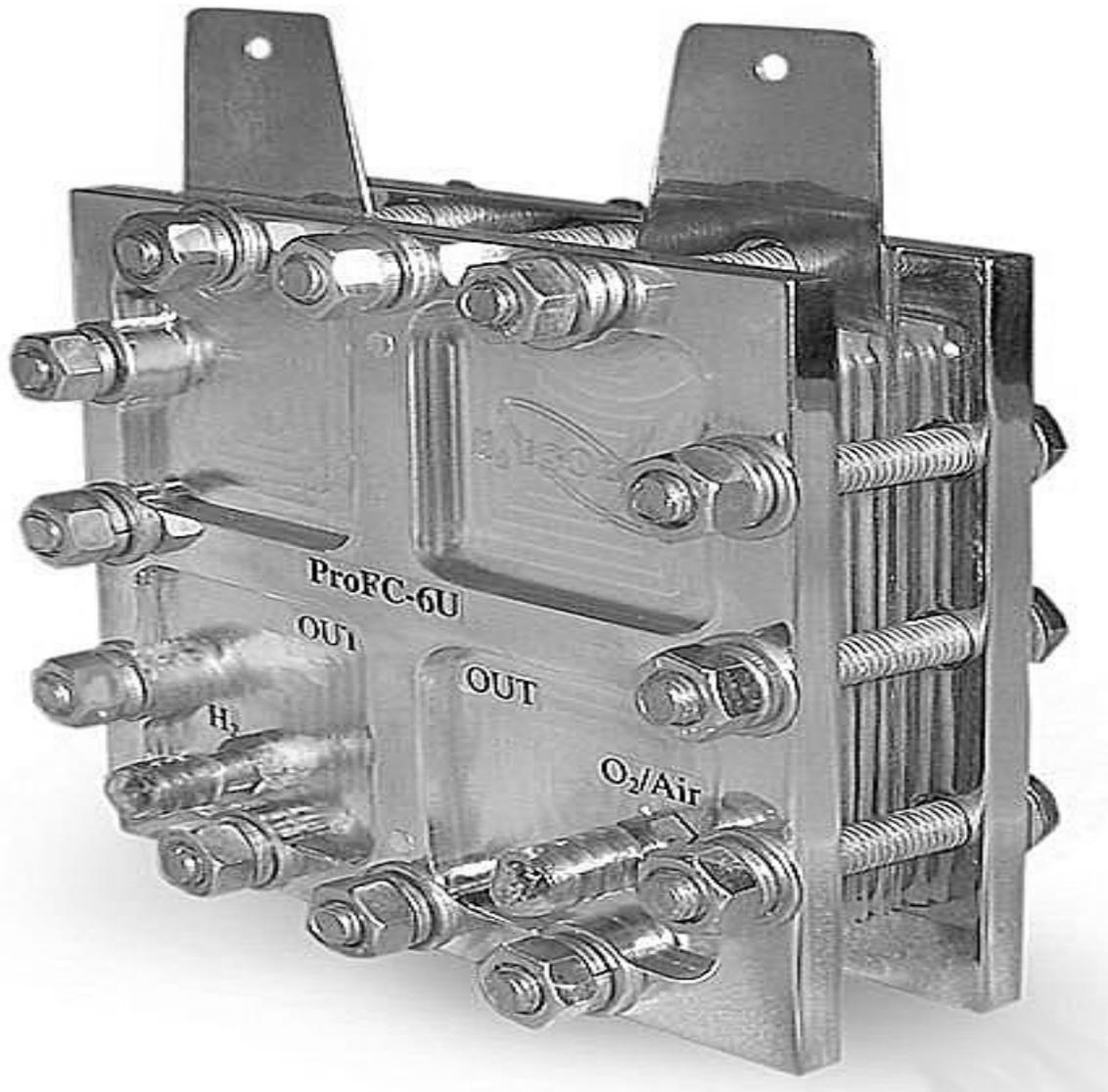


Figura 3.1 Pila de combustible tipo PEM.

3.2 EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

El hidrógeno es una de las más atractivas fuentes de energía no convencional. Este elemento, que constituye más del 80% de toda materia en el universo, escapa en su mayor parte de la atmósfera terrestre hacia el espacio, y el resto está presente mediante enlaces en compuestos químicos.

Por tanto, queda claro que el hidrógeno no se encuentra en estado puro en la naturaleza, y que para su obtención en dicho estado se debe separar el hidrógeno de sus enlaces químicos que forma con otros elementos.

Por más de un siglo el hidrógeno se ha considerado como un combustible conveniente y limpio. Puesto que puede obtenerse de una diversa gama de fuentes domésticas, el hidrógeno podría reducir los costos económicos, políticos y ambientales de los sistemas de energía. Por otra parte, en áreas urbanas, a causa de la contaminación del aire, los costos relacionados con la preservación de la salud son un problema creciente, tanto para las sociedades desarrolladas como las que se encuentran en vías de desarrollo. En el largo plazo, el hidrógeno obtenido de fuentes renovables ofrece un potencial de energía que sería sostenible en todos sentidos.

El hidrógeno es un portador de energía como la electricidad y puede producirse a partir de una amplia variedad de fuentes de energía tales como: el gas natural, el carbón, la biomasa, el agua, etc., así como de las aguas negras, de los residuos sólidos, llantas y desechos de petróleo.

Las ventajas y desventajas del hidrógeno derivan de sus propiedades físicas básicas. La molécula de hidrógeno es la más ligera, la más pequeña y está entre las moléculas más simples, además, es relativamente estable. El hidrógeno tiene más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible y, en caso de accidente, se dispersaría rápidamente. También permite la combustión a altas relaciones de compresión y altas eficiencias en máquinas de combustión interna. Cuando se le combina con el oxígeno en celdas de combustible electroquímicas, el hidrógeno puede producir electricidad directamente, rebasando los límites de eficiencia del ciclo de Carnot obtenidos actualmente en plantas generadoras de potencia.

Como desventajas, el hidrógeno tiene una temperatura de licuefacción extremadamente baja (20 K) y una energía muy baja por unidad de volumen como gas o como líquido (más o menos una tercera parte de la del gas natural o gasolina, respectivamente). Otras desventajas son: la obtención del hidrógeno líquido requiere de un proceso altamente consumidor de energía, el transporte de hidrógeno gaseoso por ductos es menos eficiente que para otros gases, los contenedores para su almacenaje son grandes y el almacenamiento de cantidades adecuadas de hidrógeno a bordo de un vehículo todavía representa un problema significativo. El hidrógeno no es tóxico y no es contaminante, pero es difícil de detectar sin sensores adecuados ya que es incoloro, inodoro y su flama en el aire es casi invisible.

Por numerosas razones, el punto de introducción para la energía con base en el hidrógeno es el sector transporte. Los consumidores pagan considerablemente mucho más por la energía utilizada en el transporte que por la electricidad o el gas empleado para fines domésticos (esta relación podría ser, conservadoramente, hasta de 8 a 1 para una familia de clase media). Más aún, el sector transporte tiene también un gran potencial de ganancias por eficiencia de combustible. En efecto, la eficiencia de los automóviles modernos es de alrededor del 13 por ciento durante el ciclo de manejo urbano, en tanto que los vehículos a hidrógeno, ya sean híbrido-eléctricos o de celdas de combustible, podrían alcanzar eficiencias del orden de entre 35 y 45 por ciento. Los vehículos impulsados por hidrógeno también pueden cumplir con la demanda creciente de bajas o cero emisiones.

Utilizar la tecnología del hidrógeno tiene muchas ventajas:

- **No produce contaminación ni consume recursos naturales.** El hidrógeno se toma del agua y luego se oxida y se devuelve al agua. No hay productos secundarios ni tóxicos de ningún tipo que pueda producirse en este proceso.

- **Seguridad.** Los sistemas de hidrógeno tienen una historia de seguridad muy impresionante. En muchos casos, el hidrógeno es más seguro que el combustible que está siendo reemplazado. Además de disiparse rápidamente en la atmósfera si se fuga, el hidrógeno, en contraste con los otros combustibles, no es tóxico en absoluto.
- **Alta eficiencia.** Las celdas de combustible convierten la energía química directamente a electricidad con mayor eficiencia que ningún otro sistema de energía.
- **Funcionamiento silencioso.** En funcionamiento normal, la celda de combustible es casi absolutamente silenciosa.
- **Larga vida y poco mantenimiento.** Aunque las celdas de combustible todavía no han comprobado la extensión de su vida útil, probablemente tendrán una vida significativamente más larga que las máquinas que reemplacen.
- **Modularidad.** Se puede elaborar las celdas de combustible en cualquier tamaño: tan pequeñas como para impulsar una carretilla de golf o tan grandes como para generar energía para una comunidad entera. Esta modularidad permite aumentar la energía de los sistemas según los crecimientos de la demanda energética, reduciendo drásticamente los costos iniciales.

3.2.1 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO.

El hidrógeno, como es sabido, es un gas incoloro, inodoro aunque no inofensivo, por lo que debe tratarse con precaución. Es 14.4 veces más ligero que el aire y se condensa a $-252.77\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proporciona una energía más alta que el resto de los combustibles. Las emisiones nocivas en la combustión de hidrógeno con aire en motores y turbinas resultan insignificantes. El único producto de la combustión es el agua cuando el comburente es oxígeno puro.

El hidrógeno, portador secundario de energía puede introducirnos en la vía alternativa de las energías renovables. De cara a evaluar el impacto ecológico de este nuevo carburante conviene observar toda la cadena combustible desde la energía primaria hasta su aplicación final.

El hidrógeno en estado puro no se da en la naturaleza, pero combinado es muy abundante. Por tanto, no puede explotarse como el petróleo o el carbón y ha de generarse a partir de otros componentes químicos. Por ello es considerado portador secundario de energía, lo que los expertos llaman vector energético. La mayoría de compuestos orgánicos son una combinación de carbono e hidrógeno, es el caso del gas natural (metano), las plantas y la biomasa en general.

Utilizar el hidrógeno como vector energético obtenido a partir de los recursos fósiles resultaría una clara trampa. El viento, el sol y el agua de los embalses son las mejores fuentes que pueden usarse. En este sentido se pronuncia Rifkin, quien señala que los auténticos beneficios del hidrógeno se harán realidad si se introduce poco a poco las energías renovables. Hoy en día la producción mundial de hidrógeno está basada en los combustibles fósiles (gas o petróleo) o se obtiene como subproducto en procesos químicos. Una parte se elabora por electrólisis cloro-alcalina o en refinerías petrolíferas.

Ningún procedimiento que no sea la electrólisis del agua es recomendable ambientalmente. El carbón produce el doble del CO₂ que el gas natural, lo que significa un incremento espectacular del calentamiento global. Y el tema de almacenamiento de forma segura “tiene un parecido estremecedor con los argumentos utilizados hace tiempo por la industria nuclear” citando a Rifkin textualmente. Sin embargo, no deben cerrarse puertas. Actualmente se estudia la posibilidad de generar hidrógeno sin producción de CO₂ a partir del gas natural.

La electrólisis solo es rentable actualmente en países donde la electricidad resulta barata. Sería el caso de países con gran producción hidroeléctrica o nuclear.

No podemos olvidar que la revolución del hidrógeno es un deseo, una necesidad, pero que aún no es una realidad, falta mucho camino por recorrer y, lo que es más importante, abaratar costes en la producción eléctrica a partir de las energías renovables.

El hidrógeno es el más ligero de los combustibles. Además, ofrece la mayor densidad de energía por unidad de masa entre todos los posibles combustibles. Por el contrario, el hidrógeno presenta una baja densidad de energía por unidad de volumen, tal y como se aprecia en la tabla 3.1.

Combustible (T=20 °C, P=1 atm)	Densidad de energía por unidad de masa (MJ/kg)	Densidad de energía por unidad de vol. (MJ/kg)
Hidrógeno	120	11
Gas Natural (Metano)	50	11000
Metanol	20	16000
Gasolina	43	31000

Tabla 3.1 Densidades de energía de distintos combustibles.

El hidrógeno es incoloro e inodoro, y su combustión se produce sin llama. En la tabla 3.2 se muestran algunas de las características principales del hidrógeno.

Principales propiedades del hidrógeno	
Peso molecular (kg/mol)	2.02
Peso específico (kg/m ³) líquido	70.8
Punto de fusión (°C)	-259
Punto de ebullición (°C)	-252
Calor de vaporización (Kcal/kg)	110
Poder calorífico inferior	28628
Intervalo de inflamabilidad (% vol.)	4-74
Temperatura de ignición espontánea (°C)	550

Tabla 3.2 Principales propiedades del hidrógeno.

El hidrógeno es también altamente difusivo, lo que implica su rápida disipación en el ambiente. Su mayor desventaja es que tiene la más baja densidad de almacenamiento de entre todos los combustibles, requiriendo un gran volumen para su almacenamiento ya sea en forma líquida o gaseosa. El bajo punto de ebullición del hidrógeno significa también que los sistemas de almacenamiento líquido deben estar bien aislados para evitar su evaporación.

En la tabla 3.3 podemos observar un cuadro comparativo entre la gasolina convencional y los distintos métodos para el almacenamiento a bordo del vehículo, todos ellos comparados para una autonomía similar de conducción del vehículo.

	Gasolina	Hidrógeno comprimido	Hidrógeno líquido	Hidruro metálico
Kcal	336298	158631	158631	158631
Peso del combustible (kg)	29.5	4.7	4.7	4.7
Peso del tanque (kg)	13.4	63.3-86	18.6	120
Peso total del sistema de Combustible (kg)	43.2	67.9-90.5	23.3	124.7
Volumen (litros)	40.1	408.8-227.2	177.9	120
Autonomía (km)	600	600	600	600

Tabla 3.3 Pesos y volúmenes para el almacenamiento de hidrógeno.

3.2.2 OBTENCIÓN Y MANEJO DEL HIDRÓGENO.

Actualmente la industria produce hidrógeno para una amplia gama de usos, generalmente a partir de combustibles fósiles, la fuente de más del 99% del hidrógeno producido en todo el mundo. Casi la práctica totalidad es usado en la industria química, y una pequeñísima parte se usa en las pilas de combustible que han formado parte de los programas espaciales norteamericanos desde hace décadas. Más allá de su uso en los programas espaciales de la NASA, su uso en el transporte ha sido sólo en vehículos experimentales y prototipos. Hasta hace tan sólo una década, casi la totalidad de los vehículos propulsados por hidrógeno utilizaban motores modificados de combustión interna.

Las primeras pruebas con hidrógeno en motores de combustión interna datan de principios del siglo XX. En Alemania, antes de la Segunda Guerra Mundial, más de 1000 vehículos fueron modificados para funcionar con hidrógeno. Durante la crisis del petróleo de 1973, docenas de prototipos de vehículos con motor de combustión interna fueron construidos para funcionar con hidrógeno en EEUU, Europa y Japón. Hoy, algunos de estos programas de investigación de los fabricantes de automóviles continúan.

Durante las pasadas dos décadas tanto Daimler-Chrysler como BMW entre otras han estado investigando el uso del hidrógeno en vehículos con motor de combustión interna, y, más recientemente, en vehículos equipados con pila de combustible. En 1991 se llevó a cabo la primera demostración de un vehículo con pila de combustible propulsado directamente por hidrógeno.

El hidrógeno es un energético secundario y puede producirse por una gran variedad de métodos, cada uno de ellos se caracteriza por la fuente de energía primaria utilizada para obtenerlo. Dentro de las fuentes primarias están incluidos recursos fósiles como el gas natural y el carbón, también se incluyen fuentes renovables como la biomasa, la energía solar, la eólica, la hidráulica y la nuclear.

Las tecnologías de producción también representan una gran cantidad de alternativas, existen procesos químicos, biológicos, electrolíticos, fotolíticos y termoquímicos. La elección del energético primario y la tecnología para producir hidrógeno están sujetas a parámetros como el costo del ciclo de combustible y las externalidades asociadas, como los impactos ambientales y sociales.

3.2.3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VÍA SOLAR-FOTOVOLTAICO.

La producción de hidrógeno por medio de tecnología solar puede producirse por medio de dos métodos.

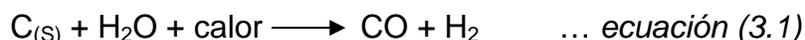
La energía solar es convertida a electricidad en una celda fotovoltaica (PV) y el hidrógeno se genera por la electrólisis del agua. El método alterno se lleva a cabo en celdas foto-electroquímicas que producen directamente hidrógeno.

Aproximadamente el 85% de la tecnología comercial de celdas PV, están basados en silicón policristalino. Las otras celdas se basan en placas finas de cristales amorfos y compuestos del grupo II-IV y I-III-IV de la tabla periódica.

3.2.4 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VÍA CARBÓN.

El hidrógeno puede producirse a través de carbón por medio de una gran cantidad de procesos de gasificación. Los procesos de alta temperatura son preferidos para maximizar la obtención del gas.

A continuación se presenta una reacción típica de los procesos basados en carbón.



Debido a que esta reacción es endotérmica se requiere de calor adicional como en el proceso de reformación de metano. El CO es convertido a CO₂ para aumentar la producción de hidrógeno y aumentar la eficiencia de conversión de carbón. A nivel comercial el proceso de gasificación de carbón es factible pero el proceso es más complejo que el proceso de reformación de gas natural. El proceso de captura de CO₂. El dióxido de carbono es un compuesto generado en los procesos energéticos de los combustibles fósiles. Para reducir la cantidad de emisiones de

gases de efecto invernadero y promover el uso de procesos sostenibles, el CO₂ generado debe ser capturado y almacenado. Existen tres procesos de captura del CO₂, a continuación se describen brevemente.

- **Post-combustión.** El CO₂ puede removerse del gas de combustión en una turbina convencional de gas CCGT (turbina de gas de ciclo combinado).
- **Pre-combustión.** El CO₂ es capturado al momento de producirse hidrógeno.
- **Oxicombustible-combustión.** Quemando el combustible fósil para producir calor en una turbina de vapor convencional, para posteriormente separar el CO₂ del vapor de agua.

3.2.5 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VÍA ENERGÍA EÓLICA.

La producción de hidrógeno desde fuentes renovables es uno de los objetivos primordiales a largo plazo. El proceso consiste en generar electricidad por medio de una turbina de viento para llevar a cabo la electrólisis y extraer el hidrógeno del agua.

3.2.6 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VÍA ENERGÍA NUCLEAR.

El hidrógeno puede obtenerse usando energía nuclear como fuente de energía primaria, por medio de fractura térmica de la molécula del agua, electrólisis o procesos termoquímicos, las tres alternativas son libres de emisiones de carbono.

El proceso de fractura de la molécula de agua tiene una eficiencia de entre 40 y 60%, sin embargo la temperatura necesaria para este proceso es de 850° C; estas temperaturas son alcanzadas únicamente por los reactores de alta temperatura.

Los LWR, mediante electrólisis, podrían competir con el proceso de reformación catalítica de gas natural con calor nuclear (NSMR); este sistema acoplado alcanza eficiencias de 30%.

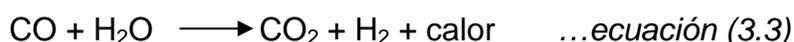
3.2.7 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VÍA GAS NATURAL.

A diferencia de otros hidrocarburos, el gas natural tiene una alta tasa en la relación C-H, es de fácil manejo y tiene un bajo costo de producción.

El hidrógeno puede producirse desde gas natural por tres procesos químicos:

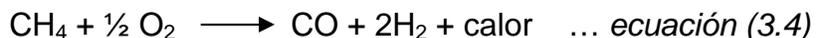
- Reformación de vapor (steam methane reforming- SMR)
- Oxidación parcial (POX)
- Reformación autotérmica (ATR)

La reformación de gas involucra una reacción endotérmica de conversión de metano y vapor de agua. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas de 700 a 850° C y una presión de 3 a 25 Bar. El producto contiene aproximadamente 12% de CO, que puede generar hidrógeno por medio de una reacción con agua.



La oxidación parcial de gas natural se lleva a cabo en condiciones oxidantes, obteniéndose hidrógeno y monóxido de carbono. En este proceso la reacción es

exotérmica y el CO generado es convertido a hidrógeno. Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



El proceso de autoreformado es una combinación de los dos procesos anteriores.

La temperatura de salida del reactor debe ser de 950 a 1100° C y la presión del gas es de 100 Bar aproximadamente.

3.2.8 USO DEL HIDRÓGENO EN LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.

USOS HABITUALES DEL HIDRÓGENO
<ul style="list-style-type: none">- Síntesis del amoníaco (NH₃), cloruro de hidrógeno (HCl) y metanol (CH₃OH).- Reacciones de hidrogenación en refino de petróleo y conversión de aceites en grasas.- Reducción de óxidos metálicos, como los de Fe, Co, Ni, Mo.- Corte y soldadura de metales con sopletes atómicos y de oxígeno-hidrógeno.- Combustible para cohetes, normalmente H₂ (l) en combinación con O₂ (g).- Pilas de combustible para producir electricidad, en combinación con O₂ (g).

Tabla 3.4 Usos habituales del hidrógeno

El combustible fósil del cual el hidrógeno puede ser producido más limpia y eficientemente es el gas natural. Separar los cuatro átomos de hidrógeno del único átomo de carbono en una molécula de gas natural es mucho más fácil que descomponer la gasolina en sus compuestos básicos. La mayoría del hidrógeno que se produce hoy procede del gas natural y se obtiene mediante un proceso denominado reformado por vapor (steam reforming).

El hidrógeno también puede ser obtenido usando fuentes de energía renovables como parte de un sistema de transporte sostenible. Por ejemplo, la energía solar puede ser usada para descomponer por hidrólisis la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno.

Sin embargo, debido al bajo coste y al firmemente establecido sistema de producción de hidrógeno a partir del gas natural, éste último será el sistema predominante hasta que las tecnologías de producción basadas en energías renovables lleguen a estar ampliamente extendidas.

Un ciclo energético limpio es aquel en el que no se producen emisiones contaminantes desde la producción del combustible, pasando por su transporte y distribución, hasta su consumo final. Está claro que si el objetivo final es que el ciclo completo que engloba a la pila de combustible y al hidrógeno sea un ciclo limpio y sostenible, se debe dejar de usar los combustibles fósiles como fuente de hidrógeno y utilizar nuevas fuentes de energía que proporcionen hidrógeno de manera limpia y continuada. Evidentemente, existen todavía una serie de obstáculos técnicos y económicos para lograr esto, afortunadamente ninguno de ellos insalvable.

3.3 CARACTERISTICAS DE LOS CONCENTRADORES Y COLECTORES SOLARES.

Un concentrador solar es un tipo de colector solar, capaz de concentrar la energía solar en un área reducida aumentando la intensidad energética. Similar a una lupa enfocando su luz en un punto, los concentradores reflejan la luz solar por medio de un arreglo de espejos alineados hacia un objetivo capaz de captar dicha energía para su aprovechamiento.

El cono parabólico concentra los rayos del sol en un solo punto, en vez de un conducto lineal. Este arreglo permite generar temperaturas al rededor de los 650°C. El Motor Stirling puede aprovechar dicha temperatura elevada.

Los concentradores solares son el mejor dispositivo hasta ahora diseñado para aprovechar la mayor cantidad de energía solar posible. Todos sabemos que el sol es una gran fuente de energía, desafortunadamente es muy inconstante, es por esta razón que a través de los años se ha buscado una forma de aprovechar y almacenar esta energía que nos provee el sol. Una buena forma de aprovechar gran parte de la energía que irradia el sol es mediante el uso de la pila de combustible sin embargo para que la pila pueda aprovechar esta energía luminosa es necesario captarla directamente del sol es ahí donde cumple con un papel sumamente importante los concentradores solares.

A continuación en las figuras 3.2 y 3.3 se puede apreciar claramente el diseño de los concentradores solares y de esta forma uno puede tener más clara la idea sobre lo que se pretende con este trabajo.



Figura 3.2 Concentrador solar parabólico 1.

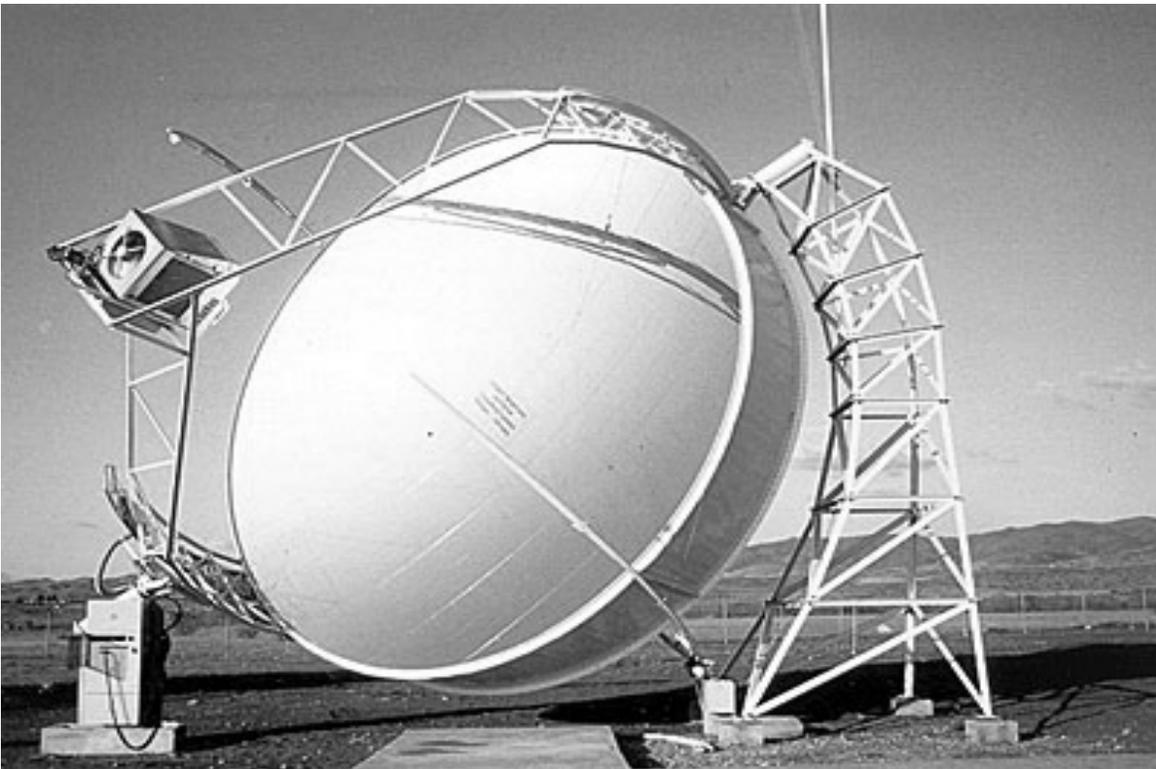


Figura 3.3 Concentrador solar parabólico 2.

Podemos asegurar que los colectores solares son considerados una de las invenciones más relevantes de los últimos diez años, ¿Por qué decimos esto?, sencillamente porque gracias a ellos podemos pensar hoy en cómo reemplazar fuentes de energías no renovables de manera eficiente y no contaminante. Los colectores solares son también conocidos con el nombre de paneles solares y son dispositivos que se utilizan para aprovechar la energía proveniente del Sol; éstos son los encargados de transformarla en energía térmica para luego usarla de manera doméstica o comercial.

Aunque actualmente los científicos y técnicos quieren lograr más aplicaciones a través de estos artefactos, la finalidad de los colectores solares principalmente calentar agua a partir del uso de la radiación solar; dicho objetivo puede conseguirse de diferentes maneras, es que según la aplicación del agua que se quiera calentar, podemos optar por métodos adecuados para cada caso.

Existen muchas aplicaciones, sobre todo a nivel industrial, donde se necesita que la energía sea liberada a altas temperaturas. Esto no se puede lograr con los colectores solares planos debido a las características propias de este tipo de colectores y a que la radiación solar es una energía de baja intensidad. En consecuencia, para obtener temperaturas altas (arriba de los 100 °C), se hace necesario incrementar la intensidad de la energía solar. Esto se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (sol) y la superficie absorbidora, que debe ser pequeña comparada con la del dispositivo óptico. Esta es precisamente la función que desempeñan los colectores concentradores. De esta manera, en el absorbedor, podemos tener densidades de energía que van desde 1.5 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico. Con los colectores concentradores de energía solar, se pueden obtener temperaturas entre 100 y 500 °C si se usan colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500 °C si el sistema óptico de los colectores tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500 °C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

3.3.1 TIPOS DE COLECTORES SOLARES.

Los colectores solares térmicos son dispositivos capaces de captar la radiación solar y transmitírsela a un fluido, para su posterior aprovechamiento

Los colectores solares se dividen en dos grandes grupos: **Colectores solares sin concentración y de concentración.**

Los Colectores Solares sin concentración: Los cuales no superan los 70° C aproximadamente, por lo que son usados en las aplicaciones de la energía solar térmica de baja temperatura. Un ejemplo de aplicación sería la producción de agua caliente sanitaria. Estos colectores se caracterizan por no poseer métodos de concentración de energía solar, por lo que la relación entre la superficie del colector y la superficie de absorción es prácticamente la unidad.

- **Colector solar de Placa Plana:** En general un colector de placa plana actúa como un receptor que recoge la energía procedente del Sol y calienta una placa. La energía almacenada en la placa es transferida al fluido. Usualmente, estos colectores poseen una cubierta transparente de vidrio o plástico que aprovecha el efecto invernadero, formado por una serie de tubos de cobre, los cuales expuestos al sol absorben la radiación solar y se la transmiten al fluido que atraviesa su interior. Su aplicación es la producción de agua caliente sanitaria, climatización de piscinas y calefacción.
- **Colectores de Aire:** Son colectores de tipo plano cuya principal característica es tener como fluido caloportador el aire. No tienen una temperatura máxima límite (los procesos convectivos tienen una menor influencia en el aire) y trabajan mejor en condiciones de circulación normal, pero en contraposición poseen una baja capacidad calorífica y el proceso

de transferencia de calor entre placa y fluido es malo. Su aplicación principal es la calefacción.

- **Colectores de Vacío:** Van dotados de una doble cubierta envolvente, herméticamente cerrada, aislada del interior y del exterior, y en la cual se ha hecho el vacío. Su finalidad es la de reducir las pérdidas por convección. Son más caros, además de perder el efecto del vacío con el paso del tiempo. Su aplicación principal es la producción de agua caliente sanitaria y climatización de piscinas.
- **Tubos de Calor:** Poseen una simetría cilíndrica, formados por dos tubos concéntricos; uno exterior de vidrio y uno interior pintado de negro o con pintura selectiva. El fluido circula por el tubo del interno. Su aplicación principal es la calefacción.
- **Colectores Cónicos o esféricos:** Su principal característica es que constituyen simultáneamente la unidad de captación y de almacenamiento. Su superficie de captación es cónica o esférica con una cubierta de vidrio de la misma geometría. Con estas geometrías se consigue que la superficie iluminada a lo largo del día, en ausencia de sombra, sea constante. Su instalación es sencilla, pero presentan problemas de estratificación del agua y la superficie útil de captación es pequeña. Su aplicación principal es la producción de agua caliente sanitaria por medio de **energía solar**.

Colectores Solares de Concentración: Usan sistemas especiales con el fin de aumentar la intensidad de la radiación sobre la superficie absorbente y de este modo conseguir altas temperaturas en el fluido caloportador. La principal complicación que presentan es la necesidad de un sistema de seguimiento para conseguir que el colector esté permanentemente orientado en dirección al Sol.

Este tipo de colectores haciendo uso de los métodos de concentración de la óptica, son capaces de elevar la temperatura de fluido a más de 70° C. Estos se aplican en la energía solar térmica de media y alta temperatura. Podemos encontrar ejemplos de estos en la central solar térmica de Almería (España), en Grenoble (Francia) y en California.

- **Concentradores cilíndricos:** Su superficie reflectora es la mitad de un cilindro. Su aplicación principal es la producción de vapor en una central térmica.
- **Concentradores paraboloideos:** Su superficie reflectora presenta una geometría de paraboloide de revolución. Su aplicación principal es la producción de vapor en una central térmica.



Figura 3.4 Colectores Solares.

3.4 FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR STIRLING.

El principio de funcionamiento es el trabajo hecho por la expansión y contracción de un gas (normalmente helio, hidrógeno, nitrógeno o simplemente aire) al ser obligado a seguir un ciclo de enfriamiento en un foco frío, con lo cual se contrae, y de calentamiento en un foco caliente, con lo cual se expande. Es decir, es necesaria la presencia de una diferencia de temperaturas entre dos focos y se trata de un motor térmico.

Este motor, de gran antigüedad, continúa en investigación gracias a la versatilidad de fuentes de energía utilizables para su funcionamiento, ya que al necesitar solamente una fuente de calor externa al cilindro, es posible usar una gran variedad de fuentes energéticas (energía solar térmica, todo tipo de combustibles, uso de la biomasa, energía geotérmica, etcétera).

El motor Stirling es el único capaz de aproximarse (teóricamente lo alcanza) al rendimiento máximo teórico conocido como rendimiento de Carnot, por lo que, en lo que a rendimiento de motores térmicos se refiere, es la mejor opción. Conviene advertir que no serviría como motor de coche, porque aunque su rendimiento es superior, su potencia es inferior (a igualdad de peso) y el rendimiento óptimo sólo se alcanza a velocidades bajas.

Su ciclo de trabajo se conforma mediante 2 transformaciones isocóricas (calentamiento y enfriamiento a volumen constante) y dos isotermas (compresión y expansión a temperatura constante)

Descripción del funcionamiento

Existe un elemento adicional al motor, llamado regenerador, que, aunque no es indispensable, permite alcanzar mayores rendimientos. El regenerador es un intercambiador de calor interno que tiene la función de absorber y ceder calor en

las evoluciones a volumen constante del ciclo. El regenerador consiste en un medio poroso con conductividad térmica despreciable, que contiene un fluido. El regenerador divide al motor en dos zonas: una zona caliente y otra zona fría. El fluido se desplaza de la zona caliente a la fría durante los diversos ciclos de trabajo, atravesando el regenerador.

Puede emplear 3 o más pistones

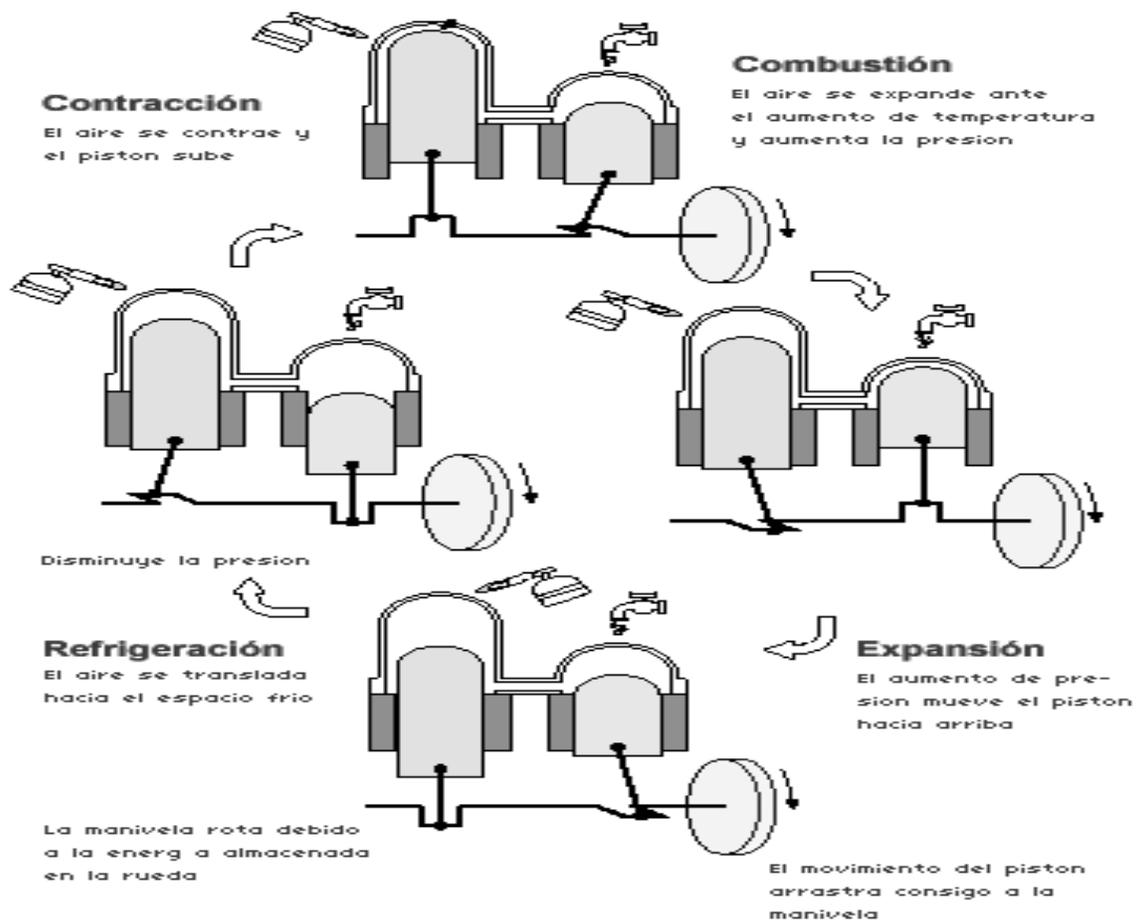


Figura 3.5 Tiempos de trabajo del motor Stirling.

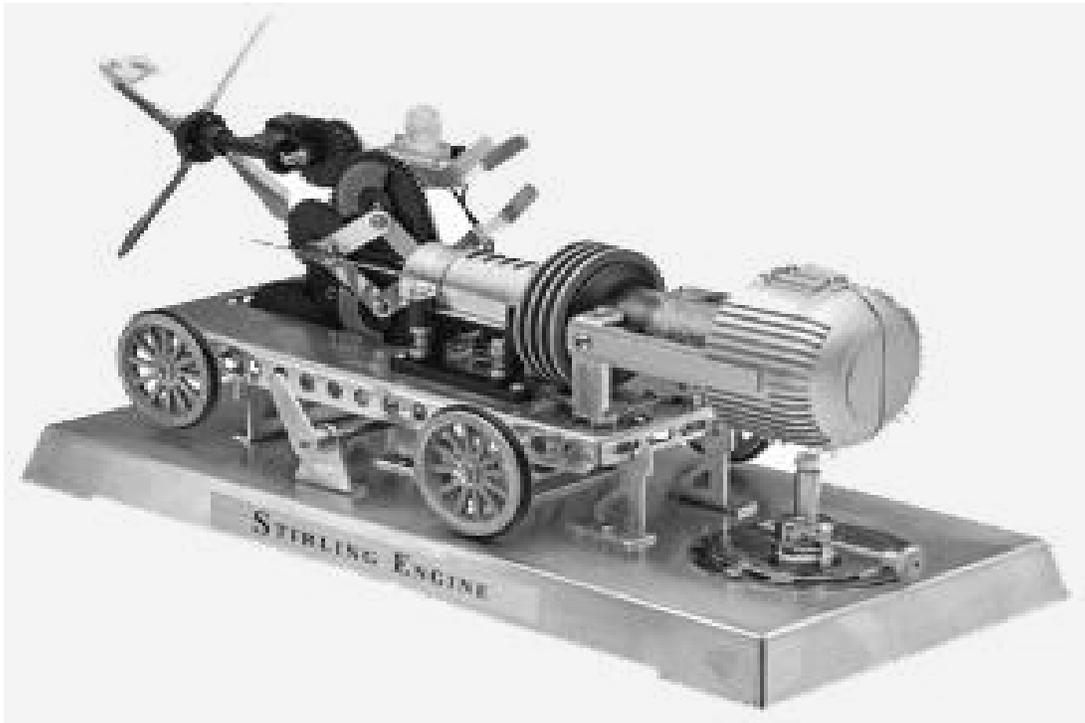


Figura 3.6 Motor Stirling.

3.5 FUNCION DEL GENERADOR ELÉCTRICO.

Un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos, llamados polos, terminales o bornes. Los generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si mecánicamente se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se genera una fuerza electromotriz (F.E.M.).

Se clasifican en dos tipos fundamentales: primarios y secundarios. Son generadores primarios los que convierten en energía eléctrica la energía de otra naturaleza que reciben o de la que disponen inicialmente, mientras que los

secundarios entregan una parte de la energía eléctrica que han recibido previamente.

La función del generador eléctrico en este sistema es la de transformar la energía mecánica entregada por el motor Stirling en energía eléctrica que a su vez será suministrada al electrolizador para separar las moléculas de hidrógeno y oxígeno.

3.6 DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DEL ELECTROLIZADOR.

Para separar el hidrógeno del agua se utiliza un dispositivo llamado electrolizador. A continuación se muestra la estructura de este dispositivo y se describe su funcionamiento.

Una molécula de agua está compuesta por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno esta molécula es también conocida como H_2O .

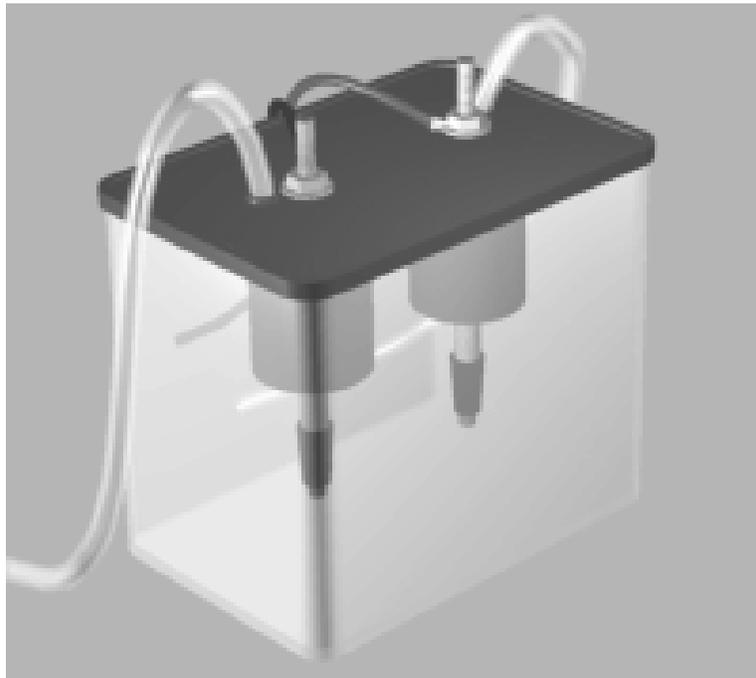


Figura 3.7 Ejemplo de electrolizador.

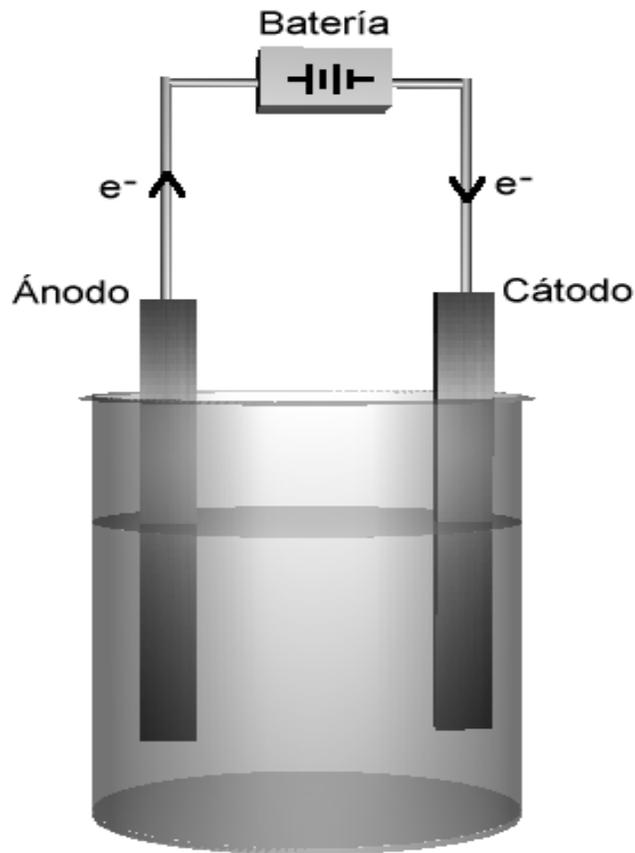


Figura 3.8 Imagen de un electrolizador.

El proceso consiste en lo siguiente:

- Se funde o se disuelve el electrólito en un determinado disolvente, con el fin de que dicha sustancia se separe en iones (ionización).
- Se aplica una corriente eléctrica continua mediante un par de electrodos sumergidos y conectados a una fuente de alimentación eléctrica en la disolución.

- El electrodo conectado al polo negativo se conoce como cátodo, y el conectado al positivo como ánodo.
- Cada electrodo mantiene atraídos a los iones de carga opuesta. Así, los iones negativos, o aniones, son atraídos al ánodo, mientras que los iones positivos, o cationes, se desplazan hacia el cátodo.
- La energía necesaria para separar a los iones e incrementar su concentración en los electrodos es aportada por la fuente de alimentación eléctrica (en nuestro caso el generador eléctrico).
- En los electrodos se produce una transferencia de electrones entre estos y los iones, produciéndose nuevas sustancias. Los iones negativos o aniones ceden electrones al ánodo (+) y los iones positivos o cationes toman electrones del cátodo (-).

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

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

Es importante tomar en cuenta varios puntos:

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

IV.- HIPÓTESIS PARA CREAR UN CICLO DE ENERGÍA RENOVABLE USANDO PILAS DE COMBUSTIBLE CAPAZ DE SATISFACER LA DEMANDA ENERGETICA.

4.1 JUSTIFICACIÓN DE LOS SIGUIENTES ELEMENTOS: CONCENTRADORES SOLARES, MOTOR STIRLING, GENERADOR ELÉCTRICO, ELECTROLIZADOR.

Nuestra investigación tiene como fin presentar a la pila de combustible como el mecanismo que pueda generar electricidad a partir de alguna energía renovable y así poder con el tiempo sustituir el uso de hidrocarburos que hoy en día no solo se encuentran en decadencia sino que además su uso desmedido está destruyendo nuestro planeta.

Toda la investigación está dirigida al uso de la pila de combustible sin embargo a medida que nos fuimos adentrando en esta nueva tecnología fuimos descubriendo detalles que son muy importantes para que la pila de combustible de hidrógeno pueda llegar a competir con el petróleo y el gas natural. Por ejemplo la obtención del hidrógeno que es el combustible de nuestra pila.

Debido a esto creemos que es necesario proponer un sistema capaz de captar alguna de las energías renovables que puedan ayudarnos en la generación de nuestro combustible es por eso que en el capítulo pasado se describieron los elementos que podrían formar este sistema.

Sin embargo es importante aclarar que la descripción de estos elementos y del sistema generador de energía renovable que más adelante se detalla no es la parte fundamental de esta tesis ya que su mención en esta investigación solo pretende ampliar el panorama sobre la aplicación de la pila de combustible puesto que cada uno de estos elementos requiere de una investigación más detallada para su correcto desarrollo y funcionamiento sin embargo creemos que con la

descripción que se dio en el capítulo 3 es suficiente para entender el funcionamiento del sistema generador de energía renovable que se describirá en capítulos posteriores.

En los siguientes puntos de este capítulo se describirán los sistemas de este ciclo que es capaz de obtener hidrógeno a partir del agua.

4.2 ELEMENTOS DEL CICLO.

La hipótesis elaborada requiere de varios elementos además de la pila de combustible para poder ser una idea viable y sustentable. Los elementos a los que se hace referencia son enumerados a continuación:

1. Concentradores solares.
2. Motor Stirling.
3. Generador eléctrico.
4. Electrolizador.
5. Pila de combustible.

Las características y el funcionamiento de la pila de combustible ya se han descrito a lo largo de este trabajo por lo tanto ya no es necesario hablar sobre su funcionamiento y en los siguientes puntos solo se describirán los demás elementos que son necesarios para el funcionamiento de esta hipótesis.

4.3 DESCRIPCION DE LA HIPÓTESIS.

Con la descripción de cada uno de los componentes de esta hipótesis ahora podemos desarrollar la propuesta de un ciclo capaz de generar energía sustentable.

El uso de energía solar para nuestras necesidades eléctricas cotidianas tiene distintas ventajas: evitamos el consumo de recursos naturales y la degradación del medio ambiente que resulta de las emisiones contaminantes, derrames de petróleo, y los productos tóxicos secundarios. Es por eso que esta hipótesis está basada en el aprovechamiento de la energía solar. A continuación se muestra en la figura 4.1 el ciclo cerrado.

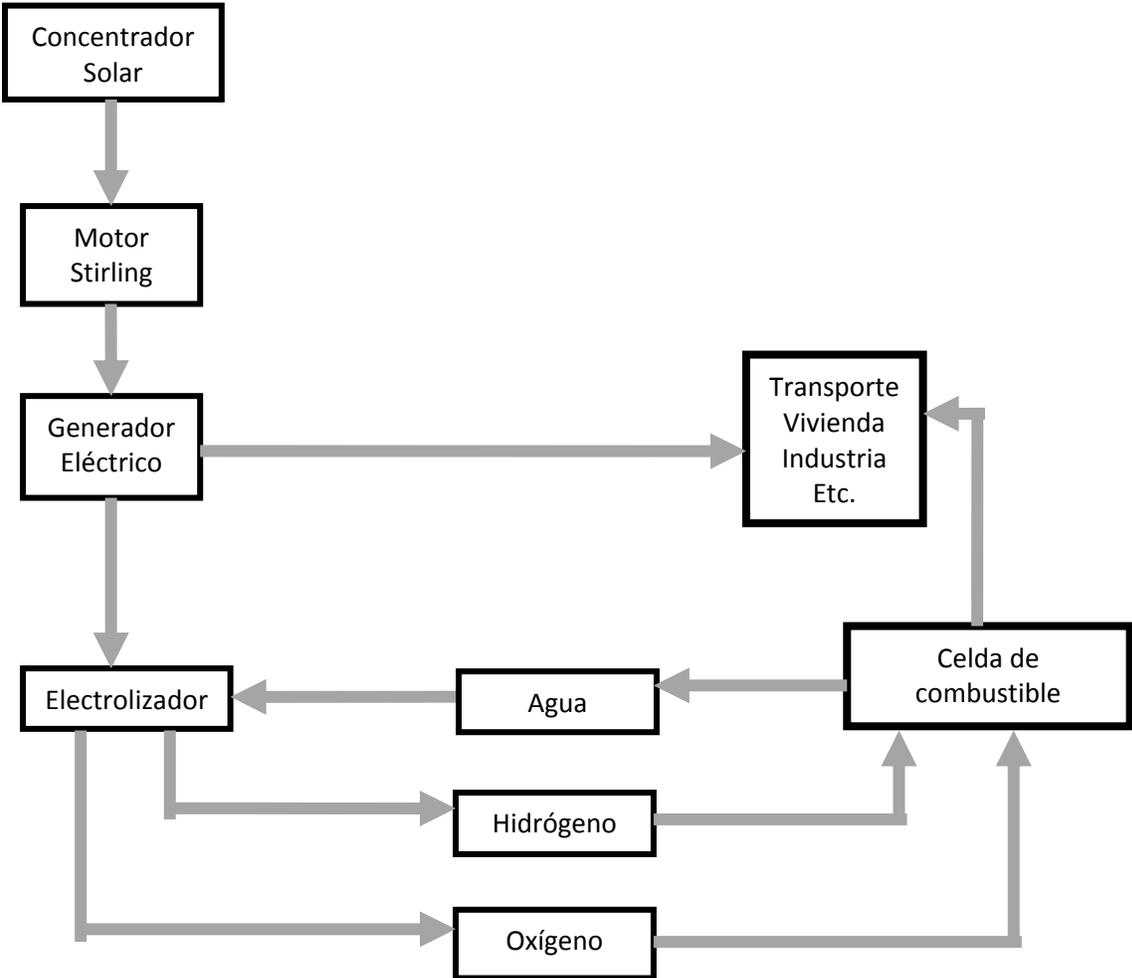


Figura 4.1 Diagrama del ciclo regenerativo propuesto.

La idea que nosotros como ingenieros proponemos es utilizar la energía solar para transformarla en energía eléctrica aprovechando los lugares de nuestro país en los que la captación de energía solar es mayor como los desiertos, las playas, etc. Esta hipótesis se desarrolla en varios pasos que a continuación se describen y que se pueden visualizar en la figura 4.1 para darle seguimiento.

Función del concentrador solar

El primer paso para la transformación de la energía del sol es hacer uso de un concentrador solar que como ya se describió anteriormente es un espejo parabólico de gran diámetro. El concentrador solar realiza seguimiento solar continuo, de manera que los rayos solares son reflejados en su plano focal, obteniéndose así un mapa de energía solar concentrada, de forma gaussiana y varias decenas de kW. Esta energía es después transformada.

En esta parte de nuestra hipótesis es importante apuntar la capacidad del colector solar. Y ponemos como ejemplo que 3 unidades de 7.5 metros de diámetro son capaces de recoger hasta 40KWt de energía.

Función del Motor Stirling y del Generador

El Concentrador solar se encuentra acoplado a un Motor Stirling el cual será capaz de transformar la energía solar captada en energía mecánica y dado que nuestro motor lo tenemos conectado a un generador eléctrico podemos realizar la transformación de esta energía mecánica en electricidad (corriente continua) a partir del sol y que puede ser inyectada en la red eléctrica ó bien destinarla a consumo directo en alguna aplicación próxima al lugar de emplazamiento.

El motor Stirling es un motor de combustión externa que emplea el ciclo termodinámico del mismo nombre y que presenta dos ventajas que le hacen muy adecuado para esta aplicación:

- Es de combustión externa, es decir, el aporte energético puede realizarse mediante la luz solar recogida por el disco parabólico y concentrada en su zona focal.
- Es un ciclo de alto rendimiento termodinámico.

Dado que nuestros 3 colectores solares recogen 40KWt podemos asegurar que un motor Stirling de tipo SOLO V160 es capaz de generar hasta 9 KWe.

Función del Electrolizador

Ya se ha explicado con anterioridad el funcionamiento de un electrolizador, y al igual que los demás componentes de nuestro sistema el electrolizador cumple con una parte muy importante del proceso ya que se encarga de separar del agua las moléculas de hidrógeno y oxígeno mediante la inyección de electricidad que es obtenida en el proceso anterior y a través de la electrolisis podemos obtener hidrógeno y oxígeno que son almacenados por separado para usarlos después como combustible de nuestra pila.

Según la intensidad de la corriente, o sea el volumen de gas a obtener por unidad de tiempo, la tensión de los electrolizadores a presión atmosférica está entre 1.88 y 2.27 V y el consumo de energía por 1 Nm³ H₂ y 0.5 Nm³ obtenidos, está entre 4.5 y 5.45 KWh.

El hidrógeno y oxígeno obtenidos en la electrolisis son almacenados para después ser utilizados, el hidrógeno como combustible de la pila y el oxígeno como carburante. De esta manera obtenemos el elemento principal de nuestra pila de combustible y podemos así construir un ciclo regenerativo el cual funcionara de manera permanente puesto que podremos obtener electricidad directamente del generador eléctrico mientras el sol brille y en las noches o días nublados en los que el sol brilla por su ausencia podremos obtener la energía eléctrica mediante nuestras pilas de combustible.

Hipótesis

Ahora sabemos cuál es el funcionamiento de cada uno de los componentes de nuestro sistema por lo tanto podemos formular nuestra hipótesis describiendo nuevamente el proceso al cual hacemos referencia.

Describiremos esta hipótesis por pasos para facilitar su comprensión:

- Como primer paso por llamarlo de alguna forma tenemos que encontrar la manera de captar la energía luminosa proveniente del sol para después transformarla e incluso almacenarla como ya se mencionara más adelante. Esto podemos lograrlo utilizando concentradores solares parabólicos que sean capaz de captar la mayor cantidad de energía solar.
- Después podemos acoplar un motor Stirling a los concentradores solares y lograr así la transformación de energía solar a energía mecánica.
- Una vez que tenemos energía mecánica gracias al movimiento de los pistones del motor que fue producido por la energía solar debemos una vez más transformar este tipo de energía mediante un generador eléctrico que se encuentra acoplado al motor Stirling y de esta manera podemos aprovechar el movimiento de los pistones para generar electricidad.
- La electricidad (corriente continua) que obtenemos gracias a la operación de estos tres mecanismos (concentrador solar, motor Stirling, generador eléctrico) la podríamos utilizar para autoconsumo en lugares aislados donde no llegue la red eléctrica o muchas más aplicaciones. Sin embargo el uso principal de esta electricidad es usarla en la electrolisis.
- Mediante un electrolizador y utilizando la electricidad generada podremos separar las moléculas de hidrógeno y oxígeno para después almacenarlos y lograr de esta forma almacenar toda la energía que queramos.

- Cuando hablamos de almacenar la energía en esta hipótesis nos referimos a almacenar el hidrógeno que logramos obtener del agua mediante la electrolisis para después utilizarlo como combustible de nuestra pila.
- Con la pila de combustible seremos capaces de transformar todo ese hidrógeno que hemos almacenado en electricidad la cual podrá ser utilizada aun sin la presencia del sol.
- Cabe señalar que lo único que la pila de combustible emitirá al ambiente será agua (H₂O) la cual podrá ser reutilizada para volver a obtener hidrógeno el combustible del futuro.

4.4 RENDIMIENTO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE.

El rendimiento de las pilas de combustible, a diferencia de los motores de combustión (interna y externa) no está limitado por el ciclo de Carnot ya que no siguen un ciclo termodinámico. Por lo tanto, su rendimiento es muy alto en comparación, al convertir energía química en eléctrica directamente. El rendimiento de una celda de combustible η , bajo condiciones estándares está limitado por el cociente entre la variación de la energía libre (estándar) de Gibbs ΔG° , y la variación de la entalpía estándar de la reacción química completa ΔH° . El rendimiento real es igual o normalmente inferior a este valor.

$$\eta = \frac{\Delta G^\circ}{\Delta H^\circ} \quad \dots \text{ecuación (4.1)}$$

Una célula de combustible convierte normalmente la energía química de combustible en electricidad con un rendimiento aproximadamente del 50%. El rendimiento sin embargo depende en gran medida de la corriente que circula a

través de la celda de combustible: cuanto mayor es la corriente, menor el rendimiento. Para una celda de hidrógeno, el rendimiento (energía real/energía teórica) es igual al voltaje de la celda dividido por 1,23 voltios, a una temperatura de 25 °C. Este voltaje depende del combustible usado, de la calidad y de la temperatura de la celda. Una celda que funciona a 0.6 V tiene un rendimiento cercano al 50%, lo que significa que el 50% de la energía contenida en el hidrógeno es convertida en energía eléctrica.

Una celda de combustible y un electrolizador devuelve menos del 50 por ciento de la energía de entrada (esto se conoce como eficacia del proceso reversible), mientras que una batería de plomo y ácido mucho más barata puede devolver cerca de 90 por ciento.

Hay que considerar también las pérdidas debidas a la producción, al transporte y al almacenaje. Los vehículos con célula de combustible que funcionan con hidrógeno comprimido tienen una eficiencia del 22% si el hidrógeno se almacena como gas a alta presión, y del 17% si se almacena como hidrógeno líquido.

Las celdas de combustible no pueden almacenar energía como una batería, sino que en algunos usos, como centrales eléctricas independientes basadas en fuentes "discontinuas" (solares, energía del viento), se combinan con electrolizadores y sistemas de almacenaje para formar un conjunto para almacenar esta energía. El rendimiento del proceso reversible (de electricidad al hidrógeno y de nuevo a electricidad) de tales plantas se encuentra entre el 30 y el 40%.

En "usos combinados de calor y de energía" (cogeneración), para aplicaciones donde también se requiere energía calorífica, se acepta un rendimiento más bajo de la conversión de combustible a electricidad (típicamente 15-20%), porque la mayoría de la energía no convertida en electricidad se utiliza como calor. Se pierde algo de calor con los gases que salen de la célula como ocurre en cualquier

caldera convencional, por lo que con esta producción combinada de energía térmica y de energía eléctrica la eficacia sigue siendo más baja de 100%, normalmente alrededor del 80%. En términos de energía sin embargo, el proceso es ineficaz, y se obtendrían mejores resultados energéticos maximizando la electricidad generada y después usando la electricidad para hacer funcionar una bomba de calor.

4.5 CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.

- **Costes.** En 2002, las celdas típicas tenían un coste debido al catalizador de 850 € (aprox. 1000 USD) por kilovatio energía eléctrica útil; sin embargo, se espera que antes de 2010, sea reducida a unos 25 € (aprox. 30 USD) por kilovatio. Ballard ha conseguido, gracias a un catalizador mejorado con seda de carbono (*carbon silk*), una reducción del 30% (1 mg/cm² a 0,7 mg/cm²) de la cantidad de platino sin una reducción en rendimiento (información de 2005). Los costes MEA (del inglés *Membrane Electrode Assembly*, o montaje del electrodo de la membrana) del PEM (membrana intercambiadora de protones) varían según el fabricante. Así, la membrana de Nafion de aprox. 400 €/m² utilizada en la membrana PEM de Toyota y 3M está siendo substituida por la membrana de la ITM Power, con un precio alrededor de 4 €/m² (2004). Esta membrana nueva es un hidrocarburo-polímero. Una compañía holandesa que ha realizado grandes inversiones en este terreno está utilizando Solupor (un film de polietileno poroso).
- **Gestión del agua en las PEMFC.** En este tipo de celdas de combustible, la membrana debe hidratarse, requiriendo evaporar el agua exactamente en la misma medida en que ésta es producida. Si el agua se evapora demasiado rápido, la membrana se seca, la resistencia a través de ella aumenta, y se agrietará, creando un "corto circuito" de gas donde el hidrógeno y el oxígeno se combinan directamente, generando calor que dañará la celda de

combustible. Si el agua se evapora demasiado lentamente, los electrodos se inundarán, evitando que los reactivos puedan alcanzar el catalizador y se parará la reacción. Uno de los objetivos más importantes en la investigación sobre células de combustible es la adecuada gestión del agua.

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

CONCLUSIONES

Con la realización de esta investigación ahora conocemos más sobre esta nueva tecnología que con un amplio apoyo para su investigación y desarrollo podría ser capaz de satisfacer las necesidades en materia de energía de no solo un país si no de todo el mundo. Esta tesis nos ha arrojado las siguientes conclusiones.

- Sabemos que una pila de combustible es un dispositivo electroquímico capaz de convertir directamente la energía química de un combustible, alimentado ininterrumpidamente en energía eléctrica (corriente continua).
- Ahora somos capaces de distinguir entre los diferentes tipos de pilas la que mejor se adapte a nuestras necesidades.
- Se han conocido todos y cada uno de los elementos de la pila de combustible así como los mejores materiales para la construcción de las partes.
- Las pilas de combustible son la herramienta para producir energía eléctrica del futuro y en esta tesis se han conocido muchos de sus posibles usos.
- Conocemos el funcionamiento de una pila de combustible.
- El hidrógeno es el combustible del futuro y por lo tanto también de nuestras pilas de combustible y en esta tesis pudimos conocer más sobre este gas.
- También hemos podido conocer las diferentes formas de obtención de hidrógeno.
- Además de las pilas de combustible ahora conocemos otros dispositivos como el motor Stirling, los concentradores solares, el electrolizador que aunque no se describen es su totalidad si se dio a conocer sus principales características.
- Se desarrollo un ciclo capaz de generar y almacenar energía eléctrica.
- Con el uso de las pilas de combustible se podría reducir la emisión de gases que provocan el efecto invernadero.

GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS

ENERGÍA EÓLICA: Es la energía obtenida del viento, o sea, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas. El término eólico viene del latín *Aeolicus*, perteneciente o relativo a Eolo, dios de los vientos en la mitología griega.

ENERGÍA GEOTÉRMICA: Es aquella energía que puede ser obtenida por el hombre mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra.

BIOMASA: Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. La biomasa puede recuperarse quemándola directamente o transformándola en combustible.

HIDROCARBUROS: Son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. Consisten en un armazón de carbono al que se unen átomos de hidrógeno.

CATÁLISIS: Es el proceso por el cual se aumenta o disminuye la velocidad de una reacción química por medio de una sustancia química conocida como un catalizador.

PROTOTIPO: Es un ejemplar original o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa.

ELECTROLITO: Es cualquier sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico. Debido a que generalmente consisten de iones en solución, los electrólitos también son conocidos como soluciones iónicas.

CATIÓN: Es un ion (sea átomo o molécula) con carga eléctrica positiva, esto es, con defecto de electrones. Los cationes se describen con un estado de oxidación positivo.

ANIÓN: Es un ion (sea átomo o molécula) con carga eléctrica negativa, es decir, con exceso de electrones. Los aniones se describen con un estado de oxidación negativo.

COGENERACIÓN: Es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente sanitaria, hielo, agua fría, aire frío, por ejemplo).

La ventaja de la cogeneración es su mayor eficiencia energética ya que se aprovecha tanto el calor como la energía mecánica o eléctrica de un único proceso, en vez de utilizar una central eléctrica convencional y para las necesidades calor una caldera convencional.

SINTERIZACIÓN: Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.

REACCIÓN EXOTÉRMICA: Reacción química que desprende calor, es decir con una variación negativa de entalpía. Se da principalmente en las reacciones de oxidación. Cuando ésta es intensa puede dar lugar al fuego.

REACCIÓN ENDOTÉRMICA: Cualquier reacción química que absorbe calor.

PROCESO ISOTÉRMICO: Se denomina proceso isotérmico o proceso isotermino al cambio de temperatura reversible en un sistema termodinámico, siendo dicho cambio de temperatura constante en todo el sistema.

NANOTECNOLOGÍA: Es un campo de las ciencias aplicadas dedicado al control y manipulación de la materia a una escala menor que un micrómetro, es decir, a nivel de átomos y moléculas (nano materiales). Lo más habitual es que tal manipulación se produzca en un rango de entre uno y cien nanómetros.

POLIMERO: son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

ÁNODO: Se denomina ánodo al electrodo positivo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones negativos dentro del electrolito, que por esto reciben el nombre de *aniones*.

CÁTODO: Se denomina cátodo al electrodo negativo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones positivos, que por esto reciben el nombre de *cationes*.

IÓN: Es una partícula cargada constituida por un átomo o conjunto de átomos neutros que ganaron o perdieron electrones, fenómeno que se conoce como ionización.

POTASA CAUSTICA: Es un compuesto químico inorgánico de fórmula KOH, también conocido como hidróxido de potasio.

ANAEROBIO: Los organismos anaerobios o anaeróbicos son los que no utilizan oxígeno (O₂) en su metabolismo, más exactamente que el aceptor final de electrones es otra sustancia diferente del oxígeno. Si el aceptor de electrones es una molécula orgánica (piruvato, acetaldehído, etc.) se trata de metabolismo fermentativo; si el aceptor final es una molécula inorgánica distinta del oxígeno (sulfato, carbonato, etc.) se trata de respiración anaeróbica.

BIBLIOGRAFÍA

CHANG; “Química”; Editorial Mc Graw Hill; 2000

HOFFMAN Peter; “Tomorrow’s Energy”; The MIT Press; pp. 1-141; 2002.

HORDESKI, Michael Frank; “Alternative Fuels: The Future of Hydrogen”, The Fairmont Press; pp. 123-149, 191-221; 2002.

HORTAL Mario Aguer, BARRERAS Miranda L. Ángel; “El Hidrógeno: Fundamento de un Futuro Equilibrado; Ediciones Díaz de Santos; pp. 115-312; 2005.

JUSTI W. Eduard; “Hidrógeno Solar”; Editorial MARCOMBO; pp. 31-40, 119-154, 227-249, 253-272; 1985.

LÓPEZ Sastre Juan A., DÍAZ García J. Israel y ROMERO – ÁVILA García Cristina; “La Pila de Combustible”; Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial Universidad de Valladolid; pp. 11-100, 120-300; 2004.

RIFKIN Jeremy; “La economía del Hidrógeno”; Editorial Paidós; pp. 153-263; 2002.

SORENSEN Bent; “Hydrogen and Fuel Cells”; Elsevier Academic Press”; pp. 1-70, 113-206; 2005.

VIELSTICH Wolf; “Células de Combustión”; Ediciones URMO; pp. 19-34, 34-62, 65-161, 167-280; 1973.

WEIDLICH Erhard; “Constitución y Funcionamiento de las Pilas de Combustible”; Editorial MARCOMBO; pp. 5-68; 1990.