

CAPÍTULO 4.

CELIDAS DE COMBUSTIBLE PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA EN ESTACIONES SENSORAS DE CAMPO.

4.1 Introducción.

Como se analizó en el capítulo anterior las celdas de combustible que utilizan hidrógeno como combustible, y se establece que estas representan una alternativa muy viable para el suministro de energía eléctrica. Actualmente se consiguen de manera comercial y tienen bastantes aplicaciones en muchos rubros de la industria.

Para aplicaciones que están directamente relacionadas con las radiocomunicaciones, han dado resultados muy atractivos que han permitido dejar los sistemas convencionales que se utilizan como respaldo y para generación de energía en sistemas aislados. En México ya se está haciendo uso de esta tecnología principalmente por parte de compañías de telefonía celular y de televisión. Se propone la utilización de las celdas de combustible, para mejorar y garantizar la operación del sistema de alerta sísmica, pues las comunicaciones que se manejan al igual que el monitoreo del suelo tienen que ser ininterrumpidos sin importar hora, fecha y época del año.

4.2 Principios de operación de celdas de combustible.

Una celda de combustible también llamada célula o pila de combustible es un dispositivo de energía similar a una batería, pero se diferencia de esta última en que está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los elementos 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 se puede tener en una batería convencional. Además los electrodos en una batería reaccionan y cambian según cómo esté su nivel de carga; en cambio en una celda de combustible los electrodos se comportan relativamente estables.

Los reactivos típicos utilizados en una celda de combustible son hidrógeno en el lado del ánodo y oxígeno en el lado del cátodo. Por otra parte las baterías convencionales consumen reactivos sólidos y una vez que se han agotado, deben ser eliminadas o recargadas con electricidad. Generalmente los reactivos fluyen hacia adentro y los productos de la reacción fluyen hacia fuera. La operación a largo plazo virtualmente continua es factible mientras se mantengan estos flujos.

Las celdas de combustible se desarrollaron para aplicaciones militares principalmente, y espaciales en los Estados Unidos desde la década de los 60. Las naves Géminis y Apolo utilizaron dicha tecnología y en la actualidad son utilizadas en el “*Space Shuttle*” para generar agua. Los primeros desarrollos de celdas de combustible datan del siglo XIX, varios son los científicos que desarrollan diferentes propuestas destacando W. R. Grove, F. W. Ostwald, W.W. Jacques. E. Baurt, F.T. Bacon, entre otros [1].

La figura 4.1 muestra los elementos que entran a la celda de combustible y como resultado a la salida se obtiene una corriente directa y los residuos producidos durante el proceso que son vapor caliente y agua.

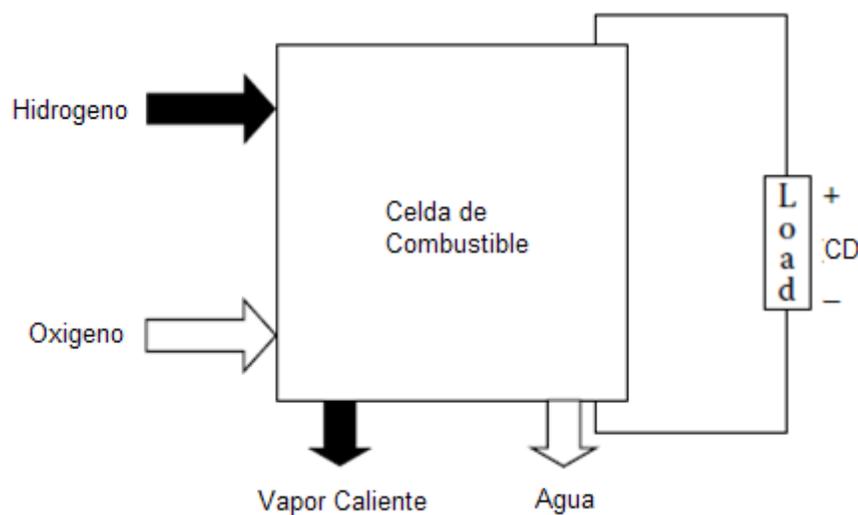


Figura 5.1 Diagrama de una Celda de combustible con sus entradas y salidas [1].

En principio, una celda de combustible opera como una batería, combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente, sin realizar un proceso de combustión, evitando la generación de emisiones nocivas como, elementos particulados y óxidos de nitrógeno y azufre (NO_x y SO_x) los cuales contribuyen a la formación de la denominada lluvia ácida.

4.3 Tipos de celdas de combustible.

Actualmente existen diversos tipos de celdas de combustible:

Entre las cuales destacan:

- a) PAFC: celda de combustible de Acido Fosfórico
- b) PEMFC: celda de combustible de Membrana de Intercambio Protónico
- c) MCFC: celda de combustible de Carbonato Fundido
- d) SOFC: celda de combustible de Oxido Sólido
- e) Tipo Alcalinas

f) Otras

Dichas tecnologías se encuentran con diferente grado de desarrollo pre-comercial; utilizan diversos combustibles, como gas natural, hidrógeno, Gas LP, etc., diferentes electrolitos entre otras diferencias. Cada una de estas tecnologías tiende a ser más apropiada para ciertas aplicaciones en específico.

a) PAFC: celda de combustible de Acido Fosfórico

Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y que además ya se encuentra en uso con aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria.

Las Celdas de Combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia, y cerca del 85%, si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración comparado con el 30% de la máquina más eficiente de combustión interna [2]. Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 400°F. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras.

b) PEMFC: celda de combustible de Membrana de Intercambio Protónico

Tipo Polímero Sólido ó Membrana de Intercambio Protónico (PEM). Estas celdas operan a relativamente bajas temperaturas (unos 200°F), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como en el caso de automóviles. De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios, y potencialmente para otras aplicaciones mucho más pequeñas como el reemplazamiento de baterías recargables en vídeo cámaras.

c) MCFC: celda de combustible de Carbonato Fundido

Tipo Carbonato Fundido. Estas celdas prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles base carbón. Esta celda opera a temperaturas del orden de los 1,200 °F. La primera pila de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo terminadas para su prueba en California Estados Unidos.

d) SOFC: celda de combustible de Oxido Sólido

Tipo Óxido Sólido (SOFCs). Otra Celda de Combustible altamente prometedor, la Celda de Combustible de Óxido Sólido, podría ser usada en aplicaciones grandes, de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de

estas en vehículos. Una prueba de 100kW está siendo terminada en Europa mientras que dos pequeñas unidades de 25kW se encuentran ya en línea en Japón. Un sistema de Óxido Sólido normalmente utiliza un material duro cerámico, en lugar de un electrólito líquido permitiendo que la temperatura de operación alcance los 1,800 °F. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60%. Un tipo de Celda de Combustible de Óxido Sólido utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido.

e) Tipo Alcalinas

Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrólito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales, pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación.

f) Otras celdas de Combustible.

Nuevos miembros de la familia de Celdas de Combustible, tales como las de Metanol Directo, pueden surgir como resultados de trabajos que se han venido llevando a cabo en laboratorios privados y gubernamentales.

4.4 Ventajas de las Celdas de Combustible tipo PEMFC.

Las PEMFC son aptas para aplicaciones residenciales, comerciales, de transporte y pequeña industria. Especialmente donde además de utilizar la energía eléctrica producida, se pueden aprovechar el calor producido durante su funcionamiento. Estas aplicaciones donde se combina el uso de energía eléctrica y agua caliente, las denominadas CHP por sus siglas en inglés se refieren a la generación de múltiples formas de energía en un sistema en este caso, calor y potencia [2].

Actualmente están teniendo muchas aplicaciones en las comunicaciones pues por las características presentadas por este tipo de celda, son aptas para cubrir las necesidades energéticas por ejemplo de una estación de repetición celular o de televisión.

4.4.1 Beneficios de las PEMFC:

1. Independencia: el usuario o consumidor dispondrá de “*back up*” (emergencia en caso de falla de la red) ó podrá generar su propia energía eléctrica de acuerdo a sus propios requerimientos.
2. Confiabilidad: al no existir partes móviles se reducen los mantenimientos y causas de fallas.

3. Aprovechamiento de calor: es posible incrementar la eficiencia energética utilizando sistemas de cogeneración.
4. Preservación del Medio Ambiente: prácticamente no se produce material nocivo, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno ni óxidos de azufre. Utilizando hidrógeno el dióxido de carbono generado es aproximadamente la mitad del producido, a igual potencia, por un equipo que funcione a carbón o un combustible derivado de petróleo. Al no poseer partes móviles estos sistemas son silenciosos y requieren bajo mantenimiento.

4.5 Principio de Operación de las PEMFC.

Una celda de combustible PEM, consiste en dos electrodos: el ánodo electrodo combustible, y el cátodo electrodo oxidante, separados por un electrolito (la membrana). Cuando el hidrógeno ingresa al sistema, las propiedades catalíticas de la superficie de la membrana liberan electrones y protones de las moléculas de hidrógeno. La membrana tiene la propiedad de ser permeable a los protones, por lo que la atraviesan y forman agua al reaccionar con el oxígeno del aire (lado catódico); los electrones que no pueden atravesar la membrana, dan lugar a una corriente continua CD. Este proceso además de producir corriente eléctrica genera agua caliente y calor.

La parte medular de este tipo de celda está constituido por el conjunto membrana-electrodo (CME). Éste está constituido por dos capas difusoras de gas con dos láminas bipolares en cada lado. Las propiedades catalizadoras de este conjunto produce la división de las moléculas de hidrógeno y oxígeno, se basan en las propiedades de metales preciosos, como el platino, depositados en ella. La figura 4.2 muestra el interior de una celda de combustible.

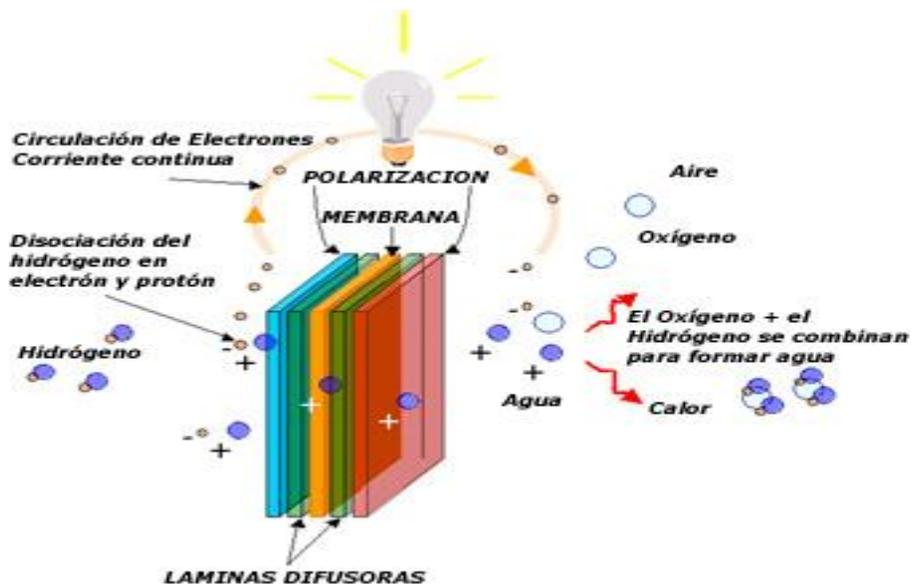


Figura 4.2 Aspectos de la membrana de la Celda de Combustible tipo PEM.

Para generar las cantidades necesarias utilizables de corriente se coloca un arreglo sucesivo de CME, conformando el denominado “*stack*”, banco de baterías. Mediante esta configuración se alcanza la potencia (tensión y corriente eléctrica) requerida.

4.5.1 Principales componentes de la PEMFC.

Comúnmente este tipo de celdas esta conformada por los siguientes elementos:

- Reformador
- Banco de baterías
- Acondicionador de energía
- Sistema de control

La figura 4.3 muestra las partes que conforman las celdas tipo PEMFC.

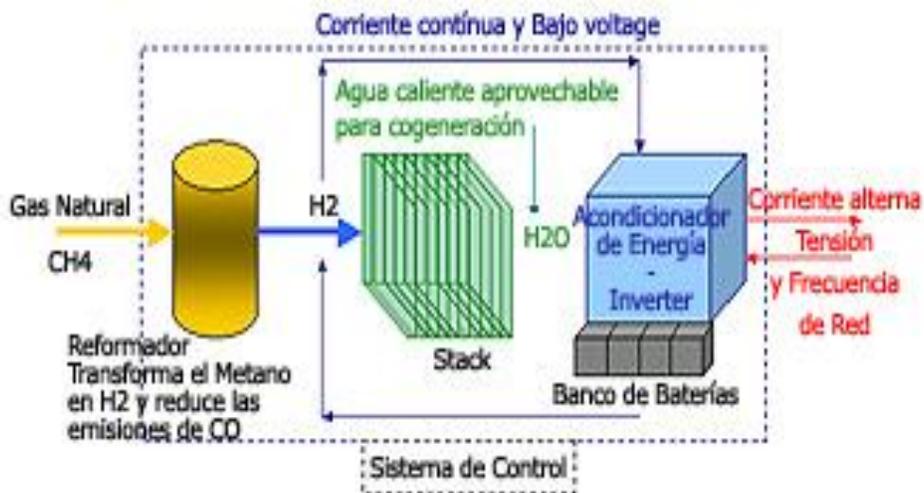


Figura 4.3 Componentes de la Ceda tipo PEM para el caso que utiliza gas natural.

En el reformador ingresa el combustible (gas natural) y produce un gas altamente rico en hidrógeno denominado “reformado”, mediante una transformación química.

El contenido de monóxido de carbono que se posee en el reformado se reduce a niveles aceptables (menores a 50 partes por millón), mediante una unidad acondicionadora.

Posteriormente el hidrógeno ingresa al sistema (“*stack*”) iniciándose el proceso de generación de corriente continua.

Esta corriente continua circula por el acondicionador de energía, denominado inversor, el cual transforma la corriente continua en corriente alterna, a valores de tensión y de frecuencia requeridos para nuestras aplicaciones.

Este acondicionador incluye también un conjunto de baterías, que permiten estabilizar el suministro de energía, ante variaciones instantáneas de la carga.

4.6 Aplicaciones.

Las celdas de combustible tipo PEMFC, pueden ser utilizadas en todo tipo de sistemas e instalaciones estacionarias, transportables o móviles (portátiles), que requieran energía eléctrica para su funcionamiento. Y en el presente trabajo se propone su utilización en un sistema aislado, como es el caso del Sistema de Alerta Sísmica para que cubra con el requerimiento energético de las estaciones y así garantice su correcto funcionamiento.

En un corto plazo veremos aplicaciones de micro celdas de combustible accionadas por metanol u otros combustibles, en teléfonos celulares, relojes, laptops, bicicletas motorizadas, etc., pasando por las tecnologías para uso residencial, comercial e industrial y en un futuro aplicadas en centrales de generación de energía eléctrica.

4.6.1 Celdas de combustible en vehículos.

Los automóviles movidos mediante celdas de combustibles se encuentran en una etapa de desarrollo temprana comparados con los automóviles eléctricos movidos con baterías, pero se consideran como una alternativa muy atractiva. Los primeros ofrecen las ventajas de un automóvil eléctrico provisto de baterías, pero pueden ser reabastecidos de combustible muy rápidamente y su autonomía es mayor que los que utilizan baterías.

Además, los automóviles con celdas de combustible producirían menos emisiones de gases que producen efecto invernadero. Informes de Daimler-Benz y General Motors concluyen que pueden resolverse los problemas técnicos fundamentales asociados al uso de celdas de combustible y que este tipo de motores podrían construirse casi por el mismo precio que los de combustión interna.

Mercedes-Benz lanzo su primer coche basado en tecnología de celdas de combustible, se lanzó en California, Estados Unidos, a partir del mes de diciembre de 2010. Se planeó un esquema en el que el coche es ofrecido en arrendamiento, el nombre del vehículo es F-Cell, no se tiene el costo exacto del vehículo pero se calcula que esta entre los US\$600 y US\$800 por mes [3]. La empresa afirma que la celda ofrece una eficiencia de 64 Km por Kg de hidrógeno. El tanque del F-Cell lleva 3,7 kilogramos de hidrógeno en tanques presurizados a 10.000 ISP, así como un motor eléctrico de 134 hp.

Como ventajas del uso de celdas de combustible en vehículos se pueden citar: un sistema de transporte más limpio, motores más eficientes que los convencionales de combustión interna y posibilidad de recorrer más distancia sin repostar.

Para la industria automotriz es un caso de análisis el tipo de combustible a utilizar en el automóvil y su almacenamiento. Se están considerando principalmente tres combustibles: hidrógeno, metanol y gasolina.

Actualmente no se considera un combustible único como en el caso de los motores de combustión interna sino que dependerá de la región geográfica. Las emisiones van a depender del tipo de combustible y del sistema de reformado que se utilice. Si se utiliza hidrógeno directamente como combustible, por ser el sistema que menor contaminación produce, se requerirá de un almacenamiento de este producto a bordo de los vehículos. Es la opción más factible por los expertos en este momento, y donde se han de hacer los mayores esfuerzos en investigación y desarrollo.

Uno de los problemas del almacenamiento del hidrógeno, es que ocupa un espacio significativo. Para resolver este problema podemos almacenar el gas a alta presión; por otro lado si se considera el uso del hidrógeno de forma directa, éste podría ser almacenado en

las estaciones de servicio o construir estas fábricas de electrólisis para producir el hidrógeno y así poder abastecerse directamente de la planta generadora.

Otra alternativa es descomponiendo sustancias para obtener el hidrógeno, y en este caso no es necesario llevar éste en los vehículos, de forma que este sistema de propulsión se hace más seguro. El uso de otros combustibles requiere pequeñas plantas de reformado en el vehículo que conlleva espacio y peso.

Las compañías que fabrican celdas de combustible junto con las compañías petroleras están tratando de desarrollar formas de descomponer sustancias como el metanol, para obtener el hidrógeno necesario para hacer funcionar los automóviles. Los vehículos que utilizan metanol en vez de hidrógeno puro, no se pueden considerar de emisión cero debido a que liberan pequeñas cantidades de CO y CO₂. Existe una gran oposición a la utilización de hidrógeno por cuestiones de seguridad. De cualquier forma podría cubrir el intervalo hasta que se construyera una red de distribución de hidrógeno.

Si se obtiene el hidrógeno en el propio vehículo a partir de gasolina la transición sería mucho más suave, ya que únicamente sería necesario hacer algunos cambios en la infraestructura actual, y no habría que montar una infraestructura de metano, que quedaría obsoleta en algunos años. La gasolina no podría ser la misma que se utiliza actualmente ya que ésta tiene algunos aditivos que habría que eliminar.

Una de las complicaciones principales del reformado de la gasolina, es que se trata de un proceso complicado ya que ha de hacerse a temperaturas de entre 850°-1000°C. Además se debe considerar, que el utilizar reformadores, en los coches también significa que la eficiencia de estos elementos baja de un 90% a un 80 ú 85%.

Otra alternativa es la utilización de materiales que absorban hidrógeno, en su estructura cristalina (Metal Hydrides) o incorporarlo químicamente (ChemicalHydrides), para tener el combustible cuando se necesite. También se estudia el uso de nanoestructuras de carbono. Uno de los problemas a resolver en los sistemas de celdas de combustible en los vehículos, es la necesidad de tener un radiador mucho más grande, que uno convencional para un motor de combustión interna. Esto se debe a que más de un 80% del calor generado, debe ser liberado a través del radiador (un 33% en el caso de un motor de combustión interna). Sobre el precio, en este momento una celda de combustible tipo PEM cuesta unos US\$ 500, por kW lo que significa que un motor para automoción costará unos US\$25,000, esto es unas 7 veces el costo de un motor convencional de combustión interna (US\$ 3,500).

4.6.2 Uso doméstico e industrial.

Para uso doméstico las celdas de combustible pueden utilizarse no solo para producir electricidad sino también para calefacción, dado que únicamente entre un 40 y un 45% del combustible se convierte en electricidad y el resto se convierte en calor.

Compañías como la Hydrogen Burner Technology of Long Beach, CA, [4] están trabajando en celdas de combustible a partir de gas natural, fuel-oil, o gasolina para producir electricidad. Las unidades actuales producen de 2 a 10 kW y generan el suficiente calor para calefacción y agua caliente. Estas unidades no contienen partes móviles y no requieren mantenimiento. Tienen una eficiencia global del 90%.

Estos sistemas de celdas de combustible como se menciona en la página electrónica de la empresa, se tengan disponibles comercialmente con un costo entre US\$3,600 y US\$7200. El costo de combustible es de unos US\$ 7 por kW usando gas natural (dependiendo de la región donde se compre).

En la industria, la New York Power Authority (NYPA) está utilizando una celda de combustible para proveer de energía la Comisaría de Policía de esa ciudad. Utiliza gas natural como combustible. El sistema se utiliza para generar electricidad y calor y también carga los coches patrulla eléctricos.

Actualmente también se está trabajando en el desarrollo de celdas de combustible suficientemente pequeñas para utilizarlas en teléfonos móviles y computadoras portátiles. Estas nuevas celdas tendrán una capacidad de energía unas 50 veces mayor que las actuales baterías de NiCd. Esto significa que un teléfono móvil podría permanecer en Stanby hasta 40 días o en conversación más de 200 horas. Para la recarga de estas unidades bastaría con inyectar metanol dentro de la celda [2]. La vida útil de las baterías sería de 4 años.

Otro campo donde se están probando las celdas de combustible es en el terreno militar. El Departamento de Defensa Americano las está utilizando para proveer de calor y energía a algunas de sus bases. Por otro lado las celdas de combustible son interesantes para su uso en vehículos militares debido a que son silenciosas, flexibles, y operan a bajas temperaturas. También están siendo desarrolladas para submarinos, barcos, y otros usos militares.

4.7 Aplicación al SASO

El uso de la energía solar para nuestras necesidades eléctricas cotidianas en las estaciones sensoras de campo, tiene distintas ventajas entre otras, se evita el consumo de recursos naturales y la degradación del medio ambiente. Sin embargo existe una desventaja en la energía solar, el sol no brilla constantemente. Por lo tanto se requiere de un método que

permita almacenar la energía solar para utilizarla cuando no haya sol. El hidrógeno provee un método seguro, eficiente y sano para hacerlo.

El ciclo del hidrógeno funciona así: La electricidad producida por los paneles solares opera un equipo de electrolisis que divide el agua H_2O , en sus 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 [5].

En la noche cuando el sol no proporciona energía solar, el hidrógeno se combina nuevamente con el oxígeno del aire en una celda de combustible, una planta de energía electroquímica que convierte en electricidad la energía química contenida en el hidrógeno. El único subproducto que resulta de este proceso es agua pura.

La electricidad producida por las celdas de combustible se puede utilizar para las mismas necesidades que se cubren con el sistema fotovoltaico e incluso se puede utilizar para la operación de otros elementos que se deseen utilizar en la ESDECA. El hidrógeno solar nos permite utilizar la energía solar las 24 horas del día, y nos provee de un recurso energético abundante, sano para el medio ambiente, eficiente y producido localmente, sin la necesidad de transportar el hidrógeno desde una planta de generación, hasta el sitio donde se encuentra la estación de campo.

Esta es una posibilidad muy factible de poder proveer el hidrógeno y que complementaría el sistema de suministro energético actual.

4.8 Dimensionamiento de las Celdas de Combustible.

4.8.1 Valores de tensión.

La tensión de la celda depende de la corriente de carga. La tensión en circuito abierto es de aproximadamente 1.2 Volts; para crear suficiente tensión las celdas son agrupadas, combinándolas en serie y en paralelo, en lo que en inglés se denomina “*Fuel CellStack*” (Pila de Celda de Combustible). El número de celdas usadas varía según el diseño y el requerimiento que se demande.

4.8.2 Parámetros de diseño.

- a) 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 daña la celda de combustible. Si el agua se evapora demasiado lento, los electrodos se inundarán, evitando que los reactivos puedan alcanzar el

catalizador y se interrumpirá la reacción. Unos de los objetivos más importantes en la investigación sobre celdas de combustible es la adecuada gestión del agua.

- b) Temperatura. Se debe mantener la misma temperatura en toda la celda para evitar la destrucción de la celda por fatiga térmica.
- c) Control del flujo. Al igual que en una máquina de motor de combustión, hay que mantener una relación constante entre el reactivo y el oxígeno para que la celda funcione correctamente.
- d) Durabilidad y otros requerimientos. Para ciertos tipos de celdas, los usos estacionarios requieren normalmente más de 40 000 horas operativas fiables a una temperatura de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que las celdas de combustible para automoción requieren al menos 5000 horas (el equivalente a unos 200 000 kilómetros) bajo temperaturas extremas. Las aplicaciones para automoción deben además permitir el arranque en frío hasta de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y poseer una alta potencia por unidad de volumen (típicamente 2.5 kW por litro).

4.9 Rendimiento de las celdas de combustible.

El rendimiento de las celdas de combustible, a diferencia de los motores de combustión interna y externa, no se ve limitado por el ciclo de Carnot, ya que no sigue un ciclo termodinámico. Por lo tanto, su rendimiento es muy alto en comparación con éstos, al convertir energía química en eléctrica directamente [6]. El Ciclo de Carnot es el sistema más eficiente para la conversión de la energía.

El rendimiento de una celda de combustible n , 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 ese valor.

$$n = \frac{\Delta G^{\circ}}{\Delta H^{\circ}} \quad (4.1)$$

Donde:

n Es el rendimiento de la celda de combustible.

ΔG° Es el incremento de la energía libre de Gibbs.

ΔH° Es el incremento en la entalpía.

Una celda 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 es el rendimiento. Para una celda de hidrógeno, el rendimiento (energía real/energía teórica), es igual a la tensión de la celda dividida por 1.23

Volts, a una temperatura de 25 °C. Esta tensión depende del combustible usado, de la calidad y de la temperatura de la celda. Una celda que funcione a 0.6 Volts, tendrá un rendimiento cercano al 50% lo que significa que el 50% de la energía contenida en el hidrógeno es convertida en energía eléctrica.

Una celda de combustible y un electrolizador devuelven menos del 50% de energía de entrada (esto es conocido como eficacia del proceso reversible), mientras que una batería de plomo y ácido mucho más barata pueden devolver cerca del 90 por ciento.

Hay que considerar también las pérdidas debidas a la producción, al transporte y almacenaje. Los vehículos con celda 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 casos, como centrales eléctricas independientes basadas en fuentes discontinuas de generación (solares, eólica, mareomotriz), 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 30 y 40 %.

En usos combinados de calor y de energía (cogeneración), para las 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 celda como ocurre en caldera convencional, por lo que con esta producción combinada de energía térmica y de energía eléctrica la eficiencia sigue siendo más baja del 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 un sistema de calefacción.

4.10 El Hidrógeno Como Portador Energético.

El hidrógeno es el elemento más ligero de la naturaleza y el más abundante en el universo. Es un gas difícil de licuar. En nuestro planeta se encuentra en la materia orgánica, agua, petróleo, carbón o gas natural, pero no en forma libre, por lo que para producirlo se requiere invertir una gran cantidad de energía [7]. Al unirse el hidrógeno con el oxígeno se forma agua y se desprende energía, usualmente en forma de calor (proceso similar a la combustión de gas natural o petróleo). Utilizando un catalizador que contiene molibdeno y que al entrar en contacto con el agua, separa de manera sencilla y barata, tras varias reacciones encadenadas, el hidrógeno y el oxígeno.

Esta es una forma segura de obtener hidrógeno y generar una energía sin contaminantes; dentro de sus características se encuentra que como catalizador no requiere de otras fuentes de energía, de esta manera la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno logra una fuente de energía limpia, no contaminante y barata relativamente. A diferencia de otras energías alternativas como la eólica o la solar, este proceso de obtención de hidrógeno se puede realizar en cualquier circunstancia medioambiental, por adversa que esta sea, mientras que para almacenar energía eólica o solar es necesario la presencia del sol o de viento.

Una de las ventajas claras de utilizar el hidrógeno como fuente de energía; es que como el hidrógeno es uno de los elementos que forman el agua, sería una fuente de energía inagotable, de modo que no provocaría crisis económicas como las del petróleo, y además sería una energía no contaminante. 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 aguas negras, de los residuos sólidos, llantas y desechos del petróleo [7].

La molécula de hidrógeno es la más ligera, la más pequeña y esta entre las moléculas más simples, además es relativamente estable. El hidrógeno tiene el 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 [6], obtenidos actualmente en plantas generadoras de potencia.

4.10.1 Obtención del hidrógeno.

Existen diversas formas de obtener el hidrógeno, algunas implican mayor energía para transformarlo y enriquecerlo al hidrógeno a continuación se describen estas formas.

4.10.2 Métodos de Obtención y Almacenamiento.

- a) Reformado con vapor. Con este procedimiento el hidrógeno se obtiene a partir de hidrocarburos, fundamentalmente del gas natural. El principal componente del gas natural es metano CH_4 y la reacción consiste en separar el carbono del hidrógeno. El proceso tiene lugar en dos etapas: En la fase inicial, el gas natural se convierte en hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. La segunda etapa consiste en producir hidrógeno adicional y dióxido de carbono a partir del monóxido de carbono producido durante la primera etapa. El monóxido de carbono es tratado con una corriente de vapor a alta temperatura produciéndose hidrógeno y dióxido de

carbono. El hidrógeno producido se almacena en tanques. El proceso tiene una eficiencia de entre el 70% y el 90% [7].

- b) Oxidación parcial de combustibles fósiles con efecto de O_2 . Se obtiene una mezcla de hidrógeno que posteriormente se purificará. Las cantidades de oxígeno y vapor de agua son controladas para que la gasificación continúe sin necesidad de aporte de energía.
- c) Electrolisis del agua. El paso de la corriente eléctrica a través del agua, produce una disociación entre el hidrógeno y el oxígeno, componentes de la molécula del agua H_2O . El hidrógeno se recoge en el cátodo (polo cargado negativamente) y el oxígeno en el ánodo. El proceso es mucho más caro que el reformado con vapor, pero produce hidrógeno de gran pureza.
- d) Fotelectrolisis. Básicamente, este proceso aprovecha la radiación solar para generar la corriente eléctrica capaz de producir la disociación del agua y en definitiva la producción de hidrógeno.
- e) Gasificación de biomasa: Se trata de someter a la biomasa a un proceso de combustión incompleta entre 700 y 1200°C. El producto resultante es un gas combustible compuesto fundamentalmente por hidrógeno, metano y monóxido de carbono.
- f) Pirolisis: Es la combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500°C. Se obtiene carbón vegetal y gas mezcla de monóxido de carbono y dióxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos ligeros.
- g) Producción fotobiológica. Por ejemplo, la cianobacterias y las algas verdes pueden producir hidrógeno, utilizando únicamente luz solar, agua e hidrogenasa como una enzima.

Nota: además utilizando la biomasa como fuente de hidrógeno éste se puede producir por gasificación de la biomasa y también por pirolisis.

La producción de hidrógeno a partir de energías renovables permitirá desarrollar un sistema de energía sustentable y reducir la dependencia actual respecto de los combustibles fósiles [8].

El hidrógeno se almacena a alta presión y requiere de depósitos pesados y voluminosos. El hidrógeno se almacena en estado líquido en recipientes criogénicos; requiere alcanzar temperaturas muy bajas (2,2°K). Diversos metales de transición y sus aleaciones pueden ser utilizadas para almacenar hidrógeno en forma de hidrocarburos metálicos. El principal inconveniente es el elevado peso del sistema de almacenamiento, como consecuencia de los bajos niveles de retención de hidrógeno que se consiguen. Se está estudiando la utilización de nanoestructuras de carbono con una elevada superficie específica como medio de almacenamiento. Sería una forma muy segura y sencilla de almacenar hidrógeno sin usar altas presiones [9].

La figura 4.4 muestra los posibles ciclos de obtención del hidrógeno siempre y cuando se disponga de alguna de las diferentes formas de obtener el hidrógeno, se ilustra el ciclo completo hasta que el hidrógeno llega al consumidor final.

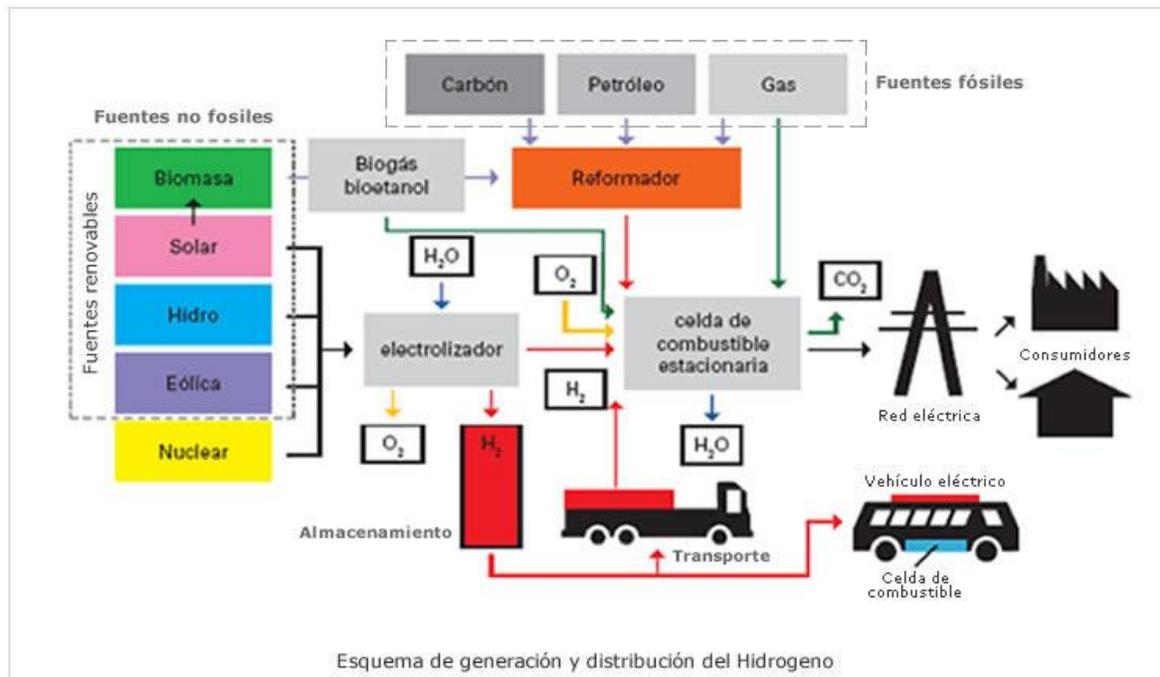


Figura 3. Proceso de generación y distribución del hidrógeno.

4.11 Producción del hidrógeno en nuestro País.

En México se cuentan instaladas 36 plantas para la generación del hidrógeno, se cuenta con una capacidad instalada de 46, 797 toneladas por año. De estas plantas, 25 de ellas operan con gas natural, en tal caso la producción por planta, estándar promedio es de 20,000 toneladas. Seis plantas operan con propano al 97%, en este caso la producción estándar promedio es de 15,000 SCFH (400 SCMH). Por ultimo 5 operan por vía de electrólisis, su producción estándar promedio es de 1,866 SCFH, (50 SCMH) [5].

Las plantas que generan hidrógeno vía reformación catalítica de hidrocarburos, entregan un hidrógeno, producto, típicamente al 14,7 Kg/cm² y a 28 °C, en estado gaseoso. La pureza típica de diseño es de 99,99% en volumen. Las impurezas son básicamente CO, CO₂, y H₂O.

Las plantas que generan hidrógeno, vía electrólisis, entregan un hidrógeno producto típicamente a 2 Kg/cm² y a 28 °C, en estado gaseoso. La pureza es típicamente del 99,99% en volumen, las impurezas son básicamente O₂ y H₂O.

Dentro de los Estados de nuestro País con mayor capacidad instalada para la generación de hidrógeno, tenemos a: Veracruz, Estado de México, Jalisco, Nuevo León y Coahuila.

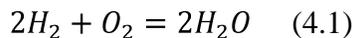
4.12 Energía de las celdas de combustible.

Como se sabe, el funcionamiento de las celdas de combustible es simple. El hidrógeno quien pasa por un medio electrolítico (membrana de intercambio de protones en el caso de las celdas de combustible tipo PEM), que permiten el paso de los protones del hidrógeno, rechazando los electrones que son obligados a pasar por el circuito y carga eléctrica con la consecuente generación de corriente eléctrica.

Este esquema que parece simple se complica por las variables que se introducen respecto al combustible (hidrógeno), fuente de origen, calidad, eficiencia, almacenamiento, etc. Estas variables que afectan el funcionamiento y las características técnicas de la energía generada, se analizarán más adelante, por ahora se abordará el proceso de conversión de la energía.

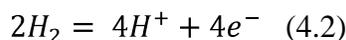
La energía generada tiene características diferentes que depende de diferentes factores tales como la presión del gas, su concentración, temperatura y como, a su vez estos afectan a la tensión.

En muchos de los equipos utilizados para la generación de energía eléctrica es muy clara la idea de cómo se realiza el proceso de generación de electricidad. Un buen ejemplo es un generador de electricidad impulsado por molinos de viento, donde la energía cinética del aire mueve las hélices que producen la rotación del eje del generador. Sin embargo en las celdas de combustible, visualizar la transformación de la energía es más complicado. Las ecuaciones básicas del proceso se inician al considerar que el combustible (hidrógeno), está siendo quemado a través de una simple reacción:

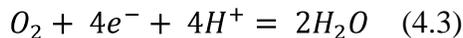


En este caso en lugar de liberar energía calorífica, se produce energía eléctrica. Para entender como la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno producen corriente eléctrica, y entender de donde vienen los electrones, se consideran las reacciones que tienen lugar en cada electrodo por separado.

En el ánodo, el hidrógeno se ioniza, liberando los electrones (que circulan por el sistema eléctrico produciendo electricidad) y creando iones de H^+ (o protones).



En el lado del cátodo, el oxígeno reacciona con elementos tomados del electrodo, e iones de H^+ del electrolito, para formar el agua.



La potencia y la energía generada son fácilmente calculables, utilizando las formulas ya bien conocidas:

$$Potencia = V \times I \quad (4.4)$$

$$Energía = V \times I \times t \quad (4.5)$$

Donde:

V = Voltaje

I = Corriente

t = Tiempo

Sin embargo, la energía que ingresa y sale del sistema en un proceso químico no es fácil de definir. A un nivel simple y básico podríamos decir que la energía en cuestión es la energía química, que contiene tanto el hidrógeno (H_2), como el oxígeno (O_2), así como el agua (H_2O). El problema reside en que la definición de la energía química de estos elementos no es fácilmente definida, por lo tanto será necesario utilizar los conceptos de entalpía, función de Helmholtz y conceptos de la energía libre de Gibbs [10].

Por otra parte un concepto que ayuda mucho a comprender mejor los procesos termodinámicos es el de Energía, que es ampliamente utilizado sobre todo en las celdas de combustible, que trabajan a temperaturas altas. Sin embargo también se utilizaran conceptos más tradicionales y útiles como los del calor específico.

En los casos de las celdas de combustible, juega un papel muy importante la teoría de Energía Libre de Gibbs, que puede ser definida como la energía disponible para realizar un trabajo externo [10]. Ignorando el trabajo hecho por los cambios de presión o cambio en el volumen. En una celda de combustible el trabajo externo esta constituido por el realizado por los electrones que fluyen en el circuito externo. Cualquier trabajo realizado por el cambio de volumen entre los puntos de entrada y salida del sistema no es aprovechado por la celda de combustible.

La Energía excluye todo el trabajo que es posible extraer del sistema incluyendo el producido por los cambios de volumen y de presión; mientras que la Entalpía, es la Energía Libre (de acuerdo al concepto de Gibbs), más la energía relacionada con la Entropía del sistema.

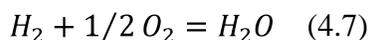
Todas estas formas de energía química si se quiere, por así decirlo, tienen una similitud con el concepto de energía potencial mecánica definida de dos maneras. La primera es que el inicial o cero que puede ser definida cuando las reacciones químicas se producen en condiciones normales de presión y temperatura. El termino de Energía Libre de Gibbs de

formación ($\hat{g}f$) es utilizada para esta convención. Similarmente, podemos utilizar el término de Entalpia de Formación, o solamente Entalpia. Normalmente para simplificar el valor de $\hat{g}f$ es cero, en el punto de entrada del sistema.

La segunda similitud con el sistema de energía potencial es el cambio de estado. En el caso de las celdas de combustible, la energía libre de Gibbs ($\hat{g}f$ producido), es igual a la contenida en la materia producida menos la energía de los elementos que ingresan en el volumen de control de la reacción, por la tanto:

$$\Delta\hat{g}f = \hat{g}f(\text{productos}) - \hat{g}f(\text{reactivos}) \quad (4.6)$$

Para nuestro caso tenemos que la reacción:



Lo que nos dice, que un mol de agua es producido con un mol de hidrógeno y medio mol de oxígeno. Aplicando el concepto de Gibbs tenemos:

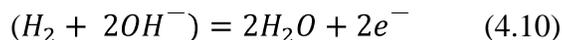
$$\Delta\hat{g}f = \hat{g}f(\text{productos}) - \hat{g}f(\text{reactivos}) \quad (4.8)$$

O sea:

$$\Delta\hat{g}f = (\hat{g}f)_{H_2O} - (\hat{g}f)_{H_2} - 1/2 (\hat{g}f)_{O_2} \quad (4.9)$$

Esta función que parece sencilla se complica ya que la Energía Libre de Gibbs, no es constante y varía con respecto de la temperatura.

Por otro lado se sabe que en el proceso básico de una celda de combustible, por cada molécula de hidrógeno pasan dos electrones por el circuito externo:



Esto quiere decir que por cada mol de hidrógeno utilizado, 2N electrones pasan por el circuito externo (N es el número de Abogadro), luego si se sabe que $-e$ es la carga de un electrón la que fluye es:

$$-2Ne = -2 x FCouloms \quad (4.11)$$

Donde:

F es la constante de Faraday o la carga de un mol de electrones.

Si decimos que E es el voltaje de la celda de combustible, el trabajo eléctrico entregado a la carga es:

Trabajo eléctrico hecho = carga x voltaje = $-2F \times E$ (Joules)

Si el sistema es reversible (esto quiere decir que no hay pérdidas), este trabajo eléctrico realizado es igual a la Energía Libre de Gibbs [9]. Donde:

$$\Delta\hat{g}f = -2FxE \quad (4.12)$$

Entonces:

$$E = -\Delta\hat{g}f/2F \quad (4.13)$$

Esta ecuación nos permite calcular la fuerza electromotriz o la tensión del circuito alimentado por la celda de combustible.

Como ejemplo podemos decir que una celda de combustible de hidrógeno que está operando a 80 °C ($273,15 + 80 = 353,15$ °K), tiene -226,12 kJ, luego la tensión que genera es, sustituyendo en ecuación 4.13:

$$E = -(226,12)/(2 \times 96485) = 1,14 \text{ V}$$

Estos resultados obtenidos nos explican porque es necesario “*stacks*” con varias celdas unitarias en serie, hasta alcanzar los valores de tensión útiles, por ejemplo para 220 V será necesario utilizar hasta 300 celdas.

En la realidad este voltaje es afectado por la irreversibilidad del proceso que reduce significativamente la tensión de trabajo, entre estos se encuentran las sobretensiones y efectos de polarización que se agrupan en tres clases:

- Resistencia o polarización Óhmica.
- Activación o polarización química.
- Polarización de concentración.

4.13 Potencia y Energía de las Celdas de Combustible.

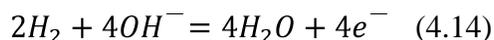
En el lado del ánodo, (que es la sección de alimentación de la celda de combustible), el hidrógeno reacciona, generando la energía. Sin embargo, este hecho no significa que la reacción se realizará en una manera ilimitada, continua y constante. Esta energía emitida en la etapa de activación se reduce en el estado de operación posterior. La reducción de la energía es debida principalmente a la saturación de las moléculas de hidrógeno en la superficie del ánodo.

Como se puede suponer este comportamiento se refleja en una reducción en el índice de rendimiento del equipo. Las posibles acciones que se deben tener en cuenta, para evitar esta reducción y mantener un mejor rendimiento en la generación de energía son:

- El uso de catalizadores.
- Elevar la temperatura de operación.
- Incrementar el área de contacto en los electrodos.

Las dos primeras se pueden aplicar fácilmente a cualquier reacción química, mediante métodos químicos y físicos. La tercera acción es esencialmente especificada a las celdas de combustible, en la etapa de diseño y esto es muy importante.

Si tomamos la reacción que se produce en el lado del ánodo (que es la que se produce por reacción del combustible hidrógeno y la sustancia electrolítica):



Como se observa en esta reacción el hidrógeno reacciona con la sustancia electrolítica formándose agua y liberando los electrones que son los que recorren el circuito eléctrico.

Además se puede observar la importancia que tiene el gas combustible (hidrógeno) tanto en los iones del OH^- del electrolito, en la emisión de la energía de activación. Por otro lado estos vienen juntos, tanto el combustible H_2 y los iones del OH^- se producen en la superficie del electrodo, mientras que los electrones producidos son transferidos.

Por otro lado tenemos la reacción con participación del oxígeno (generalmente en estado gaseoso tomado en muchos casos del aire), que se produce en el cátodo mediante la cual se forman los iones OH^- :



Esta reacción es llevada a cabo en el cátodo, llamado a menudo zona de contacto de las tres fases y es muy importante en el diseño de las celdas de combustible. De esto claramente, se puede inferir que la tasa de generación de energía en la celda, será proporcional por el área de los electrodos, lo cual es muy importante; de hecho el área del electrodo es un tema tan vital de suprema vitalidad en el diseño de las celdas de combustible, que su funcionamiento se expresa a menudo en términos de la corriente por cm^2 . Sin embargo, el área directa (ancho x longitud), no es la única cuestión a tener en cuenta; como se ha mencionada anteriormente, el electrodo deberá además presentar un buen grado de porosidad, con esto se consigue que el área de contacto se incremente sustancialmente.

En la actualidad se puede lograr que los electrodos sean hechos de materiales con una micro-estructura que les de unas aéreas superficiales que incrementan centenares o aun miles el valor de “ancho x longitud”, los valores que actualmente se pueden obtener están entre los 4 a 8 m^2/gr de material.

Además también es de cuidado la fabricación de materiales micro-estructurales que incorporen catalizadores que además sean capas de soportar eficazmente altas temperaturas en un ambiente corrosivo como el que se tiene en las celdas de combustible.

Como se menciona anteriormente la tensión que se obtiene es una unidad básica de la celda de combustible es sumamente baja, es por ello que estas unidades deben ser apiladas en serie, de esta manera se logra obtener en los bornes de salida, tensiones mayores que nos permiten utilizarlo en usos prácticos. La manera más fácil de hacer esta conexión, es conectando el ánodo de cada celda básica, con el cátodo de la siguiente. Esto parece simple, pero no lo es si tenemos en cuenta que es necesario proveer de gas a todos los electrodos, de manera continua y suficiente. Para esto se utilizan placas bipolares que permitirán que los ánodos de una celda estén conectados con el ánodo y con el oxígeno en el lado del cátodo. Estas placas son además acanaladas para permitir el libre paso de los gases.

Esta forma constructiva de apilamiento, permite además de lograr el abastecimiento de gas, una mejor conductividad que permita el transporte de los electrones que si bien es cierto, tienen voltajes muy reducidos son importantes para efectos de lograr potencia útil importante para los fines de generación.

También es importante hacer notar que esta configuración permite una buena conexión entre ánodo y cátodo, al mismo tiempo que se tiene el aislamiento adecuado de los gases (H_2 y O_2). Para lograr esto se cuenta con diseños de las placas bipolares protectoras acanaladas que permitan disminuir el oxígeno e hidrógeno a los electrodos y sellar las celdas de la celda de combustible herméticamente. Estas placas son fabricadas en grafito o acero inoxidable.

4.14 Implementación De Las Celdas De Combustible En Un Sistema Aislado

En México existen empresas particulares que ya comercializan las celdas de combustible que utilizan el hidrógeno como combustible primario en una red de telecomunicaciones en la República Mexicana. Una de estas empresas es MICROM [11], que ofrece un tipo de celda que puede satisfacer las necesidades energéticas requeridas en una ESDECA. Dentro de las principales características de la celda que ofrece dicha empresa es asegurar el abasto continuo de electricidad en CD a cargas críticas donde se presenten problemas de suministro continuo de electricidad. Lo que repercute en pérdidas económicas y sociales. Además de que provee la solución para la generación de potencia necesaria de acuerdo a las capacidades del sistema de comunicación.

La tecnología con la que trabaja MICROM permite ofrecer en el mercado sistemas desde 1.0 kW hasta 15 kW para diferentes aplicaciones y para suministro de respaldo crítico.

Con el análisis de las pruebas realizadas a los equipos utilizados en campo que son alimentados por un sistema fotovoltaico, este tipo de celda de combustible podría cubrir con las necesidades energéticas que se requieren. Por lo que al analizar las diferentes opciones que se ofrecen en el mercado de venta de celdas de combustible, se propone la utilización de la celda de combustible como la que MICROM ofrece en el mercado. A continuación se describe la información técnica.

Celda de Hidrógeno de Condumex:

1. Sistema de respaldo de energía de cargas críticas dentro de un rango de 250 W hasta 15 kW.
2. Purificador patentado, produce 99.9% de Hidrógeno puro.
3. Membranas purificadoras de HyPurium.
Reactor de Hidrógeno.

Las aplicaciones más comunes de este tipo de celda son:

- Respaldo de energía crítica a estaciones base de telefonía celular.
- Respaldo de energía a nodos remotos sin supervisión.
- Respaldo a aplicaciones en quirófanos, centros de cómputo, sistemas de seguridad, emergencias en contingencias ambientales (sismos, sunamies, tornados, etc.), sistemas de respaldo móviles y de radiocomunicaciones.

Otras ventajas que ofrece este tipo celda de combustible son:

- Monitoreo remoto y Sistema de Control y estado de la célula de combustible.
- Datos de historia y operación.
- 8 contactos secos configurables.
- Módulos ultra – Capacitores de almacenaje.
- Ethernet/IP.
- Sensores/ Alarmas de detección de Hidrógeno.
- Gabinetes (número de gabinetes según las necesidades), para almacenaje de tanques de Hidrógeno.

MICROM cuenta con el soporte del Centro de Investigaciones y Desarrollo Carso (CIDECA) y de su socio tecnológico, el cual es líder en el desarrollo de procesadores de combustible y de celdas de Hidrógeno con la tecnología PEM (Membrana de Intercambio de Protones).

Lo que hace diferente a MICROM es su tecnología para generar hidrógeno en el sitio utilizando una mezcla desarrollada por la empresa para facilitar el transporte, manejo, disponibilidad, costo y desempeño [11]. Esta revolucionada tecnología, debidamente certificada e instalada en México, se basa en la transformación de un combustible líquido simple basado en la dilución de agua con un alcohol base industrial, fácilmente biodegradable, lo cual entre muchas otras ventajas, evita el riesgo de cualquier efecto

adverso al medio ambiente, eliminado el complicado manejo de tanques a presión y la peligrosidad de almacenamiento que presenta el mismo.

Esta es una de las principales características por las que se considera que este tipo de celda sería la más adecuada, pues reduce el número de mantenimientos preventivos y de traslados hasta el sitio donde se localiza la estación de campo, lo que hace que se tenga un sistema autónomo y que puede ser monitoreado a distancia en tiempo real. Esto reduce los riesgos que se pueden correr al transportar los tanques de Hidrógeno hasta el sitio donde se localiza la ESDECA, la independencia de la transportación y la facilidad de generar el combustible en el sitio, se verán reflejadas directamente en el suministro de energía eléctrica.

Por otra parte los sistemas de combustible convencionales requieren ser abastecidas con tanques de Hidrógeno, que demandan transporte e instalación especializada, así como una logística muy compleja dado el número limitado de proveedores de Hidrógeno en su estado gaseoso, lo que dificulta su abastecimiento en sitio. En contraste, al ofrecerse una solución integral capaz de generar su propio Hidrógeno a través de combustible líquido, facilita el manejo sobretodo en los lugares de difícil acceso, es mucho más compacto y no hay limitación en la cantidad de combustible requerido en el sitio.

Por todas las características que ofrece está celda de combustible, se propone como un caso de estudio práctico donde sea el respaldo primario del suministro energético actual de la estación, la aportación energética de la celda permitirá contar con un sistema sustentable, energéticamente hablando, mientras que por la parte económica representará un ahorro a mediano y largo plazo, ya que una celda de este tipo y características, tiene una vida útil de 20 años de acuerdo al fabricante [11]. Lo que se verá reflejado en un decremento en los costos de operación y mantenimiento de la estación sensora de campo. Además con la utilización e implementación de sistemas con estas características se ayuda a la conservación de un medio ambiente más limpio y libre de dióxido de carbono.

Basado en las pruebas de laboratorio y en las mejoras que se desean realizar a una estación de campo típica, las necesidades energéticas de ésta aumentaran, por lo que con un sistema de respaldo como el propuesto utilizando la celda de combustible de hidrógeno, cubrirá las nuevas necesidades energéticas requeridas para el buen funcionamiento ininterrumpido del sistema de alerta sísmica.

4.15 Discusión.

En una celda de combustible el costo típico por kilowatt es de 3 a 5 veces más costoso que el generado por un generador micro eólico, por la razón que la celda utiliza un combustible. El establecimiento actual de la economía de las celdas de combustible va en función de una caída en las tasas de uso de combustibles fósiles, ya sea por escasas, por restricciones medioambientales, penalización, incentivos de tecnologías alternativas o simplemente por

la aparición de un combustible más barato. Por otro lado y tan importante como la anterior, la economía de las celdas de combustible dependerá del desarrollo tecnológico y económico de los procesos relacionados con la producción, transporte y usos de este combustible [12].

En el mundo se está dando más oportunidad en el mercado de la energía a tecnologías alternativas que no dependan directamente de combustibles fósiles, es por ello que actualmente se está teniendo un amplio campo de aplicaciones para las celdas de combustibles, desde aplicaciones espaciales, vehículos, dispositivos portátiles, bancos de reserva, hasta generación de energía en grandes cantidades.

El 95% del hidrógeno que se utiliza hoy en el mundo proviene del gas natural [7]. Sólo un 5% se obtiene a partir de la descomposición del agua con energía eléctrica convencional. Hay que recordar que el hidrógeno es el elemento más abundante en la Tierra, que posee una baja densidad, y que como tal no es un combustible, pues requiere de energía para su generación, lo interesante en una evaluación económica es poder, analizar los factores de los cuales depende su producción y en función a ellos, poder hacer una estimación del comportamiento del hidrógeno en el mercado energético. Por ejemplo, actualmente se dio a conocer un estudio realizado con catalizadores que utilizan hierro, los cuales no degradan la eficiencia de la celda [13], y que son más baratos que los que utilizan platino el cual es un metal precioso de muy alto valor en el mercado.

Actualmente los incentivos gubernamentales para la utilización de tecnologías alternativas para la generación de energía eléctrica, pone en la cima de la lista al hidrógeno, entre otras cosas por sus beneficios comprobados al medio ambiente. En el presente siglo se espera que los avances tecnológicos relacionados con la obtención, separación y transportación del hidrógeno reduzcan sus costos y el hidrógeno se convierta en el primer combustible no fósil en contener alto valor energético y además transportable. Que en comparación con otras fuentes de generación alternativas, que en algunos casos también se encuentran en abundancia, pero no son transportables y que sólo permiten generar electricidad, como es el caso de la energía geotérmica, solar, eólica, etc.

Por otro lado cabe mencionar qué si se sigue utilizando el gas natural como el principal productor de hidrógeno, la producción total de éste tocará fondo para el año 2020, tal como prevén actualmente algunos geólogos, entonces será necesario utilizar las formas alternas de producir hidrógeno [13], por lo que no es seguro apostar el futuro energético únicamente a al gas natural, se requiere explorar nuevas formas de obtención de hidrógeno, que permitan reducir los costos de operación y que paulatinamente reduzcan los costos del mismo. Hay que recordar que como todas las tecnologías cuando son la punta de lanza los precios son muy elevados, pero en base a la ley de la oferta y demanda, se espera que entre el año 2010 y 2020 se realice el auge del hidrógeno como fuente energética alternativa a los

hidrocarburos. En México ya es posible comprar celdas de combustible para diferentes aplicaciones, en base a las necesidades y el tipo de carga. Por lo que el aspecto económico no debiera influir en la toma de decisión y valoración, de una fuente alterna para el suministro de energía en el sistema de alerta sísmica, pues la inversión se paga con creces, desde el momento en que una celda de combustible tiene una vida útil de 20 años, en comparación con las baterías convencionales que normalmente se deben de cambiar a los 3 años, pues tal vez el alto costo se refleje en la inversión inicial, pero a mediano y largo plazo será una inversión redituable y la relación costo-beneficio, superará las expectativas energéticas deseadas. Además las ventajas son claramente visibles en la eficiencia del sistema y en la nula emisión de contaminantes.

Referencias:

- [1] Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong, *“Fuel Cells Modeling, Control and Applications”*. CRC Press; United States of America, 2010.
- [2] A Cogeneration System of a Combined Heat and Power System (CHP), Thermal Equipment Cogeneration, UNEP 2006.
- [3] *“Mercedes-Benz to lease fuel-cell vehicles in California starting in December 2010”*, Fuel Cell Tecnology Update, November 2010.
- [4] Hydrogen Burner Technology Inc. Long Beach, CA. Página visitada 10 de octubre de 2010. <http://www.hbti.net>
- [5] Sociedad Mexicana de Hidrógeno. Pagina visitada 13 de noviembre de 2010. <http://www.smh.org.mx/>
- [6] Manrique José A., *“Termodinámica”*, Tercera Edición, México, Oxford 2002.
- [7] María Jaén Caparrós, *“Jornadas Tecicas de Ciencias Ambientales, Tecnologías del Hidrógeno y Pilas de Combustible”*, ARIEMA Energía y Medioambiente, España 2004.
- [8] Energías Alternativas en CICATA, Querétaro. Pagina visitada 17 de septiembre de 2010. <http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:dfyPvcrmp4J:www.concyteq.edu.mx/nthe1/pdfs/Energiasalternativasencicata.pdf+celdas+de+combustible+utilizadas+en+Queretaro>
- [9] Hubert A. Gasteiger, Nenad M. Markovick , *“Just a dream or Future Reality?”*. Sciencie, 324: 48-49, 3 April 2009.

- [10] Sears F., Zemansky M., Young H., Friedman R., “*Física Universitaria*”, Onceaba Edición México, Pearson Educación 2004.
- [11] Microm Electronica. Pagina visitada 15 de agosto de 2010.
<http://www.microm.com.mx/ES/Paginas/default.aspx>
- [12] Jeremy Rifkin, “*La economía del Hidrógeno*”, pág. 267, cap. 8. El nacimiento de la economía del hidrógeno.
- [13] Celdas de Combustible Tendencias Económicas. Pagina visita 15 de enero 2011.
http://web.ing.puc.cl/~power/alumno10/celdas/3_tendencias.html