

CAPITULO 2: EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

2.1 APLICACIONES ENERGÉTICAS

El hidrógeno hoy en día está dando lugar a muchas aplicaciones, no sólo desarrollando nuevas tecnologías en dónde éste se aprovecha o se puede producir, sino también su uso energético en especial cómo combustible, puesto que los combustibles fósiles a demás de ser muy contaminantes las reservas actuales no duraran siempre y llegará el punto en el que se tendrán que buscar alternativas, en especial para el sector transporte dado a que prácticamente todas las actividades humanas dependen de eso.

Algunas ventajas que presenta el hidrógeno como combustible son las siguientes:

- El hidrógeno se quema en el aire libre cuando hay concentraciones entre el 4 y 75% de su volumen, en cambio el gas natural lo hace entre 5.4 y 15%.
- La temperatura por combustión espontánea es de 585° C, mientras que para el gas natural es de 540° C.
- El gas natural explota en concentraciones de 6.3 a 14%, mientras que el hidrógeno requiere concentraciones entre el 13 y el 64%, por lo que el gas natural es más explosivo que el hidrógeno.
- La molécula de hidrógeno es la más ligera, la más pequeña y está entre las moléculas más simples, además, es relativamente estable y, en caso de accidente, se dispersaría rápidamente.
- El hidrógeno tiene más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible.
- 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 [1].

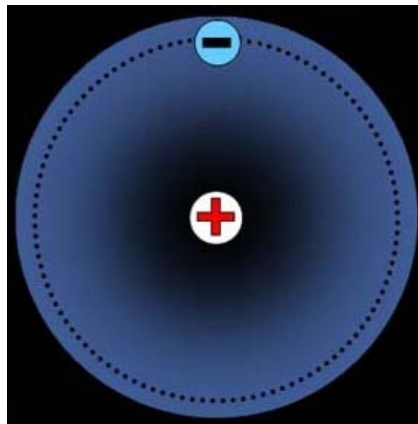


Fig. 2.1 Esquema del átomo de hidrógeno [2].

Se puede ver que las ventajas del hidrógeno sobre los combustibles fósiles son muy grandes, no contaminan y posee una alta eficiencia a comparación de los combustibles fósiles. Aunque claro también presenta algunas desventajas como lo es el almacenamiento y transporte, debido a las altas presiones a las que debe encontrarse y otro problema que se presenta es la baja temperatura de licuefacción que posee (-253°C).

Como se sabe el hidrógeno no se puede obtener de manera directa puesto que se encuentra en otros materiales de los cuales debe ser extraído. Varios grupos a favor de impulsar una economía del hidrógeno tratan de impulsar métodos eficientes y no contaminantes, un ejemplo es, obtener hidrógeno del agua mediante electrólisis y que la energía para este proceso provenga del viento, aunque la industria nuclear ve que la única forma de producir hidrógeno a gran escala es mediante energía la energía nuclear.

Aunque aún falta mucho para desarrollar una “economía” del hidrógeno, puesto que los cambios son lentos, por ejemplo, a la industria de la energía renovable le ha tomado más 30 años tener el 1% del mercado del transporte y 2% del mercado de la generación eléctrica [3].

El hidrógeno como fuente de energía alternativa a los combustibles a base de hidrocarburos, puede tener muchos más usos potenciales, pero antes se debe de lograr almacenar y usar de forma segura. Puede usarse para el sector transporte y para aplicaciones estacionarias, como un portador de energía puede incrementar nuestra diversidad energética y seguridad al reducir la dependencia en combustibles fósiles.

Aunque claro está que si la tendencia es ir aumentando el uso de combustibles alternativos a los fósiles, se debe ya de empezar a tomar acción necesaria en cuanto a la infraestructura de distribución de los combustibles. Desarrollar tecnologías de abastecimiento cómo son las estaciones de servicio sería lo primordial para llegar a un sistema eficiente cómo lo es en la actualidad el de la gasolina o diesel. En la siguiente figura se muestra la perspectiva a futuro del mercado del hidrógeno.

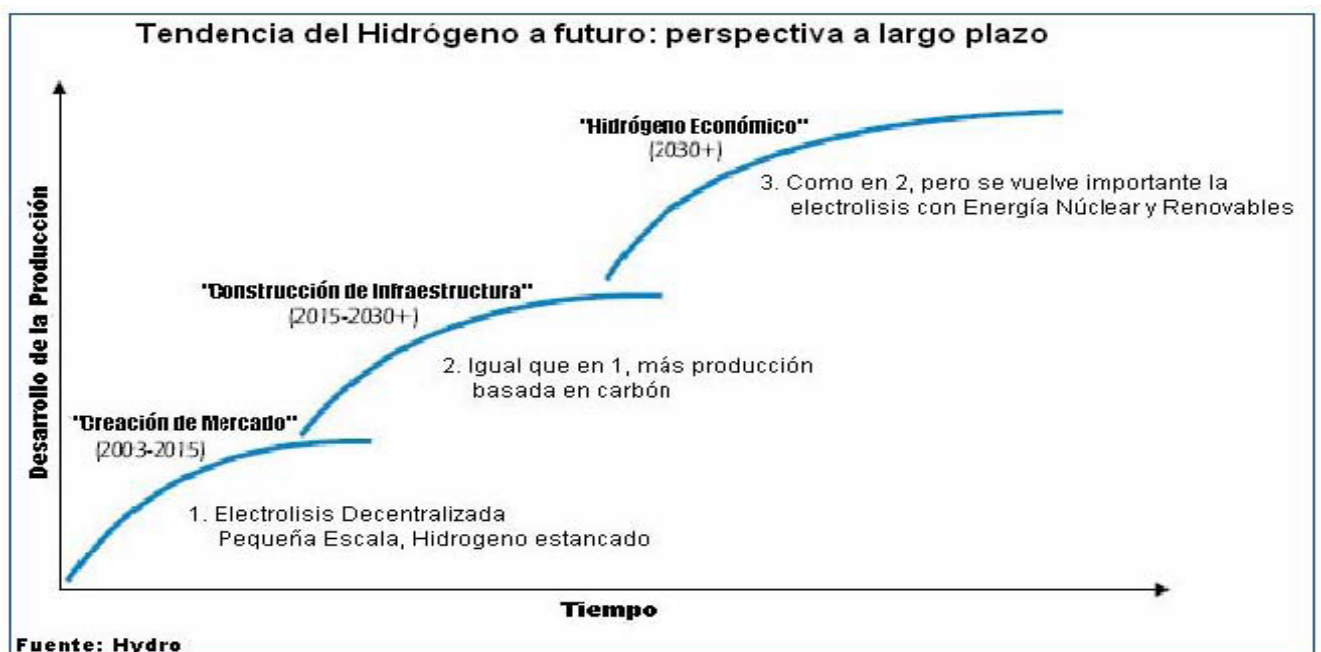


Fig. 2.2 Perspectiva del desarrollo del mercado del hidrógeno [4].

2.2 APLICACIONES INDUSTRIALES

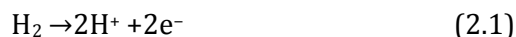
Como se ha visto el hidrógeno es una fuente de energía con muchas ventajas sobre los combustibles fósiles por su gran densidad energética (120MJ/Kg), además de que gracias a su alta eficiencia en conversión de energía se puede aplicar para motores de combustión; una de las aplicaciones del hidrógeno. Las tecnologías que, a nivel industrial se podrían desarrollar más, y que ahorita se encuentran todavía en investigación son su uso en motores de combustión interna, esto se está desarrollando debido a que el transporte es un gran sector contaminante hoy en día, en especial en ciudades con alta densidad de población. El desarrollo de esta tecnología impulsa el avance en otras áreas importantes para que esto se pueda llevar a cabo, como la tecnología de almacenamiento del hidrógeno, que sea efectiva y barata; también se están llevando a cabo investigación en el desarrollo de tecnologías que producen hidrógeno como sea necesitado en el momento, las estaciones de servicio, etc.

Celdas de Combustible

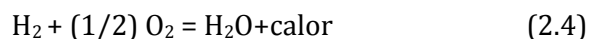
Las celdas de combustible son dispositivos que obtienen la energía que se encuentra en el hidrógeno de manera eficiente y la transforman en electricidad. También se debe mencionar que se puede hacer esto con motores de combustión interna, pero las celdas son más eficientes, silenciosas al trabajar y se pueden reducir en tamaño dependiendo de la aplicación que se requiera.

Las celdas de combustible son celdas electroquímicas las cuales mediante un proceso químico generan corriente eléctrica, las celdas de combustible son parecidas a una batería la gran diferencia radica en que, las baterías guardan la energía, mientras la celda de combustible va generando la energía mientras se le demanda. Aunque en la vida real la corrosión, y la degradación de los materiales limita su vida útil.

Muchas sustancias químicas pueden servir como combustible, en todos los casos se libera la energía cuando el combustible reacciona con el oxígeno del aire, donde el combustible es oxidado. Cuando se usa hidrógeno como combustible para las celdas, éste reacciona con el oxígeno generando agua potable, durante la reacción, un electrón es transferido de cada átomo de hidrógeno a cada átomo de oxígeno. El estado de energía del electrón es menor en el oxígeno y la diferencia de energía se libera en forma de calor. Las siguientes reacciones muestran el proceso, aunque esto es visto desde un punto de vista mecánico incorrecto.



La reacción general es:



Los procesos que se llevan a cabo dentro de la celda, el proceso de reducción, donde el hidrógeno cede un electrón y el proceso de oxidación, donde el oxígeno recibe el electrón, deben ser de manera separada. Para esto la celda se encuentra “dividida”, el electrodo negativo (ánodo) se encuentra donde el hidrógeno es oxidado, y el positivo (cátodo) se encuentra donde el oxígeno es reducido. Antes de que los electrones pasen hacia el oxígeno, se les hace pasar por un circuito eléctrico externo y es aquí donde se aprovecha la energía en forma de electricidad.

Una parte fundamental de este proceso es también el electrolito de la celda, puesto que los electrodos están separados y no se puede formar el producto final que es agua, y con esto los iones de hidrógeno se acumulan en el ánodo y los iones de oxígeno en el cátodo: esta acumulación de cargas genera potencial, lo que inmediatamente detiene el proceso. Es aquí donde el electrolito que se encuentre entre los dos electrodos, se encarga de mantener el balance de las cargas. Un electrolito es un conductor de iones y en este caso el electrolito es conductor de protones o conductor de iones de oxidación y así los iones en los electrodos se pueden combinar y formar agua. La Fig. 2.3 nos muestra de manera general las partes de una celda de combustible.

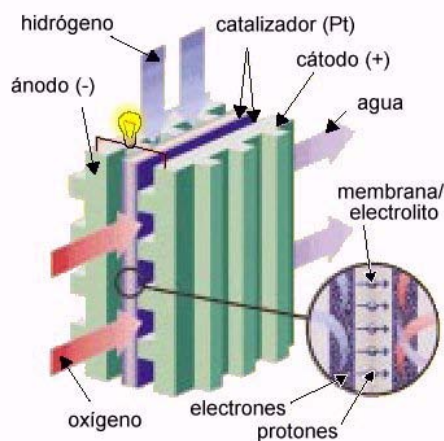


Fig. 2.3 Celda de Combustible [5].

La energía que se encuentra en los combustibles, se le define usualmente como el “valor más alto de calentamiento” (HHV, por sus siglas en inglés), es decir, la cantidad de calor total que se libera. Esto también es conocido como la entalpia. Para el caso del hidrógeno, como un producto de la reacción es agua, se asume que se encuentra a 25°C y a 1 bar de presión, además de encontrarse en estado gaseoso, esto de manera hipotética, también existe el “menor valor de calentamiento” (LHV, por sus siglas en inglés), este calor es menor por el calor de condensación del agua comparado al valor de calentamiento más alto.

Existe otro concepto relacionado con la energía eléctrica máxima que se puede extraer, esto es, la energía libre de Gibbs. El trabajo máximo que se puede realizar determina el voltaje reversible teórico de la celda (E_{rev}), puesto que este voltaje es una medida de la energía a la cual la corriente es entregada. El voltaje reversible está definido por:

$$E_{rev}(T) = \frac{-\Delta G(T)}{nF} \quad (2.5)$$

Dónde F es la constante de Faraday, ΔG la energía libre de Gibbs y n el número de electrones transferidos. En este caso como el combustible es hidrógeno, el voltaje reversible es 1.23v.

Ahora, como la energía eléctrica máxima está dada por la energía libre de Gibbs y la cantidad máxima de energía convertida está dada por la entalpia (ΔH), se llega a que la eficiencia máxima (n_{max}) está definida de la siguiente manera:

$$n_{max} = \frac{\Delta G(T)}{\Delta H(25^{\circ}C)} \quad (2.6)$$

Se puede concluir de esto, que como el hidrógeno se supone a una temperatura de 25°C su entalpia no varía, pero la energía libre de Gibbs depende de la temperatura y ésta al incrementarse hace que la energía libre de Gibbs disminuya, por lo tanto, la eficiencia máxima disminuye con el incremento de temperatura. En la práctica las celdas nunca operan a su máxima eficiencia.

El desempeño de la celda se puede ver en la siguiente curva característica de polarización:

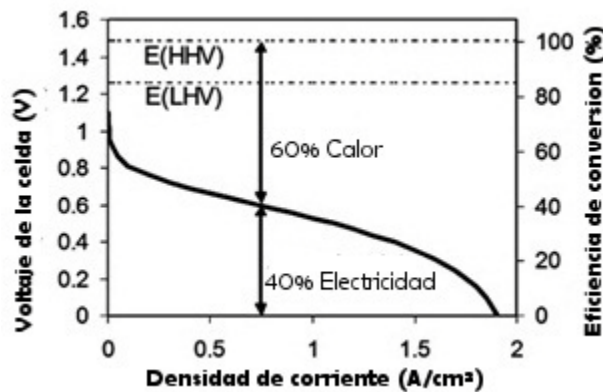


Fig. 2.4 Curva característica de polarización [6].

La Fig. 2.4 nos muestra el voltaje de la celda como una función de la carga en este caso la densidad de corriente, la cual es la corriente de la celda dividida entre el área del electrodo de la celda. Se puede ver también que el límite superior del voltaje está dado por HHV, además de que se usa como referencia para el contenido de energía de un combustible, es por eso que el cálculo de la eficiencia está basado en el HHV a pesar de que éste no se puede lograr convertir completamente en electricidad; por esto se debe calcular un voltaje reversible hipotético reemplazando la energía libre de Gibbs con la entalpia, lo cual nos da un voltaje de 1.48v aproximadamente, el cual es conocido como voltaje termo-neutral, esto quiere decir que una celda que trabaje a este voltaje transforma toda la energía del combustible en electricidad sin generar calor.

Se ha dado una descripción general del funcionamiento de la celda, eficiencia, proceso químico, etc. Se debe mencionar también que los distintos tipos de celdas de combustible que existen son nombrados por el tipo de electrolito que utilizan, en general las celdas de combustible pueden ser construidas con cualquier electrolito. Como el electrolito es el medio de conducción de los iones, esto determina la temperatura de operación de la celda, lo que conlleva a la clasificación de las celdas respecto a su temperatura. Las celdas de combustible

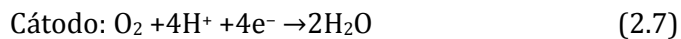
de baja temperatura que trabajan a una temperatura máxima de 200°C y las celdas de combustible de alta temperatura, que trabajan entre 650-1000°C.

Las siguientes celdas de combustible son las que se han estado desarrollando en los últimos años: La celda de combustible alcalino (AFC), la cual su electrolito es el hidróxido de potasio en forma acuosa. La celda de combustible de membrana de intercambio de protones o membrana polimérica (PEMFC) junto con la celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC) tienen electrolitos ácidos, es decir, un polímero especial con cadenas ácidas y ácido fosfórico respectivamente. La celda de combustible de carbonato fundido (MCFC) usa sal de carbonato fundido, y por último la celda de combustible de óxido sólido (SOFC) está construida alrededor de un óxido cerámico sólido conductor de iones.

Hoy en día la investigación y desarrollo está en las celdas PEMFC para pequeñas y medianas aplicaciones y las celdas SOFC para aplicaciones a gran escala. La celda PEMFC es atractiva por su alta densidad de potencia eléctrica, además de que ya se han tenido grandes avances y se encuentra cerca de la comercialización. La SOFC no se encuentra cerca de la comercialización, sin embargo, es muy atractiva por su alta eficiencia debido a la alta temperatura que posee.

La celda de ácido fosfórico PAFC

Es una de las celdas en las que ha existido más desarrollo y es la tecnología que se usa más a nivel comercial, la primera celda ácido fosfórico fue una unidad de 200kw de potencia eléctrica, usa gas natural como combustible el cual es reformado y de ahí se obtiene el hidrógeno con el cual opera, su electrolito es como su nombre lo indica de ácido fosfórico y electrodos porosos de carbono con un catalizador de platino. Las reacciones que se llevan a cabo en la celda son las siguientes:



Estas celdas fueron diseñadas con el propósito de servir para aplicaciones estacionarias, con una vida útil del orden de 40,000hrs. Tienen eficiencias entre el 37 y 42% (puede llegar a 85% si se usa la cogeneración usando el vapor que generan).

Una de las ventajas que presenta esta celda es su temperatura de operación, lo cual permite su conexión con un sistema de reformado, porque la tolerancia al CO es lo suficientemente alta para permitir que el hidrógeno “impuro” provenga directamente del reactor de baja temperatura de reformado.

También presenta ciertas desventajas, un ejemplo, sus electrodos no deben de estar arriba de 0.8v, si esto se da se presentaría la corrosión del carbón que contiene y la disolución del platino. También producen menos energía a comparación de otras celdas que se encuentran en la misma escala de peso.

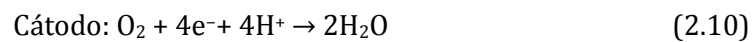


Fig. 2.5 Celda PAFC Fuji-Electric 100kw [7].

La celda de membrana de intercambio de protones o membrana polimérica PEMFC

Estas celdas son muy atractivas, puesto que presentan una baja temperatura de operación y pueden variar su salida rápidamente si se les demanda más potencia, también porque son compactas. Todo esto las vuelve una gran opción para un gran rango de aplicaciones, que van desde dispositivos electrónicos portátiles hasta para su uso en vehículos.

El electrolito que utilizan es una membrana polimérica que transporta los iones, los electrodos están hechos de carbono poroso y también un catalizador de platino. Estas celdas utilizan el hidrógeno como combustible, el cual les es provisto de convertidores incorporados y de algunos depósitos. Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



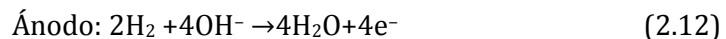
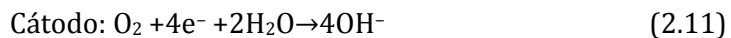
Aunque algunas desventajas de esta celda hacen que su comercialización se haya retardado, debido a los costos que tienen ciertos componentes como lo son el platino, puesto que es muy caro. También para que exista un avance fuerte en el mercado de estas celdas se debe de incrementar a nivel industrial la producción de metales nobles. Los catalizadores de platino son extremadamente sensibles al CO, es por eso que si el hidrógeno proviene por reformado se debe mantener el CO a menos de 20ppm.



Fig. 2.6 Celda de combustible PEMFC de *Horizon fuel cell technologies* [8].

La celda alcalina AFC

Estas celdas fueron las primeras en ser desarrolladas, utilizan una solución acuosa de KOH como electrolito. Las reacciones que se llevan a cabo en este tipo de celdas son las siguientes:



Los rangos de operación de estas celdas se encuentran entre los 60 a 100°C, aunque si se encuentran presurizadas puede llegar a temperaturas mayores a 150°C. Esta celda fue utilizada en el programa espacial Apollo.

La principal ventaja de esta celda es el bajo costo de sus componentes. Además de que el proceso de reducción en el cátodo tiene un sobre voltaje de activación bajo comparado con otras celdas de baja temperatura. Tienen una eficiencia del 70% en cuanto a generación eléctrica, sin embargo, su gran desventaja es que reacciona con el CO₂. En la actualidad estas pilas tienen una vida útil de 8000hrs y para ser viables necesitan superar las 40,000hrs de funcionamiento.

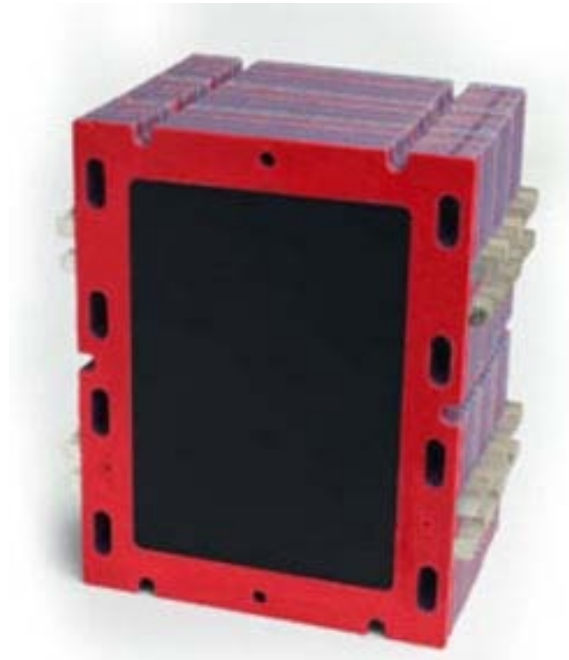
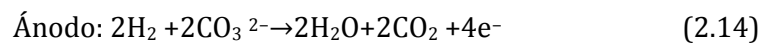
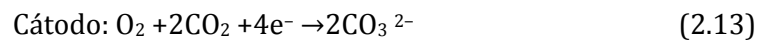


Fig. 2.7 Celda de combustible AFC de 300W-10KW de *Astris Energi Inc* [9].

La celda de carbonato fundido MCFC

El electrolito que utilizan es una mezcla de sales de carbonato fundidas que se encuentran en una matriz cerámica porosa. Las reacciones que se llevan a cabo en la celda son las siguientes:



Esta celda pertenece al grupo de las celdas de alta temperatura, con temperaturas de operación entre los 650-700°C. El electrolito que poseen de manera más específica es una mezcla de litio y carbonato de sodio o también puede ser de litio y carbonato de potasio; el electrolito se encuentra contenido en una matriz porosa de LiAlO_2 que es resistente a la corrosión.

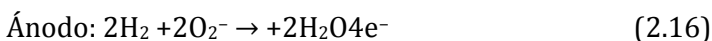
Estas celdas poseen una eficiencia del 60%, además gracias a que operan a altas temperaturas se pueden utilizar en los electrodos metales que no sean nobles, lo cual implica una reducción en los costos. También esta celda debido a su temperatura de operación permite el reformado interno para obtener hidrógeno, sin embargo, la gran desventaja de esta celda es la corrosión lo cual disminuye su vida útil.



Fig. 2.8 Celda de combustible MTU Friedrichshafen MCFC [10].

La celda de óxido sólido SOFC

Esta celda posee un electrolito y electrodos de materiales cerámicos, la temperatura de operación más alta que se ha obtenido hoy en día se encuentra entre 800-1000°C. Las reacciones que se llevan a cabo en la celda son las siguientes:



El electrodo que poseen es de yttria-zirconia, el cual es una combinación de oxido de zirconio ZrO_2 y la yttria Y_2O_3 . El zirconio tiende a formar estructuras cristalinas estables dependiendo a la temperatura que se encuentre, la más estable de ellas es la cúbica, sin embargo, se requieren temperaturas mayores a los 2000 °C para que se de dicha estructura, pero al añadir pequeñas cantidades de yttria se logra obtener esta estructura a temperaturas mucho menores.

La principal ventaja que tiene esta celda de combustible es que puede utilizar varios combustibles, un ejemplo son: monóxido de carbono, alcanos, alcoholes, amoniaco, etc.

Además se puede utilizar en aplicaciones estacionarias para aplicaciones continuas y no tan continuas. Aunque debido a las altas temperaturas que maneja y los cambios en los gradientes de temperatura que pueden darse de manera drástica, somete a una gran tensión a los sellos de la celda y a otras estructuras.



Fig. 2.9 Celda combustible SOFC de *Delphi Corporation* [11].

Industria Automotriz

El hidrógeno junto con los biocombustibles, son la alternativa a futuro para sustituir a los combustibles fósiles, ha habido grandes avances en ambos campos en el desarrollo de tecnologías en la generación y aprovechamiento de estos combustibles. Aunque el hidrógeno es una sustancia simple y muy abundante, se debe de tomar en cuenta que la viabilidad para que el hidrógeno abarque gran parte en el futuro como combustible depende de factores económicos, se prevé que el costo promedio sin impuestos del hidrógeno líquido que provenga de electrólisis por medio de energía eólica será de 1.9€ por litro de gasolina equivalente, mientras que el proveniente de biomasa tendrá un costo previsto de 0.8€ [12]. La ventaja del hidrógeno es que puede cubrir prácticamente la demanda de combustibles fósiles (gasolina y diesel) y reducir satisfactoriamente las emisiones de CO₂.

Aunque el hidrógeno posee propiedades distintas a la gasolina y al diesel, a pesar de que existen estas diferencias, el desempeño, costos y requerimientos del usuario para el almacenamiento del combustible, están basados en la tecnología de almacenamiento de la gasolina y diesel. Para que la tecnología de automóviles entre al mercado, se debe de cumplir los requerimientos de los automóviles convencionales; la seguridad, desempeño, etc.

De acuerdo al departamento de energía de Estados Unidos, los tres principales obstáculos que presenta la comercialización de los vehículos que utilicen celdas de combustible de hidrógeno son las siguientes [13]:

1. El sistema de almacenamiento del hidrógeno debe garantizar un rango mínimo de desplazamiento de 300 millas (483km), además de cumplir con todos los requisitos de seguridad, costo, desempeño y embalaje.
2. Los costos de un sistema eficiente y seguro de producción de hidrógeno, deben de disminuir para poder ser competitivo con la gasolina y además debe de cumplir los requisitos ambientales.
3. En el caso de que se combinen celdas de combustible con un motor eléctrico como tren de poder, los costos del sistema de celda de combustible deben de bajar a los 30dls por kilowatt, mientras se cumple el criterio de durabilidad y desempeño.

Para algunos de estos inconvenientes ya existen soluciones a futuro, para algunos aún falta más desarrollo, como el caso del primer obstáculo, aún no existe tecnología disponible que satisfaga el desplazamiento cumpliendo los requisitos mencionados. Aunque se están dando avances en las tecnologías actuales para almacenamiento del hidrógeno, como lo son el hidrógeno en forma de gas comprimido, hidrógeno líquido y la del hidrógeno cryo-comprimido, son las que se están estudiando más.

Para el obstáculo dos, si se combina la producción de hidrógeno mediante combustibles fósiles con energía renovables, además de incentivar su desarrollo, generaría que el costo del hidrógeno fuera comparable al de la gasolina, esto de primera instancia sustentaría la viabilidad de la producción de hidrógeno, además de que conforme avance la tecnología y la demanda de hidrógeno aumente, los costos empezarían a disminuir.

Para el último obstáculo las grandes compañías como BMW, Ford, Mazda y MAN están desarrollando tecnologías y nuevos diseños para resolver este problema. Con la combinación de un motor de combustión interna y la celda de combustible con el motor eléctrico, se lograría avanzar en este obstáculo.



Fig. 2.10 BMW que utiliza hidrógeno como combustible [14].

El sistema básico de almacenamiento de hidrógeno, debe estar constituido a grandes rasgos del tanque, válvulas, tubería, aislamiento, reguladores de presión, intercambiadores de calor, soportes de montaje, dispositivos de seguridad y cualquier componente necesario para el almacenamiento del hidrógeno. Algunos autos que utilizan hidrógeno y que han sido usados en demostraciones, se diseñaron en base a los autos de gasolina o diesel, pero tienen muchos defectos que son riesgosos debido a las diferentes propiedades que existen entre el hidrógeno la gasolina y el diesel, es por esto que los diseños futuros de los autos deben de tomar en cuenta estas propiedades.

Un problema que existe es el diseño de los autos, debido a las propiedades que posee el hidrógeno, los contenedores para el almacenaje del hidrógeno licuado se vuelven más complejos y se necesitan otros componentes periféricos lo que incrementaría el peso de todo el sistema, por esta razón la industria automotriz está buscando formas de integrar todo el sistema de almacenamiento dentro de la carrocería del automóvil.

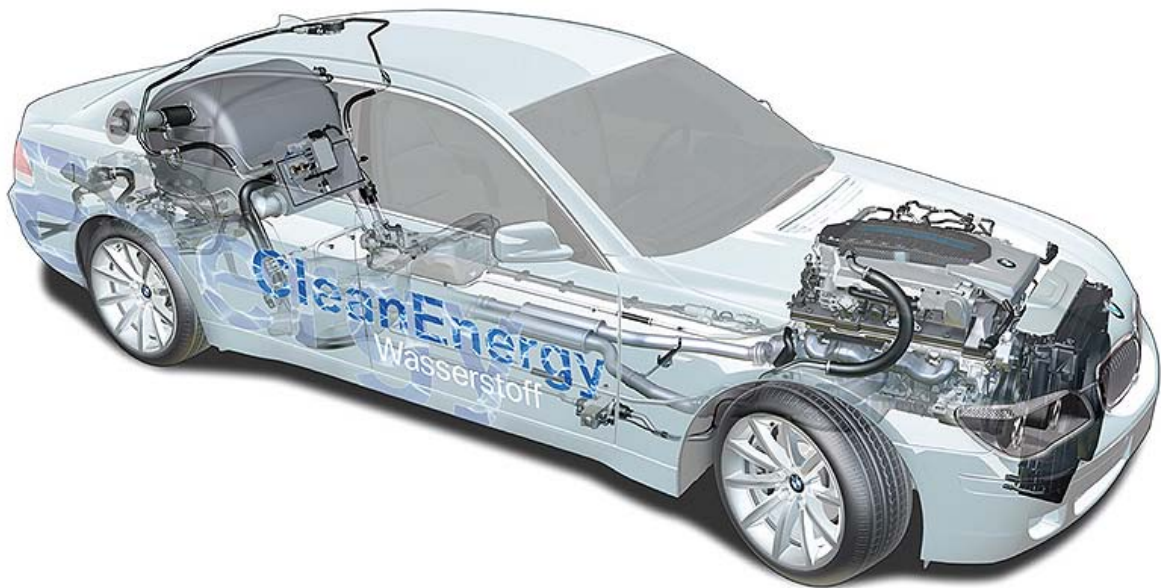


Fig. 2.11 Esquema del BMW Hydrogen 7 [15].

Requerimientos de los usuarios

Un aspecto importante sobre la tecnología automotriz a base de hidrógeno es cumplir con los requerimientos que los usuarios necesiten, esto tiene un impacto importante en el mercado del hidrógeno, debido a que la aceptación de los usuarios impulsaría el mercado del hidrógeno, es por eso que se deben de tomar en cuenta los puntos más importantes en lo que se refiere al negocio automotriz para poder impulsar el avance del hidrógeno como una fuente de energía, pero sobre todo como un combustible no contaminante.

Una parte fundamental de la industria automotriz actual son las estaciones de reabastecimiento de combustible, las cuales no presentan mayores inconvenientes al momento de abastecer, sin embargo, debido a las propiedades del hidrógeno se deben de tener en cuenta muchos aspectos además dependerá del tipo de tecnología más utilizada

en los autos en ese momento, ya sea hidrógeno licuado, gaseoso o si el hidrógeno se obtiene de algún sólido donde se encuentre almacenado.

El principal problema para el caso del hidrógeno líquido es el bajo punto de ebullición que posee (-250°C) y el bajo calor de evaporación, hacen que sea complicado el sistema de abastecimiento, se tendrían que usar aislamientos especiales para minimizar el calor que puede llegar al hidrógeno, además de que la manguera de abastecimiento tendría que ser pre-enfriada a muy bajas temperaturas.

Para el caso de que se sirva hidrógeno en forma de gas, se han planteado dos opciones, la primera de ellas abastecer a una presión mayor que la del tanque de almacenamiento y la segunda es abastecer con un gas pre-enfriado que se encuentre a la presión del tanque de almacenamiento [16]. En la primera opción se debe contemplar manufacturar un tanque de almacenamiento que soporte presiones mayores (la de abastecimiento), aunque esto trae consigo problemas como tener mayores requerimientos de seguridad, más materiales para su construcción, etc. La segunda opción resulta más viable puesto que no se requieren temperaturas muy bajas de enfriamiento, sin embargo, el pre-enfriamiento puede dañar partes del tanque de almacenamiento, lo cual traería consigo que la durabilidad y la confiabilidad del tanque se vieran comprometidas.

Estos sistemas de abastecimiento son los que se prevé que en el futuro podrán ser rentables, además de que se siguen estudiando para solucionar los inconvenientes que presentan. Para la tecnología de almacenamiento sólido se siguen las investigaciones aunque aún no se prevé que sea una opción en corto plazo.



Fig. 2.12 Estación de abastecimiento de hidrógeno desarrollada por *Air Products, Inc* [17].

Otro aspecto que se debe de cumplir para que los autos que utilicen hidrógeno sean atractivos, es que rindan en distancia recorrida aproximadamente igual que los autos convencionales. También se debe contemplar que uno de los puntos principales que propone el departamento de energía de Estados Unidos es precisamente que debe de cumplir con un rango de distancia mínimo de 300 millas, para lograr esto se requieren aproximadamente de 7 a 10kg de hidrógeno, 10kg de hidrógeno tiene un contenido energético equivalente a 38ltrs de gasolina. Tener esa cantidad de hidrógeno crea problemas en cuanto a diseño del auto, es por esto que se busca aumentar la eficiencia de manera considerable para no usar demasiado hidrógeno y obtener los mismos resultados, debido a que se prevé que se necesitarán tanques para el caso del hidrógeno licuado de un volumen seis veces mayor que para los actuales tanques de gasolina con la misma capacidad de energía almacenada, aunque con los estudios para reducir el tamaño se cree que disminuirá a cuatro veces.

El siguiente punto que también es de vital importancia para el usuario es que el vehículo pueda operar bajo cualquier condición climática, esto es que el auto no sufra fallos o cualquier otro desperfecto que cause que deje de funcionar. Si se usa un motor de combustión interna alimentado por hidrógeno la operación del automóvil no tendría en teoría ningún problema, puesto que el rango de operación se encuentra entre los -40°C a 60°C . Aunque si se usan celdas de combustible el régimen de operación es indispensable para que exista un buen funcionamiento de la celda y esta no se dañe.

Para el caso de la seguridad, los automóviles que utilicen hidrógeno deben de ser al menos igual de seguros que los autos convencionales, sin que esto comprometa el desempeño y la capacidad de éste. El reto de esta parte radica en que aún no se tiene experiencia o muy poco en cuanto a la fiabilidad de los sistemas de seguridad, el mejoramiento de la seguridad se logrará con el tiempo y la información estadística que se vaya obteniendo.

Máquina de combustión interna de hidrógeno

En años recientes se han llevado a cabo avances en el desarrollo de vehículos que utilicen una máquina de combustión interna a base de hidrógeno. La Ford Motor Company ha desarrollado un motor, el 6.8L V10 que utiliza hidrógeno como se muestra en la Fig. 2.13 [18]. El cual ha sido usado en el autobús Ford F450 para transporte en aeropuertos.



Fig. 2.13 Motor Ford V10 [19].

Actualmente se está apostando mucho por esta tecnología, puesto que las celdas de combustible a pesar de ser prometedoras aún no son redituables. Además el hidrógeno posee ciertas propiedades para la combustión, como lo son su amplio rango de inflamabilidad, baja energía de ignición, su alta temperatura de auto-ignición, su alta difusividad, baja densidad, etc.

Estas propiedades causarían problemas en un motor diseñado para gasolina, es por eso que se deben de hacer las modificaciones necesarias. Por ejemplo la baja densidad del hidrógeno, representa un problema por la cantidad de volumen que ocupa en el cilindro antes de utilizarse, como el volumen se incrementa, la cantidad de aire en el cilindro se reduce y esto hace que la salida de energía se vea reducida. Sin embargo, el amplio rango de inflamabilidad del hidrógeno, hace que a pesar de que haya menos aire, el radio de aire/combustible hace que la mezcla se encienda, esto reduce la emisión de NO_x y aumenta la eficiencia.

Otro aspecto importante es la baja energía de ignición, esto hace que el motor de hidrógeno sea susceptible a una pre-ignición, es decir, cualquier zona o punto caliente en el motor puede causar una pre-ignición.

Es por esto que deben de existir modificaciones en la máquina de combustión interna convencional, uno de los cambios tendrían que ser la bujías. Deben de ser del tipo frío nominal y no deben de ser de platino, puesto que el platino es un catalizador para la pre-ignición. Estas bujías están diseñadas para enfriarse rápidamente y así evitar que surja una pre-ignición.

Otro cambio que debe existir es en cuanto al aceite que se utilice en el motor. Se debe de usar aceite sintético para evitar puntos calientes causados por la pirolisis y así evitar la pre-ignición. Para reducir aún más esto se debería de emplear un cárter para motor con un sistema de ventilación y separador de aceite.

Una gran ventaja respecto a las propiedades del hidrógeno es su alta difusividad, puesto que se dispersa rápidamente en el aire lo que crea una mezcla más uniforme. También si existiera una fuga de hidrógeno, éste se dispersaría rápidamente y así se eliminarían las condiciones inseguras debido a una fuga.

Otro aspecto a tratar es la alta velocidad de quemado del hidrógeno, el cual se quema 8.3 veces más rápido que la gasolina, esto trae como consecuencia un diseño más fino del motor en cuanto a control, dado que ahora hay una necesidad de controlar de manera precisa el encendido de la bujía.

El octanaje del hidrógeno es de 140, esto permite al motor operar a radios más altos de compresión a comparación de la gasolina, esto incrementa la eficiencia térmica y por tanto produce más potencia de salida.

Un método para vencer la baja densidad del hidrógeno, es utilizando un turbo cargador o súper cargador para forzar más aire hacia el cilindro. El turbo cargador junto con un alto radio de compresión puede generar un desempeño cercano al del motor de gasolina. Otro método sería inyectar el hidrógeno directamente al cilindro una vez que el aire ya está ahí o también usar hidrógeno líquido aumentaría la cantidad de aire, sin embargo, todos estos diseños deben de ser competitivos.

Celdas de combustible portátiles

Hoy en día se están buscando métodos para crear dispositivos de energía más pequeños para aplicaciones electrónicas a pequeña escala, durante años se han utilizado las baterías alcalinas, sin embargo, debido al problema que representa el reciclarlas y los materiales que contiene, dañinos para el medio ambiente, ha dado paso a que se investiguen nuevas tecnologías para sustituir a éstas, además de ser tecnologías limpias.

Algunas tecnologías actuales y en desarrollo son las baterías de ion-litio recargables, baterías “oblea”, módulos fotovoltaicos portátiles, módulos fotovoltaicos flexibles y las celdas de combustible portátiles. Cabe mencionar que las baterías recargables de litio es una tecnología ya muy bien estudiada y que ha tenido gran auge debido a que pueden ser recargadas con facilidad y su capacidad para dispositivos electrónicos pequeños que se utilizan de manera constante, haciendo que se vuelvan prácticos, además de ir sustituyendo poco a poco a las baterías alcalinas.

Aunque las demás tecnologías también ya están muy estudiadas e incluso ya hay dispositivos comerciales, el enfoque de ésta sección será sobre las celdas de combustible portátiles, debido al uso del hidrógeno en ellas.

Uno de los principales objetivos de las celdas de combustible portátiles es incrementar el tiempo de duración y disponibilidad de los dispositivos electrónicos portátiles mucho más que los sistemas de baterías actuales. También por ser celdas de combustibles, deben de cumplir en teoría, con las condiciones que tienen las celdas para aplicaciones estacionarias, sin embargo, al reducir las celdas, componentes como las válvulas, bombas, sensores, etc. Se vuelven inestables, por esto se están desarrollando sistemas “pasivos” para evitar el uso de estos componentes.

La tecnología de celda de combustible más avanzada es la celda PEM, existen celdas portátiles de este tipo ya de manera comercial, aunque aún no se logra tener una densidad de corriente mayor al de las baterías y costos bajos de producción masiva. Existen ya algunos diseños dentro de las celdas PEM portátiles, las cuales se han estado estudiado para un mejor desempeño y posteriormente su comercialización. Como el cargador Minipak de la compañía Horizon que se muestra en la siguiente figura.



Fig. 2.14 Cargador MiniPAK de *Horizon* [20].

Celda de combustible PEM de “respiración” portátil

Es un sistema pasivo que no requiere de un refrigerante o un sistema de humidificación, opera bajo condiciones ambientales y funciona continuamente con hidrógeno y aire del medio ambiente. El oxígeno que se requiere para la reacción proviene del aire del medio ambiente, mediante difusión y convección, el oxígeno es llevado al cátodo. El agua que se produce de la reacción sirve para mantener la humedad del sistema para mantener su rendimiento.

Esta celda resulta atractiva debido a la eliminación de varios componentes con lo que se reducen los costos, peso y otros factores importantes, sin embargo, su desempeño depende de las condiciones ambientales, además del control del agua, debido a que no hay control sobre la cantidad de aire que entra a la celda. La celda tiene una densidad de potencia de salida menor que las celdas de convección forzada.

Celda de combustible PEM de 1W para linterna marca Angstrom Power

Es una celda especialmente diseñada para una linterna de 2.6cm de diámetro y 15 cm de longitud, este es el sistema más pequeño de celda PEM en la actualidad, el cual brinda 1W de potencia eléctrica. La celda opera bajo condiciones ambientales y utiliza el principio de convección para transportar el aire al cátodo, mientras que el hidrógeno es suministrado en forma de un hidruro metálico, los tanques de combustible de la celda tienen una capacidad de 700Whr.

Celda de combustible PEM 30W de Boro hidruro de sodio marca Protonex/Millennium

Es una celda para aplicaciones militares, el hidrógeno en esta celda proviene de un cartucho que tiene del 20 al 25% de boro hidruro de sodio, 3% de hidróxido de sodio y del 72 al 77% de agua des-ionizada. Los cartuchos son introducidos en la celda, el cartucho tiene al combustible y el catalizador, además de tener espacio para los productos de la reacción y la interface eléctrica.

2.3 LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

La mayoría del hidrógeno que se produce en la actualidad proviene de los combustibles fósiles, en especial del reformado de vapor del gas natural. Desafortunadamente esta forma de obtener hidrógeno no es ambientalmente benigna, con esto se ve que el hidrógeno se debe de extraer del agua para evitar los gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

Para obtener hidrógeno del agua se deben tener ciclos termoquímicos, y procesos electrolíticos que requerirán una fuente de energía primaria capaz de proveer energía eléctrica y térmica. La electrólisis convencional acoplada a una planta nuclear puede resultar viable económicamente siempre y cuando se utilice fuera de las horas pico de demanda de energía, aunque el costo capital es alto.

Las plantas que existen en la actualidad son típicamente enfriadas por agua con temperaturas de operación de 500-750K. Aunque ya existen diseños avanzados que cumplen con los requerimientos de temperatura de la electrólisis, un ejemplo son los reactores de alta temperatura (VHTR) que pueden proveer la energía térmica necesaria, alcanzan temperaturas de 1100k. Los reactores nucleares de alta temperatura tienen el potencial para incrementar substancialmente la eficiencia en la producción de hidrógeno del agua.

La electrólisis de alta temperatura apoyada por el calor del proceso nuclear y la electricidad, tiene el potencial para producir hidrógeno con eficiencias del 50% o mayores. La electrólisis de alta temperatura utiliza una combinación de energía térmica y electricidad para disociar la molécula de agua. Con temperaturas de operación más altas se tiene un mejor desempeño debido a que se decremента los sobre-potenciales en el electrodo y se incrementa la difusividad del ión de oxígeno, además de que la demanda de electricidad decremента con la temperatura.

Existen varios tipos de electrolizadores, pero para la electrólisis de alta temperatura con temperaturas de 1100-1250k típicamente se utilizan electrolizadores con electrolitos de yttria- zirconio.

Eficiencia de la electrólisis

Se puede definir una eficiencia de electrólisis para las celdas electrolíticas. La eficiencia térmica cuantifica el valor de calentamiento del hidrógeno producido por unidad de energía eléctrica consumida. Basado en lo anterior y que la corriente eléctrica está directamente relacionada al índice de producción molar de hidrógeno, se tiene que la eficiencia puede ser expresada en términos del potencial de operación de la celda como:

$$n_e = \frac{-\Delta hf/2F}{V} \quad (2.18)$$

Donde F es el número de Faraday (96487 J/V mol).

La eficiencia del electrolizador es inversamente proporcional al voltaje de operación, voltajes de operación más altos incrementan los índices de producción de hidrógeno pero disminuyen la eficiencia. Se debe de buscar el balance entre un buen índice de producción y eficiencia, esto ocurre con voltajes de operación cerca o ligeramente menor del valor térmico neutro, alrededor de 1.29 V.

Otra eficiencia que se tiene es la de Faraday, la cual cuantifica el valor máximo de energía eléctrica del hidrógeno producido por unidad de energía eléctrica consumida. También puede ser definida en términos del potencial de operación de la celda y el índice de producción de hidrógeno.

$$n_F = \frac{\Delta gf/2F}{E} = \frac{\Delta N_{H_2} \Delta gf}{EI} \quad (2.19)$$

Otros procesos de producción de hidrógeno

Existen otros procesos de producción de hidrógeno a gran escala que no utilizan energía nuclear. Son cuatro los principales sistemas de producción que se utilizan: Reformado de metano, gasificación de carbón, gasificación de biomasa o pirolisis y electrólisis convencional.

Reformado de metano

Este proceso involucra la reacción de gas natural desulfurizado con un vapor de alta temperatura sobre un catalizador a base de níquel. Esto produce un gas que es principalmente una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. El monóxido de carbono es después convertido a hidrógeno y a CO₂ mediante una reacción de intercambio de gas de agua, después el hidrógeno es separado y el gas restante en general el CO₂ es removido mediante un sistema de absorción físico o químico.

Gasificación del carbón

Este proceso involucra el uso de syngas (CO y H₂), en general se usa directamente para la generación de energía eléctrica, para químicos sintéticos, y también para la producción de hidrógeno, aunque el proceso en general es muy parecido al del reformado de metano. También se puede hacer el proceso de "captura de pre-combustión" donde el hidrógeno es aislado del CO₂ y se hace combustión con él para generar electricidad.

Gasificación de biomasa y pirolisis

En general la biomasa utiliza caña de azúcar, cascara de cacahuete, residuos de sauce, etc. Se lleva a cabo un pre-tratamiento de la biomasa dependiendo de cual se trate puede ser secado, molido, etc. Sin embargo, el proceso utilizado es muy similar al del reformado de metano. Los gasificadores se calientan de manera indirecta, en la ausencia de oxígeno y haciendo circular arena caliente en la cámara de gasificación y también de manera directa cuando se hace una oxidación parcial de la biomasa con oxígeno puro en la cámara de gasificación.

Electrohidrogenesis

Este proceso experimental utiliza una celda de combustible microbiana para catalizar protones y neutrones liberados por una bacteria dentro de un sustrato biodegradable, para producir hidrógeno sobre la aplicación de una pequeña carga al circuito. La bacteria consume material orgánico del sustrato. Es un proceso prometedor, debido a que las eficiencias hasta ahora reportadas son del 64-82% [23].