

1. El hidrógeno como vector energético

1.1 Antecedentes

El hidrógeno fue descubierto por primera vez en el siglo XV por T. Von Hohenheim (Paracelso) al realizar experimentos con metales y ácidos; empero, ignoraba de que el gas generado era un elemento químico y no una mezcla de varios. Éste elemento recibió dicho nombre desde el siglo XIX, cuando Antoine Lavoisier corroboró los estudios de Henry Cavendish acerca de la obtención de un gas obtenido de manera similar a la de Hohenheim, y descubriendo también que su combustión generaba agua (etimológicamente significa generador de agua) [1].

Cada átomo es capaz de emitir o absorber radiación electromagnética a ciertas frecuencias propias de cada elemento, las cuales son iguales tanto cuando absorbe energía que cuando la emite (Ley de Kirchhoff) [2]. Si a dicho elemento se le suministra energía calorífica y posteriormente es emitida en forma de radiación, el conjunto de frecuencias a la que esta energía es emitida constituye su espectro de emisión; de la misma forma que, recibiendo radiación electromagnética, las frecuencias en las cuales ésta es absorbida constituyen su espectro de absorción.

Tras las observaciones en 1802 de Wollaston, en las que mostraba que la luz solar descompuesta por un espectroscopio de prisma producía una imagen en la que se formaban líneas negras delgadas (líneas de Fraunhofer), G.G. Stokes supuso que la luz que debiera llenar dichos espacios en el espectro solar debía ser absorbida por ciertos átomos en la corona solar [3]. Cada elemento por separado absorbía ondas de una cierta longitud, y éstas eran determinadas en un laboratorio midiendo el espectro de luz emitido por descargas eléctricas emitidas en contenedores con cada elemento. Por medio de estos experimentos es que se pudo determinar la presencia de Helio e Hidrógeno en el sol.

En 1885 Johann J. Balmer obtuvo una fórmula empírica por medio de la cual podía relacionar las longitudes de onda observadas en el espectro del hidrógeno para la región visible y en el ultravioleta. El modelo atómico de Bohr, (del cual se hablará en el capítulo 2), partió, entre otras cosas, de la de la necesidad de explicar la estabilidad de la materia y los espectros de emisión y absorción discretos que se observan en los gases (figura 1.1), para lo cual se basó en el átomo de hidrógeno, por la simplicidad que ofrecía [4].

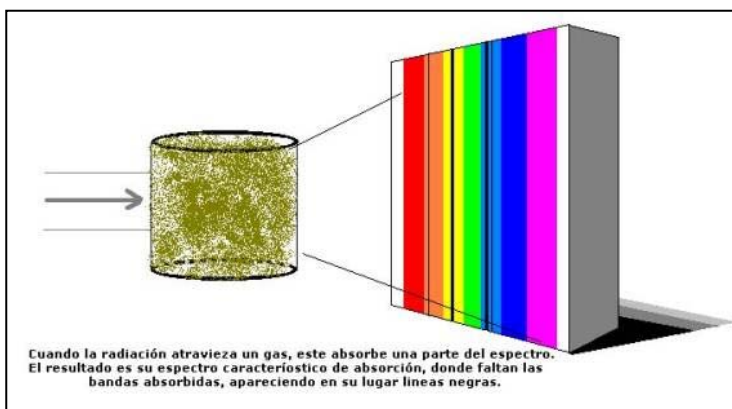


Figura 1.1 Espectros de absorción de los gases [5].

A partir del desarrollo de la radio astronomía, a mediados del siglo XX es que se observó la presencia masiva de hidrógeno monoatómico en zonas de alta temperatura de las galaxias, ya que éste emite microondas cuando, en un principio, el spin del protón y del electrón del átomo de hidrógeno son iguales y dicho átomo recibe energía por colisionar con otro adyacente; la energía adquirida es posteriormente liberada en ondas con una longitud de onda de 21 [cm]. La primera vez que se midió la forma espiral de la Vía Láctea, se hizo por detección de nubes de hidrógeno [6].

Algunas de las principales características del hidrógeno son:

- Se encuentra en estado gaseoso en condiciones normales (25°C y 1 atm).
- Temperatura de fusión de -259.2° y de ebullición de -252.77°.
- Considerando condiciones de 0°C y 1 atm, el H₂ cumple con la ecuación del gas ideal:

$$Pv = RT \quad (1.1)$$

$$[Pa][m^3] = [J/(mol * K)][K]$$

Donde p es la presión a la que se encuentra el gas, v el volumen, R la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta [7].

La razón por la que es necesario equipo especializado para el manejo del hidrógeno es que, a pesar de que tiene combustión espontánea a los 585 [°C] aproximadamente, (temperatura mayor que la del gas natural, que es de 537 [°C]) [8], aun en bajas concentraciones, al combinarse con el aire produce una reacción violenta que desemboca en explosiones que son prácticamente invisibles al ojo humano [9].

A pesar de las ideas generalizadas que se tienen sobre la peligrosidad del hidrógeno para su empleo en transporte particular, la frecuencia de explosión estimada para vehículos es de $7.35 \times 10^{-35} [\frac{1}{año \cdot carro}]$, lo cual representa menos del 2% de los accidentes de tráfico por carro y por año. El 99.8% del riesgo inherente que se encuentra en explosiones en ambientes abiertos es comparable con las consecuencias de los accidentes de tráfico normales (daño a personas, carros o propiedades en el área del accidente), y en cuanto a los posibles accidentes letales, éste tiene menos del 0.2% de riesgo adicional por año y por carro (5.64×10^{-05}); lo cual podría inclusive indicar que la explosión de hidrógeno reduce el riesgo de fatalidad en accidentes automovilísticos [10]. Dichos estudios fueron realizados considerando autos de pasajeros con motores híbridos en los que las causas eran accidentes por choque, accidentes con incendios sin choques y fugas de hidrógeno seguidas de combustión, durante circulación normal, circulación en ambientes semi-confinados y en ambientes cerrados como en un estacionamiento.

1.2 La producción de hidrógeno

Por producción de hidrógeno se entiende el extraer el hidrógeno en moléculas independientes, ya sea de hidrocarburos, agua u otros compuestos; ya que, aunque es el elemento más abundante del universo, la proporción en la que se halla en estado libre es de alrededor del 0.02% [11].

Un vector energético es aquel energético que no es en sí energía primaria, porque para su obtención tuvo previamente que utilizarse energía de alguna otra fuente [12]. Se busca utilizar al

hidrógeno como vector, precisamente por su alto contenido energético y además de producir únicamente agua como desecho una vez utilizado, además de ser prácticamente ilimitado.

Actualmente el 96% de la producción de hidrógeno proviene directamente de combustibles fósiles y el otro 4% es producido indirectamente con electricidad. El mayor consumo de hidrógeno ocurre en la refinación de petróleo y en procesos petroquímicos para la síntesis de etanol y amoníaco [13].

La mayor cantidad del hidrógeno producido a nivel industrial proviene del reformado de gas natural (tabla 1.1), esto es porque actualmente es el hidrocarburo del cual se puede obtener hidrógeno al menor costo. Un incremento en la demanda del H_2 provocaría también un aumento dramático en el precio del gas natural, e inclusive resolviendo este problema, aún se deben considerar los contaminantes, debido a que la obtención de este vector energético, a partir de hidrocarburos, tiene como consecuencia una gran emisión de GEI's¹, en caso de que no se capture el CO_2 emitido, y es por esto que no debe simplemente incrementarse la producción de H_2 y sustituir ciertas tecnologías, sino hacerlo en cada etapa del ciclo de producción.

Origen	Porcentaje
Gas natural	48
Petróleo	30
Carbón	15
Electrólisis	3
Otros	4

Tabla 1.1 Principales fuentes de producción de hidrógeno [14].

De acuerdo a las diversas formas de producción de hidrógeno que se verán más adelante, éstas pueden fácilmente englobarse en dos vertientes: la producción centralizada, y la distribuida. La primera tiene comúnmente la ventaja de reducir costos debido a las grandes capacidades de producción, lo cual ayuda a amortizar de forma más rápida las inversiones, mientras que la segunda, aunque es de costos más elevados, es capaz de adaptarse mejor a las necesidades de particulares e industriales pequeños.

Uno de los factores que más influye en el análisis comparativo entre una aplicación centralizada o una distribuida es que, si para la implementación de algún tipo de tecnología es necesario algún cambio en la infraestructura, el costo y la inconveniencia asociados al mismo se incrementan en las mismas proporciones que la magnitud de dicho cambio [15].

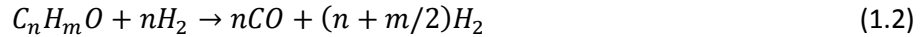
1.2.1 Diversas formas de producción de hidrógeno.

- Reformado de Gas.

El gas natural se encuentra más comúnmente junto con yacimientos petroleros [16], por lo que es lógico inferir que países con grandes reservas de petróleo también tengan grandes cantidades de gas, aunque no necesariamente en las mismas proporciones. Los países que actualmente cuentan con mayores reservas de gas natural son Rusia, con aproximadamente el 25% del total mundial, Irán, con 16% y Qatar, con el 15% [17].

¹ GEI= Gases de Efecto Invernadero

El reformado de gas es un proceso catalítico y endotérmico llevado a cabo a temperaturas entre 970 y 1100 [K] y presiones alrededor de 3.5 [MPa]², con níquel como catalizador. La alta proporción de hidrógeno respecto al oxígeno en los hidrocarburos los hace aptos para el proceso de reformado, el más utilizado es el metano. La reacción básica consiste de dos partes:



En la figura 1.1 se muestra un diagrama completo de las etapas del reformado de gas utilizando vapor de agua. En un principio, se hacen circular el metano y vapor de agua a través de tubos en lechos catalizadores. Posteriormente el gas se manda a la unidad de desplazamiento de CO, en la que el CO junto con el agua produce CO_2 y H_2 , mientras que el calor liberado se recircula hacia la entrada del reformador. Después de esto, el gas se condensa para remover el vapor de agua y se depura en la unidad PSA³, por medio de la cual se pueden separar gases mezclados según su afinidad por un material adsorbente [18]. El gas de cola es un combustible compuesto por los gases adsorbidos anteriormente y se recirculan también hacia el reformador.

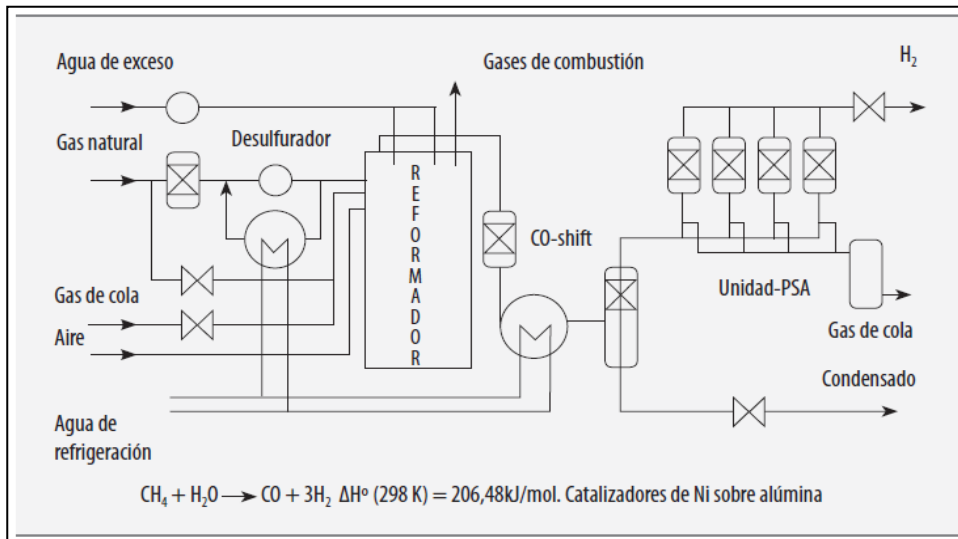


Figura 1.1 Esquema del reformado de gas con vapor de agua [19]

En estudios realizados en 2007 acerca de la producción de hidrógeno en base a gas, con y sin captura de CO_2 , se esperaba que la producción de hidrógeno para 2020 oscilara entre 2.55 y 2.33 [USD/Kg], en una planta con factor de planta de 90% y capacidades de producción de 379,360 [Kg/día], con un precio del gas de 0.364 [\$/Nm³]⁴ [20].

La principal desventaja de este proceso son las altas emisiones de CO_2 durante cada etapa, que en total se encuentran alrededor de los 14[Kg CO_2 /Kg H_2] [21], con los problemas asociados que trae esto consigo (daños a la capa de ozono, acidificación, eutrofización; que tiene como consecuencia

² 1 Pa= 1 [N/m²]

³ PSA= "Pressure Swing Adsorption", Proceso por medio del cual se separan gases de una mezcla sometida a presión de acuerdo a la especie molecular. [22]

⁴ Nm³ = 1 m³ de un gas medido en condiciones estándar de presión y temperatura. [23]

la disminución de oxígeno en el agua, smog invernal dependiente de la dispersión atmosférica, etc.) [24]. Otro problema importante es que sería necesario adaptar plantas para producciones pequeñas descentralizadas para estaciones de servicio y distribución, y como se muestra en la figura 1.2, los costos de inversión dependen en gran medida de la capacidad de la planta; por lo que plantas pequeñas tendrían costos elevados [25].

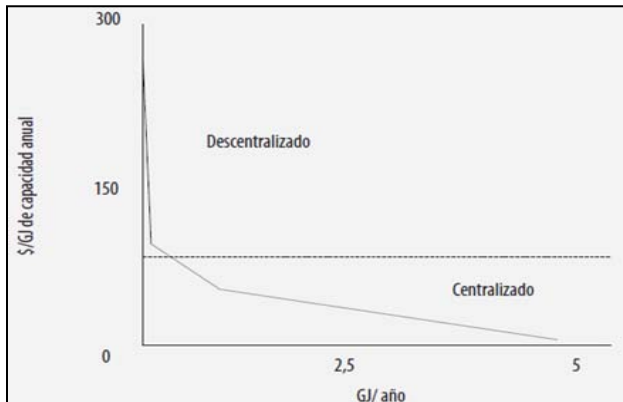
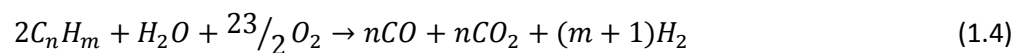


Figura 1.2. Costos de inversión dependientes de la capacidad de la planta [25].

- Oxidación Parcial.

La oxidación parcial de hidrocarburos (POX) es un proceso exotérmico (se libera energía calorífica) en condiciones moderadas de presión y temperatura, por lo que no son necesarios quemadores externos para la mantención de la reacción, y puede o no utilizarse un catalizador, dependiendo del tipo de proceso seleccionado. Aquí se tienen emisiones tanto de CO como de CO_2 [26].

Como su nombre lo indica, se lleva a cabo una oxidación incompleta, de forma que quede libre el hidrógeno mientras que se oxida el carbón. La reacción básica de este proceso es [27]:



La eficiencia de este proceso es de alrededor del 70%.

- Gasificación de carbón.

Con este método, en lugar de quemar directamente el carbón, éste reacciona con vapor con niveles controlados de oxígeno, presión y temperatura, dando lugar a que se tenga una oxidación parcial. En estas condiciones, se rompen los enlaces químicos del carbón, y se forma una mezcla gaseosa de hidrógeno y monóxido de carbono, de la que se puede separar de una forma relativamente fácil muchos de los contaminantes y GEI's de la mezcla utilizable.

Tanto el procesamiento del gas natural como del carbón para la producción de hidrógeno son similares en tanto que, en ambos procesos, el combustible se combina en un proceso autotérmico⁵ [28] con oxígeno y vapor para producir gas sintético, que consiste principalmente de monóxido de carbono e hidrógeno, y en menor proporción, dióxido de carbono, agua y metano.

⁵ Combustión de un material de valor calorífico suficiente o con recuperación de calor efectiva para que no se necesite combustible adicional después de la fase inicial.

Este gas sintético es procesado posteriormente para extraer hidrógeno del metano y del monóxido de carbono [29].

Desde 2003 E.E.U.U. anunció una iniciativa de inversión de mil millones de dólares para construir un prototipo de planta de cogeneración de hidrógeno y electricidad implementando además captura y secuestro de CO_2 ; estimando que los costos de producción y distribución de hidrógeno oscilarían en un principio entre 4.5 y 5.6 [\$/Kg] [30].

Pirólisis

Este proceso consiste en descomponer combustibles sólidos con calor (alrededor de 450 [°C]) en ausencia de oxígeno. Deben controlarse las condiciones de presión y temperatura para obtener un gas de síntesis compuesto de CO y H_2 que posteriormente recibe un tratamiento de purificación similar al del gas de las últimas partes del reformado [31].

La ventaja de este proceso es que es factible de ser utilizado para el manejo de residuos sólidos urbanos [32].

- **Electrólisis del agua.**

Aplicando una diferencia de potencial suficientemente grande dentro de un contenedor con agua, logran disociarse las moléculas en H_2 y O (figura 1.3), aunque el gasto energético es demasiado como para ser factible económicamente, además de que la velocidad de producción de hidrógeno es directamente proporcional a la variación de energía requerida para el proceso.

La electrólisis se puede llevar a cabo con electrolizadores convencionales, de polímeros sólidos o con electrolizadores de agua y vapor a altas temperaturas [33]. Las diferencias principales entre los diversos sistemas de electrólisis radican en la variación de las temperaturas de operación, las propiedades electrolíticas y en cierta medida, las presiones manejadas.

Las principales reacciones que se llevan a cabo en este proceso son [34]:

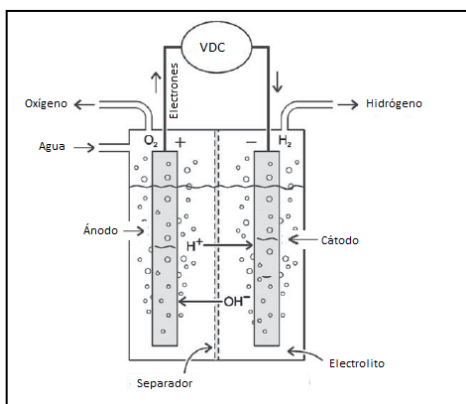


Figura 1.3. Celda de electrólisis básica [35].

La electrólisis es una de las pocas formas de producir hidrógeno que puede estar completamente desligada de la utilización de combustibles fósiles, además de ser factible a grande y pequeña escala, acoplando sistemas de energías renovables por medio de los cuales se obtenga la electricidad requerida, como paneles solares o turbinas de viento.

Con esta forma de producción se han llegado a estimaciones de 4.36 [\$/Kg], tomando en cuenta una planta de producción total de hidrógeno de 1000 [Kg/día] con un factor de planta de 40% y un costo estimado de electricidad en horario base de 4.83 [c/KWh]⁶ [36].

- **Energía nuclear**

Los métodos de producción de hidrógeno por vía nuclear más plausibles a ser implementados en un futuro son tres: electrólisis de alta temperatura, el ciclo termoquímico SI (del cual se hablará en el capítulo dedicado al proceso) y el reformado con vapor de moderada temperatura [37].

La eficiencia de la electrólisis del agua que se vio anteriormente se ve afectada directamente por la temperatura de operación. Si ésta es incrementada, se reducen costos debido a que es necesaria una diferencia de potencial menor para la ruptura de las moléculas, aunque esto es en el caso de que se aproveche directamente el calor proveniente de otro proceso, como de una planta nuclear (figura 1.4), ya que de otra forma se tendrían incluso más pérdidas por elevar la temperatura pensando en tener menores gastos en energía eléctrica. Se ha demostrado que trabajando desde 350 a 1050 [K], puede reducirse hasta en un 35% la energía eléctrica necesaria respecto a la electrólisis en condiciones normales [38].

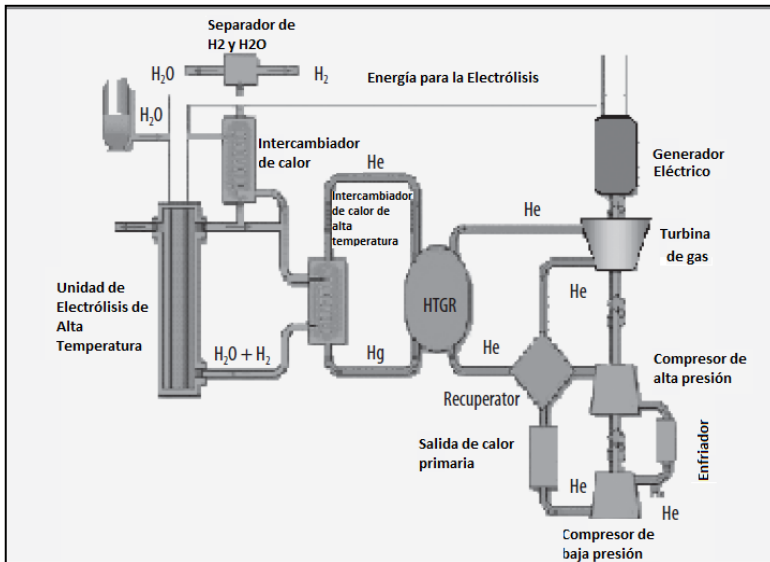


Figura 1.4. Producción de Hidrógeno mediante HTE con acoplamiento a un reactor HTGR⁷ [37].

En la “HTE” (electrólisis de alta temperatura) acoplada a un reactor de 600 [MWt], una configuración adecuada sería aquella en la que aproximadamente el 11% de dicha energía se destine a la generación de vapor supercalentado y el resto para la electricidad necesaria para los

⁶ Centavos de dólar.

⁷ Adaptada de la original.

electrolizadores. Se espera que el proceso completo tenga eficiencias del 50 al 60% aproximadamente [39].

En cuanto a la electrólisis de moderada temperatura, se tienen varios ciclos que pueden ser adaptados a plantas nucleares y geotérmicas (tabla 1.2); y para el caso de las geotérmicas, obtienen el calor directamente del subsuelo y la electricidad producida por la planta con turbinas de ciclo Rankine binario [40].

Ciclo	Nombre	Elementos	# de etapas	Temperatura máxima (°C)	Reacciones	Temperatura
1	Cu-Cl	Cu, Cl	5	500	$2\text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CuO} + \text{CuCl}_2 + 2\text{HCl}$	400
					$\text{CuO} + \text{CuCl}_2 \rightarrow 2\text{CuCl} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	500
					$4\text{CuCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CuCl}_2 + 2\text{Cu}$	25-80
					$\text{CuCl}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{CuCl}_2(\text{s})$	> 100
					$2\text{Cu} + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{CuCl} + \text{H}_2$	430-475
2	Argonne	Li, N, I	3	475	$\text{LiNO}_2 + \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LiNO}_3 + 2\text{HI}$	25
					$2\text{HI} \rightarrow \text{I}_2 + \text{H}_2$	425
					$\text{LiNO}_3 \rightarrow \text{LiNO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	475
					$\text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCl} + \text{MgO}$	450
3	Mg-Cl	Mg, Cl	3	500	$\text{MgO} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{MgCl}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	500
					$2\text{HCl} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2$	80
4	Heavy element halide	U, Eu, Br	4	300	$2(\text{UO}_2\text{Br}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}) \rightarrow 2\text{UO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + 4\text{HBr} + 2\text{H}_2\text{O}$	300
					$4\text{EuBr}_2 + 4\text{HBr} \rightarrow 4\text{EuBr}_3 + 2\text{H}_2$	Exothermic
					$4\text{EuBr}_3 \rightarrow 4\text{EuBr}_2 + 2\text{Br}_2$	300
					$2\text{UO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{Br}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2(\text{UO}_2\text{Br}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}) + \text{O}_2$	Exothermic
5	Sulphuric acid	S,	3	550	$2\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$	80
					$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3$	450
					$\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	550
					$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{Cs} \rightarrow 2\text{CsOH} + \text{H}_2$	450
6	Astrojet central	Cs	4	450	$2\text{CsOH} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CsO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	250
					$2\text{CsO}_2 \rightarrow \text{Cs}_2\text{O} + 3/2\text{O}_2$	450
					$\text{Cs}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Cs} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	-

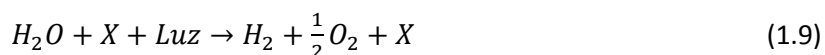
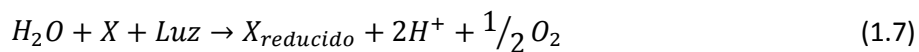
Tabla 1.2. Ciclos termoquímicos e híbridos de baja y moderada temperatura⁸ [41].

- **Energía solar.**

Existen diversos métodos de producción de hidrógeno utilizando la energía de los rayos solares, siendo los principales:

- **Fotólisis o Catálisis.**

Cuando las moléculas de agua absorben energía proveniente de rayos ultravioleta a una tasa de 285.57 [KJ/mol] de agua, se libera hidrógeno. Utilizando un fotocatalizador 'X' para absorber la luz visible y emitir ondas de longitud necesaria para la producción de hidrógeno; las reacciones se dan de la siguiente forma [42]:



Utilizando celdas solares o turbinas de viento y un electrolizador (fotoelectrolizador) se puede producir también hidrógeno [43].

La energía total radiante que impacta la superficie terrestre es de $5.45 \times 10^{18} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{año}} \right]$ [44], y los impedimentos de utilizar sistemas solares son las bajas eficiencias y altos costos; superándose

⁸ Adaptada de la original.

éstos, la energía solar sería en varios órdenes de magnitud mayor que la necesaria para cubrir las “necesidades” energéticas de la humanidad.

- **Electrólisis fotovoltaica.**

Es posible convertir la radiación solar directamente a electricidad utilizando celdas fotovoltaicas, las cuales son en su mayoría hechas de silicón [45]. Se prevé que esta tecnología pueda alcanzar inclusive los 23 [\$/Kg] para la producción de H_2 , usando un electrolizador de costo capital igual a 450 [\$/MW], con eficiencia de 82% y un factor de capacidad de 0.28 [46].

- **Energía solar térmica.**

Por medio de varios reflectores, se concentra un haz de luz en un receptor; en el cual se tiene un intercambiador de calor para calentar un fluido de trabajo y que se empleó en una turbina para generar electricidad o utilizar un motor Stirling (motor térmico que basa su funcionamiento en la compresión y expansión de un gas por estar en contacto con dos puntos a diferentes temperaturas) [47].

- **Biomasa.**

La biomasa consiste básicamente de cualquier desecho orgánico utilizable, animal o vegetal. Representa el 15% del total mundial de energía primaria y el 38% de consumo energético en países en desarrollo [48].

Existen diversos métodos por medio de los cuales se puede producir hidrógeno a partir de la biomasa: la pirolisis, la gasificación y la SCWG (“Supercritic water gasification”). En esta última se tienen sustancias orgánicas húmedas por arriba del punto crítico (punto en el cual la densidad del agua y del vapor son iguales). Este método es utilizado especialmente para biomasa con grandes concentraciones de agua [49]. Todos éstos son procesos termoquímicos en los cuales la biomasa se utiliza de la misma forma que se vio anteriormente con los combustibles fósiles. En cuanto a procesos biológicos, se tienen la producción fermentativa (también conocida como digestión anaerobia), la fotosíntesis, y las “*biological water gas shift reaction*”.

En la degradación anaerobia, o anaerobiosis, que es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno, se produce una mezcla de gases (principalmente CH_4 y CO_2) a la que se le llama biogás, y una suspensión acuosa o lodo que contiene los componentes difíciles de degradar. Los lodos digeridos son comúnmente utilizados en compostas [50]. En un principio, las bacterias llamadas hidrolíticas descomponen la materia orgánica compleja en moléculas simples solubles en agua. Este producto es posteriormente fermentado y con esto se obtienen productos intermediarios como algunos alcoholes, ácidos orgánicos y ácidos grasos volátiles, junto con H_2 y CO_2 . Enseguida, otro grupo de bacterias denominadas acetogénicas, transforman los alcoholes y los ácidos orgánicos en ácido acético, y más H_2 y CO_2 [51].

Una reacción común de “*water gas shift*” es igual a la segunda parte que se vio en la gasificación de carbón:



La “*biological water gas shift reaction*” es ésta misma, pero realizada de forma anaerobia, en condiciones normales de presión y temperatura por una bacteria llamada “*Rubrivivax gelatinosus*” [52]. Esta bacteria utiliza la reacción biológica de WGS como medio para obtener energía y mantener sus procesos metabólicos.

La BWGS es un método relativamente nuevo para la producción de hidrógeno. Estudios sobre el tema han llegado a resultados de producción de 1[Kg] de H_2 por cada [Kg] de bacterias en reactores de lechos fluidizados (“*trickling bed reactors*”). Los costos estimados para este proceso son de 3.4 [\$/Kg], que es relativamente bajo si se compara con otros medios biológicos [53].

1.3 Aplicaciones energéticas

Una de las principales aplicaciones energéticas para el hidrógeno son las “celdas de combustible”; dispositivo compuesto de dos electrodos y un electrolito que permite la conducción de iones (figura 1.5). El principio de funcionamiento de una celda de combustible es la conversión directa de energía química a eléctrica, la cual se lleva a cabo al combinar electroquímicamente el hidrógeno como combustible y el oxígeno del aire como oxidante. El ánodo dispersa el hidrógeno de forma equitativa por toda la superficie del catalizador y conduce los electrones para utilizarlos como fuente de CD en un circuito externo. El cátodo distribuye oxígeno para conducir los electrones de regreso y cerrar el circuito. El catalizador es un material especial que se usa para facilitar la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno [54].

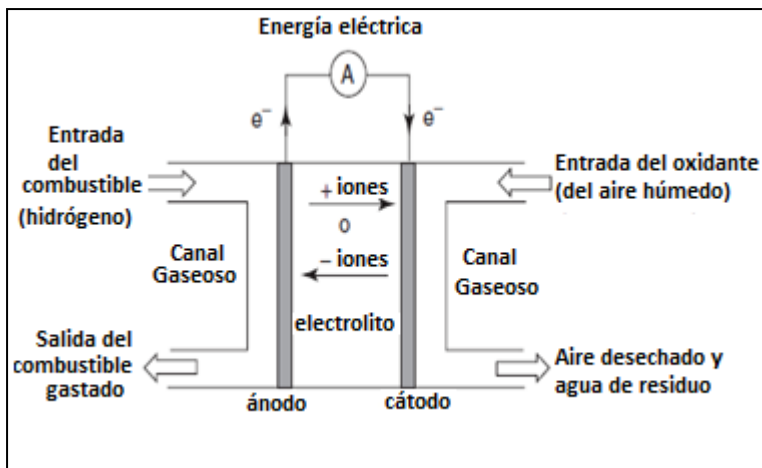


Figura 1.5. Configuración básica de una celda de combustible [55].

Cada una de estas celdas se apila en paquetes en serie para conformar una sola celda de combustible. La diferencia entre una celda de combustible y una pila, es que ésta última almacena energía química y la convierte en electricidad; cuando ésta se termina, la pila se tira. Las celdas de combustible no almacenan energía sino que la convierten en electricidad a partir del combustible recibido del exterior. Mientras éste sea suministrado, la celda puede continuar funcionando indefinidamente [56].

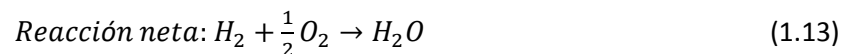
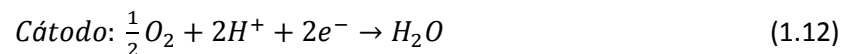
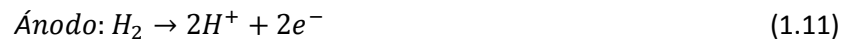
De acuerdo a las características químicas del electrolito utilizado como conductor de iones en las celdas, éstas se clasifican en:

- PEMFC: Celdas de combustible de membrana de intercambio protónico.

- DMFC: Celda de combustible de metanol directo. Utilizan una membrana hecha de un polímero como electrolito.
- PAFC: Celda de combustible de ácido fosfórico.
- MCFC: Celda de combustible de carbonato fundido. Utiliza una mezcla fundida de carbonatos de sodio y potasio como electrolito.
- SOFC. Celda de combustible de óxido sólido. Contienen materiales cerámicos como electrolito.

Las celdas PEMFC son las que tienen mayor potencial de desarrollo e inclusive se considera que pueden llegar a sustituir al motor de combustión interna en aplicaciones para transporte [57]. Se componen de electrodos de carbón poroso unidos a una membrana delgada de un polímero sulfatado.

Las reacciones químicas que se llevan a cabo en una celda de este tipo son:



Las principales ventajas de las celdas son que no existe agresión al medio (en caso de que el hidrógeno utilizado no provenga de fuentes fósiles), que no tienen partes móviles y una muy elevada confiabilidad y durabilidad. En cuanto a sus desventajas: debido a la reacción química la celda entrega un bajo voltaje y alta corriente, y fabricar celdas diseñadas para sistemas de demanda de alto voltaje es difícil y la celda puede fallar cuando un solo panel esté inactivo. El voltaje de salida varía fácilmente con las variaciones de carga que se le conecten, por lo que además es necesario acoplar en la etapa de salida convertidores DC-DC con altas ganancias de voltaje para asegurar la estabilidad [58].

Las celdas de combustible son un invento anterior al motor de combustión interna, aunque se popularizaron cuando la NASA⁹ decidió utilizarlas para proveer de energía eléctrica los vehículos espaciales.

La utilización del hidrógeno como vector energético puede tener aplicaciones importantes en lugares donde se tienen sistemas de energías renovables intermitentes, como solares o eólicos, de forma que se tenga un suministro ininterrumpido con varios sistemas acoplados y disponibles en el momento en que alguno de éstos no sea capaz de suministrar la energía suficiente [59].

1.4 Aplicaciones industriales

En la década de 1920 la compañía canadiense “*Electrolyser Corporation Limited*” comenzó a producir hidrógeno con fines comerciales en Europa y Norteamérica; misma que fabricó los primeros electrolizadores comerciales [60].

⁹ “*National Aeronautics and Space Administration*”. E.E.U.U.

El hidrógeno se ha utilizado de forma generalizada en los procesos de refinado y como materia prima para la elaboración de una amplia gama de productos, aunque su valor como combustible fue realmente impulsado hasta después de la Segunda Guerra Mundial, a pesar de los primeros éxitos experimentales con automóviles y aviones.

Tras la crisis del petróleo de 1973, se celebró la primer Conferencia Internacional sobre el hidrógeno en E.E.U.U. y se fundó la Asociación Internacional para la Energía del Hidrógeno junto con la publicación del "*International Journal of Hydrogen Energy*" [61].

Actualmente con el hidrógeno se obtienen fertilizantes basados en amoníaco y aceites orgánicos comestibles hidrogenados derivados de soya, pescado y cereales, así como para la elaboración del polipropileno, refrigeración de motores y generadores [62].

1.5 Economía del Hidrógeno

El primer organismo que utilizó la expresión "economía del hidrógeno" fue la compañía General Motors, en 1970, cuando sus ingenieros comenzaron a ver en el hidrógeno el posible combustible que emplearían en un futuro sus automóviles [63].

La economía del hidrógeno está relacionada con las necesidades y las estrategias energéticas específicas para cada país. Para analizar la producción de hidrógeno deben tomarse en cuenta cuatro factores: los costos de producción, la disponibilidad de los recursos primarios, la factibilidad de uso de la tierra y las reducciones en emisiones de CO₂ [64].

Aunque diversas fuentes primarias no emiten CO₂, no pueden considerarse equivalentes en la producción de hidrógeno debido a que tienen todas eficiencias distintas; es por esto que en estudios comparativos se consideran las emisiones que produciría con dicha eficiencia un proceso con otro combustible fósil de referencia, a considerarse, el gas natural, que emite CO₂ a una tasa de 55 [KgCO₂/GJ]. De esta manera, los residuos de CO₂ ofrecen un claro indicador de la efectividad del uso de una unidad de energía primaria.

1.6 Perspectiva Mundial

- Producción

En el mediano plazo se espera que el hidrógeno continúe produciéndose a partir de gas y carbón, junto con sistemas de captura y almacenamiento, los cuales incrementan del 3 al 5 % el costo total de producción, en el caso del reformado, y del 10 al 15% con la gasificación de carbón [65].

Si se contempla un escenario futuro de generación distribuida, se podría pensar que en la medida que los costos de estos sistemas de generación disminuyan, gradualmente se tomarían más medidas para el ahorro en horarios pico; los llamados "*peak shaving*", que consisten en hacer funcionar equipos generadores propios durante estas horas, ya que las tarifas se elevan en esos horarios debido a las propias características de las plantas que proveen dicha demanda. Al hacer esto, podrían no sólo achatarse los picos de la curva de demanda, sino inclusive generar más valles, lo cual traería consigo una reestructuración de la misma e inclusive una merma gradual con el paso de los años, en la que inclusive las compañías eléctricas tuvieran que convertirse en meras proveedoras de servicios para equipos e instalaciones, mas no de proveedores de energía eléctrica.

Uno de los principales retos que presenta el empleo de H_2 para ser utilizable a grandes escalas a nivel industrial es que se requieren varias etapas de compresión y enfriamiento, y para ser almacenado en grandes cantidades requiere equipo especial y demasiada energía; casi el 40% de la utilizable del hidrógeno. Comprimir 1 [Kg] de H_2 en tanques a $703 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$ consume 5 [KWh] en promedio. Evidentemente, con una mayor compresión se puede contener más combustible en determinado volumen y se incrementa con esto la densidad energética, pero esto trae consigo un mayor peso de los tanques, además del incremento de los costos de producción por adición de válvulas, sellos y otro tipo de materiales [66].

- Aplicaciones

Se han llevado a cabo diversos estudios para analizar la factibilidad de emplear combustibles a base de mezclas de metano e hidrógeno (“*hythane*”) como una primera transición de los combustibles fósiles al uso exclusivo de hidrógeno. Utilizando mezclas de entre el 8 y el 30% de hidrógeno en metano se reducirían en gran medida las emisiones, al mismo tiempo que no se necesitarían grandes cambios en la infraestructura con la que ya se cuenta, además de que los carros diseñados para funcionar con gas comprimido pueden de igual forma funcionar con esta mezcla [67]. Este combustible tiene diversas características como la alta flotabilidad y difusividad propias del hidrógeno, junto con las bajas velocidades de propagación de las flamas y los límites de flamabilidad (rango de concentraciones del gas en los que puede existir propagación de la flama) menores, propios del metano. Existen varios tipos de celdas de combustible en las cuales no es necesario emplear hidrógeno molecular, y éstas podrían ser implementadas en un principio en los vehículos particulares. Otra alternativa se encuentra en algunos vehículos que, contando con un reformador apropiado, podrían ser introducidos en el mercado sin la necesidad de crear infraestructura.

La incertidumbre que se tiene en cuanto a la introducción de las celdas a base de hidrógeno en vehículos radica únicamente en el tiempo en que los costos de esta tecnología serán competitivos, ya que técnicamente se encuentran claramente aventajados; actualmente un sistema de celdas para autos de pasajeros tiene eficiencias del 40% (se espera que se incremente al 50), mientras que la de los motores de combustión interna de gasolina y diesel varía entre el 25 y el 30% [68].

La Unión Europea tiene una visión acerca del mercado de las celdas de combustible para el año 2020 con los siguientes puntos más sobresalientes:

- Venta de 250 millones de celdas de combustible portátiles por año, con potencias de 15 [KW], y precios de 2 [€/W].
- Producción y venta de 100,000 celdas para generadores portátiles por año, con potencias de 10 [KW] y precios de 500 [€/KW].
- 100,000 a 200,000 celdas de combustible estacionarias para cogeneración. Potencias entre 3 [KW] y 350 [KW], con precios entre 2000 y 1200 [€/KW].
- 400,000 a 1,800,000 celdas para transporte por carretera, con precios menores a 100 [€/KW].

En ese mismo año se espera que en Japón se produzcan 5 millones de vehículos con celdas de combustible y se tengan instalaciones de 10,000 [MWe], y en Estados Unidos 100,000 autos con instalaciones de 500 [MWe] [69].

1.7 Perspectiva en México

La primer consideración que debe hacerse en un país para evaluar las posibles fuentes de producción de hidrógeno son las fuentes primarias de mayor consumo que puedan asegurar la producción ante las variaciones de la demanda y una estabilidad en los precios finales del mismo; siendo las principales en México los hidrocarburos, que son los mismos de los que se quiere depender menos, por lo que les seguirían la hidroenergía (386.78 [PJ]¹⁰ producidos en 2008)[70], nuclear (1.6.64 [PJ], aunque ambos reactores son del tipo BWR y no son aptos para los procesos de producción de hidrógeno de alta temperatura), y la geoenergía (70.17 [PJ]). Las fuentes renovables en México como la energía solar, y la eólica representan fracciones muy pequeñas en el suministro energético, además de tener costos elevados.

Las tecnologías más factibles a ser implementadas son el reformado de gas natural con secuestro y almacenamiento de CO_2 , obteniendo como energía primaria la proveniente de una central nuclear, ya que tiene pocos impactos ambientales asociados al ciclo de producción, y costos de combustible primario bajos [71], y la geotermia con procesos termoquímicos de media temperatura.

¹⁰ 1 [PJ]= 1×10^{12} [J]