



Education in Hydrogen Technologies Area

Producción de Hidrógeno y Seguridad



Co-funded by
the European Union

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

CONTENIDO

Introducción.....	4
1.1 Características del Hidrógeno	7
1.2 Historia.....	8
2 Producción de Hidrógeno a partir de Combustibles Fósiles.....	9
2.1 Reformado con vapor	10
2.2 Oxidación Parcial.....	12
2.3 Producción de Hidrógeno con gas de Refinería.....	14
2.3.1 Separación Criogénica	14
2.3.2 Absorción	14
2.3.3 Difusión	15
2.4 Otras tecnologías que usan Combustibles Fósiles.....	15
2.4.1 Gasificación del carbon	15
2.4.2 Reformado Catalítico.....	15
2.4.3 Reformado con Plasma	16
3 Producción de Hidrógeno a partir de fuentes renovables.....	17
3.1 Electrólisis del Agua	18
3.2 Electrólisis en agua alcalina.....	19
3.3 Electrólisis con electrolito polimérico	20
3.4 Electrólisis de alta temperatura (EAT).....	20
3.5 División termoquímica del agua.....	21
3.6 Fotelectrólisis del agua	22
3.7 Otras tecnologías	22
3.8 Producción biológica de Hidrógeno	24
4 Células de Combustible.....	28
4.1 Organización básica de las células de combustible	29
5 Seguridad y Almacenamiento del Hidrógeno.....	31
5.1 Uso seguro del Hidrógeno.....	32
5.2 Efectos biológicos del Hidrógeno	33
5.3 Almacenamiento de gas comprimido.....	33

5.4	Almacenamiento criogénico de Hidrógeno Líquido	35
5.5	Almacenamiento de Hidrógeno en hidruros	37
5.6	Seguridad en la industria del automovil.....	41
6	Conclusiones	43

Cofinanciado por la Unión Europea. Las opiniones y puntos de vista expresados sólo comprometen a su(s) autor(es) y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea ni los de la Agencia Europea de la Educación y Cultura (EACEA). Ni la Unión Europea ni la EACEA pueden ser considerados responsables de ellos."

INTRODUCCIÓN

El potencial para el uso del hidrógeno en la industria y en la producción de energía es significativo. Aún así, por un largo tiempo, ha sido ignorado. Por ejemplo, una de sus desventajas es que se encuentra principalmente formando compuestos químicos, ya que es un gas muy reactivo, y debe ser obtenido del agua o del metano.

Las ventajas sobrepasan a las desventajas significativamente, y por esto es por lo que su uso se está volviendo cada vez más común. El hidrógeno puede almacenar energía de forma efectiva durante largos periodos de tiempo sin pérdidas energéticas de consideración. Esta es una de las importantes diferencias con respecto a las baterías, que solo pueden almacenar energía durante días. Por esta razón, el hidrógeno se considera como la dirección adecuada para almacenar la energía obtenida de fuentes renovables, que ofrecen una producción eléctrica inestable.

El hidrógeno presenta muchos beneficios. Es el elemento más común del universo, el tercero más común en la Tierra, y puede encontrarse en multitud de sustancias. Una cantidad ilimitada de hidrógeno se encuentra en el agua, también es uno de los elementos básicos de la materia orgánica e, incluso más importante, forma parte de todos los hidrocarburos que se utilizan. El hidrógeno tiene una gran densidad energética (por unidad de masa) y puede ser transportado y almacenado. Cuando se utiliza como combustible, la ventaja es sus emisiones nulas. Supongamos que se utiliza para producir energía en motores de combustión interna o en células de combustible. En estos casos, emite calor, energía eléctrica o energía mecánica y un subproducto inofensivo - agua, evitando el CO₂ y otras sustancias de desecho que son comunes en la quema de hidrocarburos de cualquier forma. El problema que se presenta es el óxido de nitrógeno que se emite en el motor de hidrógeno. Su cantidad depende de la disponibilidad de oxígeno,

la temperatura, la presión, y el tiempo en el que los gases del combustible se mantienen en el motor a altas temperaturas. ¹

Colores del Hidrógeno

El hidrógeno se produce de diferentes formas; por ello, se le divide en diferentes grupos nombrados mediante colores.

Hidrógeno Marrón y Gris

Una forma de producir hidrógeno es obtenerlos de combustibles fósiles (marrón) y del gas natural (gris). El hidrógeno se produce como subproducto de diferentes procesos industriales. La forma más común de producir hidrógeno es mediante el «reformado con vapor», que significa que la fuente se calienta con agua a alta temperatura. El hidrógeno gris es el más producido en la actualidad (2023). No obstante, el reformado con vapor depende de los combustibles fósiles, y una gran cantidad de CO₂ es generada durante este proceso; por tanto, no se lo considera para la futura producción de hidrógeno.

Hidrógeno Azul

La producción de hidrógeno gris y marrón puede ser mejorada mediante la captura del CO₂ usando tecnologías de Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS en inglés) o tecnologías de Captura y Uso del Carbono (CCU en inglés). De esta forma se produce el llamado hidrógeno azul. La producción total de CO₂ es menor, aunque la fuente sea gas natural o metano, ya que una parte significativa de la emisión es capturada.

Hydrogen Rosa

El hidrógeno rosa se produce mediante la energía nuclear y es bajo en emisiones. A veces se le llama también morado o amarillo. Su nombre todavía está sin decidir.

Hidrógeno Verde

El objetivo principal de las tecnologías del hidrógeno es eliminar la dependencia de los combustibles fósiles y producir «Hidrógeno Verde». Este tipo de hidrógeno se produce mediante un proceso de electrólisis, cuando la molécula de agua se divide en dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno usando electricidad. Cuando la fuente de energía para este proceso procede de fuentes renovables, se considera «verde» y de ahí el «hidrógeno verde».

El hidrógeno tiene un gran potencial para decarbonizar el uso de la energía. Para llegar a su potencial, hay unas barreras que se deben superar, principalmente relacionadas con el almacenamiento, el transporte y la distribución. Hidrógeno

Objetivos:

- Nombrar las principales características del hidrógeno y sus isótopos
- Reconocer los colores del hidrógeno y comparar sus formas de producción
- Definir la temperatura a la que el hidrógeno se vuelve líquido

Palabras clave:

- Hidrógeno
- Colores del Hidrógeno
- Isótopos del Hidrógeno
- Temperatura Crítica

El hidrógeno es el elemento más simple y ligero conocido. Es unas 14.38 veces más ligero que el aire y conduce el calor 7 veces mejor que el aire. Es uno de los principales elementos biogénicos. Junto al carbono, el nitrógeno, el oxígeno, el azufre y el fósforo, el hidrógeno crea los bloques de construcción para la vida en la Tierra, por ello, hay una gran cantidad de hidrógeno en el petróleo y el gas natural. El número atómico del hidrógeno es 1 y su símbolo H.

El hidrógeno puro es raro en la Tierra, ya que se difunde con facilidad al universo o se liga a otros elementos, creando los llamados hidruros.

El hidruro más común es el agua H_2O , que consiste en dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno.

1.1 CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido. Dada su alta reactividad y su punto de ebullición, la adición de compuestos olorosos es limitada. La llama del hidrógeno es casi invisible durante el día. Se difunde con rapidez incluso a través de materiales de alta densidad (como metales y plásticos). Es más ligero que el aire y, en la atmósfera, se eleva a una velocidad de unos 20 m por segundo. Si se expande rápidamente puede hacer auto-ignición.

Tiene una energía de ignición muy baja, de unos 0.02 J solo. Su temperatura crítica es de $-239.96\text{ }^\circ\text{C}$. No puede encontrarse en estado líquido por encima de esta temperatura. Esto es por lo que almacenar hidrógeno en estado líquido tiene grandes requerimientos energéticos y económicos. El hidrógeno también causa fragilidad por hidrógeno y corrosión por hidrógeno. Estos procesos ocurren principalmente cuando el material está sometido a un estrés mecánico y sus fases iniciales no son visibles a simple vista, ya que suceden dentro del material. En caso de que la temperatura se eleve a un ritmo mayor de 20 K a la hora, el hidrógeno queda atrapado en las grietas, se acumula en cavidades y causa su expansión.

Isótopos del hidrógeno

El átomo de hidrógeno consta de un protón. Es el isótopo más simple del universo. Los isótopos se diferencian por el número de neutrones que contienen. El hidrógeno tiene tres isótopos conocidos que ocurren de forma natural en la Tierra. El más común es el protio (${}_1\text{H}$) que consiste en un protón y ningún neutrón. El siguiente isótopo es el deuterio (${}_2\text{H}$), consistente en un protón y un neutrón. En fórmulas químicas, se le puede encontrar con el símbolo D. El tercer isótopo es el tritio (${}_3\text{H}$), consistente en un protón y dos neutrones. El óxido de Deuterio D_2O (Agua pesada) se encuentra presente en el agua. Su concentración crece durante la electrólisis del agua. Su punto de fusión ($3.79\text{ }^\circ\text{C}$) y punto de ebullición ($101.4\text{ }^\circ\text{C}$) son mayores que los del agua. El tritio es un gas radiactivo que emite una débil radiación β y, a diferencia del deuterio, es inestable y tiene una vida media de 12.3 años. En fórmulas químicas, se lo puede encontrar con el símbolo T. Se produce en reactores nucleares durante la producción de plutonio

a partir de uranio natural. Se utiliza en bombas de hidrógeno, colores fluorescentes, o manecillas luminosas de relojes.

1.2 Historia

Se considera que el científico británico Henry Cavendish descubrió el Hidrógeno mientras experimentaba con ácidos y sus reacciones con metales básicos. Durante estos experimentos, descubrió un gas incoloro e inflamable, al que dio como nombre Hidrógeno. El descubrimiento fue realizado en 1766. Cavendish también demostró incorrecta la hipótesis de que el agua era un elemento químico. El nombre Hidrógeno viene del griego: hydro y genes -formador de agua- y fue utilizado por primera vez por el químico francés A. L. Lavoisier, quien acuñó la palabra francesa hydrogène. Sir W. R. Grove, un científico británico, fue el primero en experimentar con la electrólisis del agua. Utilizó electricidad para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. También descubrió que se producía electricidad cuando el Hidrógeno y el Oxígeno se combinaban, durante un proceso opuesto a la electrólisis. Realizó un experimento con dos placas de platino insertadas en dos recipientes separados. Después colocó esos recipientes en ácido sulfúrico diluido y se dio cuenta de que una corriente eléctrica fluía entre los electrodos, y que se generaba agua en la cámara de gas. Conectando más de estos aparatos, incrementó el voltaje en esta «Batería de gas». Más tarde, los químicos I. Mond y Ch. Langer usaron el término celda de combustible

Resumen del capítulo:

- El Hidrógeno es el elemento químico más ligero y tiene número atómico 1.
- Los isótopos del Hidrógeno se distinguen por el número de neutrones en el núcleo.
- Henry Cavendish es considerado como descubridor del Hidrógeno.

Preguntas de final de capítulo:

1. Define el hidrógeno como elemento químico, su símbolo químico y su número atómico.
2. Cuántos isótopos hay del hidrógeno cómo se llaman
3. A qué temperatura se vuelve líquido el hidrógeno? [a condiciones de 1 atm]
4. En qué año descubrió el Hidrógeno Henry Cavendish

5. Qué químico francés dio nombre al Hidrógeno
6. Qué colores se utilizan para etiquetar al Hidrógeno Cuáles se obtienen de combustibles fósiles
7. Describe el proceso por el cual se genera el Hidrógeno Verde.

2 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Objetivos

- Definir al Hidrógeno como vector energético.
- Reconocer las diferencias entre las tecnologías de reformado con vapor y de oxidación parcial para obtener Hidrógeno.
- Describir el proceso para obtener Hidrógeno a partir de gas de refinería.
- Nombrar otras tecnologías para obtener Hidrógeno a partir de gas de refinería.

Palabras Clave:

- Vector energético
- Reformado con vapor
- Oxidación parcial
- Separación criogénica
- Absorción
- Difusión
- Reformado con plasma

El Hidrógeno no es un combustible tradicional; se trata de un vector o de un portador. Técnicamente, significa que el Hidrógeno no se puede obtener de una mina y que su obtención requiere de energía, ya que no ocurre de forma aislada en nuestro planeta. Por tanto, debe ser creado utilizando una gran cantidad de energía que, por otra parte, puede ser obtenida de energías renovables que no requieran de carbono. Pero desafortunadamente, se produce principalmente usando combustibles fósiles que causan

efecto invernadero. Las formas más comunes de producir Hidrógeno son el reformado con vapor, la oxidación parcial y la gasificación del carbón. Carbón, petróleo, gas natural y metano son utilizados durante estos procesos. Productos secundarios son CO y CO₂.

2.1 REFORMADO CON VAPOR

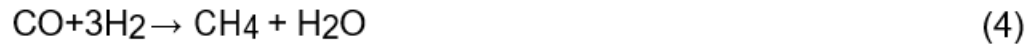
Durante el reformado con vapor, un hidrocarburo (por ejemplo metano) reacciona con vapor de agua en presencia de un catalizador. El producto de esta reacción es monóxido de carbono, hidrógeno (fórmula 1) y en el vapor residual, dióxido de carbono (fórmula 2). Si la fuente utilizada contiene algún compuesto de azufre una desulfurización es necesaria.



Se requiere aplicar una presión de entre 3 y 5 MPa y una temperatura entre 750 y 800 °C. El óxido de Níquel se utiliza como catalizador. El ratio de vapor-hidrocarburo que se suele utilizar es de 3 a 1 para evitar que el carbono se deposite en el catalizador. El monóxido de carbono producido pasa por un proceso de vapor de agua, donde más dióxido de carbono e Hidrógeno es producido (fórmula 3). Esta reacción es exotérmica y se implementa en dos etapas. Durante la primera etapa, óxido de hierro y óxido de cromo se utilizan como catalizadores. Son catalizadores menos reactivos y resistentes a las impurezas. La temperatura de entrada al reactor es de 380 °C y la de salida es de 500 °C. Durante la segunda etapa del proceso, se emplean temperaturas más bajas (entre 180 y 230°C). Esto permite utilizar un catalizador muy reactivo de cobre. De esta forma, la concentración de monóxido de carbono se reduce al 0.2 o 0.3%.



El Hidrógeno utilizado para la hidrogenización no puede contener compuestos con oxígeno (CO y CO₂) y tiene que convertirse otra vez en metano (fórmulas 4 y 5). Este proceso se realiza en un reactor de metanación a una temperatura de unos 400 °C. Si la cantidad de CO y CO₂ en el gas excede el 3%, es necesario enfriarlo, ya que ambas reacciones son exotérmicas.



La figura 1 muestra un diagrama simplificado del reformado por vapor utilizando gas natural. El gas natural caliente, después de la desulfurización, se mezcla con vapor en un reformador donde las reacciones 1 y 2 suceden. Primero, los productos se conducen a través de un reformador calentado a 750°C y después a un reactor de intercambio donde se refrigeran a 360°C. Las dos siguientes etapas con convertidores de intercambio de alta y bajtemperatura, donde el CO se convierte a CO₂ (reacción 3). Los gases se conducen entonces a otro reactor donde, utilizando etanolamina u otros medios, el CO₂ es absorbido. Finalmente, el CO y el CO₂ residual son convertidos a metano en un reactor de metanación (reacciones 4 y 5). De esta forma, se produce Hidrógeno con un 98% de pureza, donde el 2% restante es, principalmente, metano.

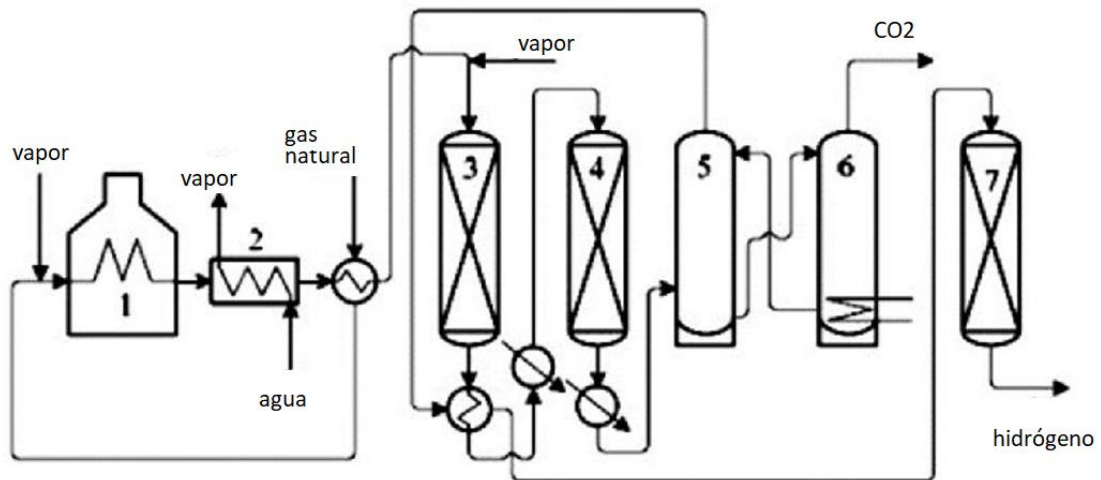


Figure 1 Reformado con vapor utilizando gas natural.

La efectividad del reformado por vapor está entre el 70 y el 85% dependiendo de la pureza del hidrógeno y de la relación entre el vapor y el carbono. El dióxido de carbono producido durante el reformado con vapor o la oxidación parcial se libera a la atmósfera, se purifica, se liquefacciona, o se vuelve sólido (hielo seco) y se utiliza como refrigerante en la industria alimentaria.

2.2 OXIDACIÓN PARCIAL

La oxidación parcial es muy común en la producción de Hidrógeno: materiales gases y líquidos de los procesados primarios y secundarios del petróleo son utilizados. Frecuentemente, se gasifican residuos pesados de petróleo (Vacuum residuals, propano para asfalto y otros). El proceso de gasificación utiliza Oxígeno y vapor a una temperatura de 1300 a 1500 °C, y unas presiones de entre 3 y 5 MPa. Limitar la cantidad de oxígeno permite la oxidación parcial. La oxidación parcial de hidrocarburos utiliza las reacciones parciales 6 y 7. El producto de la reacción es dióxido de carbono, monóxido de carbono e Hidrógeno. Ambas reacciones son exotérmicas y calientan la mezcla a 1500 °C.



La parte de los reactivos que no se gasifica por oxidación se gasifica mediante la reacción endotérmica 8 utilizando vapor. La gasificación con vapor nos da una gran cantidad de Hidrógeno y reduce la temperatura de reacción a 1350°C.



El producto de la oxidación parcial de diferentes fuentes es siempre una mezcla de CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ y compuestos de azufre como H₂S y COS. El subproducto perjudicial es hollín.

La figura 2 muestra un diagrama simplificado de la oxidación parcial de residuos pesados de petróleo. El residuo pesado se dispersa en un torrente de una mezcla de vapor y oxígeno. En un generador, se produce gas a 1350 °C y se introduce al reactor de vapor. El gas se mueve rápidamente a través del reactor para evitar la deposición de hollín. Entonces se refrigera en el hervidor por encima de la temperatura de saturación del vapor de agua (unos 260 °C), y a la vez, se produce vapor a alta presión (12 MPa). Parte del vapor se utiliza en el proceso de la oxidación parcial (un 20%), y el resto se utiliza para otras aplicaciones. En la parte siguiente del proceso, el gas del generador se refrigera mediante la dispersión de agua en un radiador, que elimina parte del hollín. Finalmente, el gas es completamente purificado en un purificador.

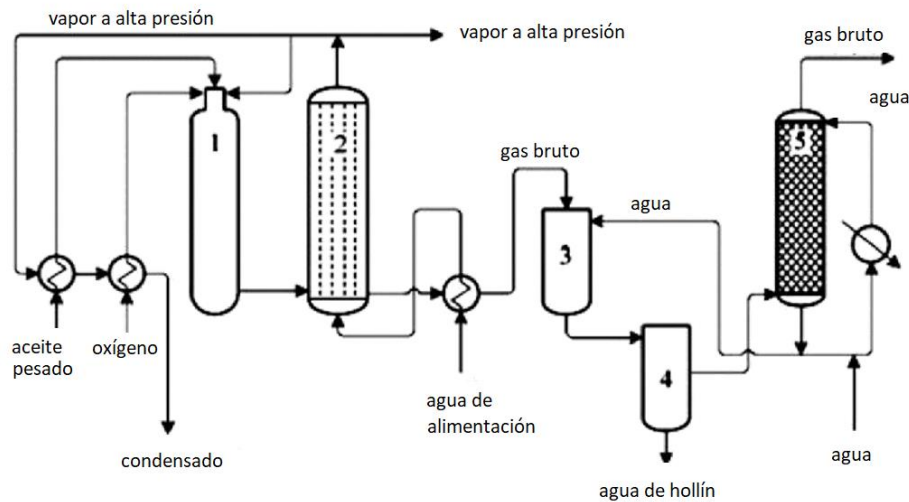


Figure 2 Diagrama de la oxidación parcial con petróleo crudo

El azufre se elimina del gas final del generador. El CO se convierte en CO₂, que también se elimina del gas. El CO y el CO₂ residual se extraen mediante metanación. Conversión, purificación y metanización son procesos que se realizan igual que con el gas natural.

La eficacia de la oxidación parcial de residuos del petróleo es, en general, menor que la de la reformación con vapor, usualmente alrededor del 50%. Como con la reformación con vapor, los

requerimientos de inversión son muy altos, pero no están incluidos en mis necesidades energéticas comparadas con 1 m³ de Hidrógeno. La oxidación parcial necesita una presión y temperatura mayor que la reformación con vapor; por tanto, los requerimientos energéticos son también mayores. Cuando consideramos en medio ambiente, la oxidación parcial no es mejor que la reformación por vapor. Se produce una gran cantidad de gases de efecto invernadero. No obstante, dado el limitado uso de los residuos pesados del petróleo, de las pocas oportunidades para su venta y los fuentes decrecientes de combustibles fósiles, la oxidación parcial tiene un potencial mayor que la reformación por vapor.

2.3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO CON GAS DE REFINERÍA

El Hidrógeno también se puede producir de los gases liberados en el procesado del petróleo. Entre estos procesos se encuentran el hydrocracking y la hidrogenación. El hidrógeno es usualmente diluido con hidrocarburos gases, principalmente metano. Los métodos utilizados para capturar hidrógeno son la separación criogénica, la absorción y la difusión.

2.3.1 SEPARACIÓN CRIOGÉNICA

El primer paso es remover los gases ácidos (CO₂) y el agua. El siguiente paso es refrigerar el gas a -150°C a entre 1.4 y 3.5 MPa, lo que causa la condensación de los hidrocarburos. La pureza del Hidrógeno es cercana al 90% en volumen. Debido a la fase de enfriado, es un proceso energéticamente intenso.

2.3.2 ABSORCIÓN

Las sustancias que no se quieren se eliminan del gas atrapándolas en carbono activo (CO₂, CH₄, N₂) y en cribas moleculares de zeolitas (CO, CH₄ y N₂). En el momento en el que un absorbente se satura, el flujo

de gas se dirige a un segundo absorbente, y el primero se regenera por el desplazamiento de hidrocarburos.

2.3.3 DIFUSIÓN

El proceso de difusión separa el Hidrógeno del metano y otros gases utilizando membranas semitransparentes. La pequeña molécula de Hidrógeno se difunde a través de la membrana, mientras que los otros gases quedan atrapados. Las membranas se hacen de paladio o de su aleación con plata. Este proceso tiene lugar a 350 °C y 2 MPa.

2.4 OTRAS TECNOLOGÍAS QUE USAN COMBUSTIBLES FÓSILES

2.4.1 GASIFICACIÓN DEL CARBÓN

La gasificación del carbon es el método más antiguo para extraer Hidrógeno. El carbón se calienta a 900°C; de esta forma se transforma en gas de horno de coke [¿?]. Es un gas que contiene Hidrógeno, metano, monóxido de carbono [¿?] y una pequeña cantidad de hidrocarburos insaturados. El porcentaje de hidrógeno es casi el 60%. El gas se mezcla con vapor y catalizadores de níquel.

2.4.2 REFORMADO CATALÍTICO

El reformado catalítico utiliza reacciones catalizadas para procesar principalmente gasolina de bajo octanaje en hidrocarburos aromáticos de alto octanaje. Catalizadores (Pt, Rh, etc.) son utilizados en el ciclado y la deshidrogenización, donde el Hidrógeno es un producto de deshecho.

Existen varios procesos que utilizan tecnología de reformado con plasma. El más conocido es el proceso Kvaerner, desarrollado por una compañía Noruega del mismo nombre. Debido a las nuevas tecnologías, este proceso es amigable con el medio ambiente. Los hidrocarburos se dividen en carbono e Hidrógeno en un reactor utilizando un quemador de plasma a altas temperaturas (1600 - 2000 °C). Comparado con otros métodos, la mayor ventaja de este procedimiento es la transformación del carbono en hollín sin producir CO₂. Los productos del reformado con plasma son un 48% Hidrógeno puro, un 40% de carbono en forma de hollín y un 10% de vapor sobrecalentado. La desventaja de este método es la alta demanda energética, de 2 a 2.5 kWh por cada 1m³ de H₂.

Este capítulo ha descrito los métodos más comunes para producir Hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Con el tiempo, la eficiencia de estos métodos se incrementa y la demanda energética disminuye. El problema de base de utilizar combustibles fósiles para producir Hidrógeno es la producción de gases de efecto invernadero. Estos necesitan ser almacenados permanentemente para evitar su liberación a la atmósfera. Para ello, se emplean contenedores vacíos de petróleo o reservas subterráneas de agua. Un estudio de 1996 mostró que la capacidad para almacenar gases de efecto invernadero en Europa es de 806 billones de toneladas de CO₂. La mayor parte de esta capacidad (476 billones de toneladas de CO₂) se encuentran en la placa continental Noruega en reservas subterráneas de agua. Esta capacidad podría cubrir la producción de CO₂ de todas las plantas energéticas del oeste de Europa durante siglos.

Resumen del capítulo:

- El Hidrógeno no pertenece a los combustibles tradicionales, sino que es un vector energético.
- Durante el proceso de reformado con vapor, compuestos de Hidrógeno reaccionan con vapor de agua en presencia de un catalizador.
- Durante la oxidación parcial, compuestos pesados del petróleo son gasificados utilizando oxígeno y vapor de agua bajo altas presiones y temperaturas.

- El Hidrógeno puede ser obtenido de los gases producidos durante el procesamiento del petróleo.
- Otra posibilidad para obtener Hidrógeno es de los combustibles fósiles.

Preguntas de final de capítulo:

1. Explicar el concepto de Hidrógeno como vector energético.
2. De qué sustancias se obtiene el Hidrógeno durante el reformado con vapor?
3. Qué sustancias químicas se forman durante el reformado con vapor?
4. Durante la oxidación parcial, A qué presiones y temperaturas se forma el Hidrógeno?
5. Qué método es más conveniente para la producción de Hidrógeno, el reformado con vapor o la oxidación parcial?
6. Cuáles son los tres principales procesos para producir Hidrógeno a partir de gas de refinería?
7. Nombrar otras tres posibilidades para producir Hidrógeno a partir de combustibles fósiles.

3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES

Objetivos:

- Definir el principio de la electrólisis del agua.
- Describir la diferencia entre la electrólisis alcalina del agua, la electrólisis a alta temperatura y la división termoquímica del agua.
- Nombrar otras tecnologías alternativas para la producción de Hidrógeno.
- Explicar el principio de la producción de Hidrógeno utilizando procesos biotecnológicos.

Palabras clave:

- Electrólisis del agua
- Electrólisis de alta temperatura
- Ciclo del Azufre de Westinghouse
- Planta de energía de Hidrógeno alimentada con energía solar

- Potencial de la orina
- Biomasa
- Fotólisis
- Fermentación
- Fermentación oscura

Más del 70% de la superficie de la Tierra está cubierta por agua. El porcentaje en masa del Hidrógeno en el agua es del 11.2% . Como se ha mencionado previamente, el Hidrógeno se enlaza con el Oxígeno durante la combustión y crea agua. Por tanto, el Hidrógeno se considera una fuente de energía renovable.

3.1 ELECTRÓLISIS DEL AGUA

Durante la electrólisis del agua, el agua se divide en Hidrógeno y Oxígeno. Una corriente continua fluye a través de una disolución acuosa y rompe los enlaces químicos entre el Hidrógeno y el Oxígeno. El agua reacciona en ánodo para formar O_2 y en el cátodo para formar H_2 (fórmula 9).



El Hidrógeno producido en el cátodo es recogido y almacenado. Este proceso puede ser realizado a temperatura ambiente, y solo se necesita electricidad. Este método produce Hidrógeno de una alta pureza que no necesita de una purificación posterior. Por tanto, este método es conveniente cuando se necesitan Hidrógeno y Oxígeno puros. El aparato utilizado para la electrólisis se denomina Electrolizador. Consiste de un contenedor, electrodos y un electrolito. La eficiencia del proceso es, aproximadamente, de entre 80 y 92%, y se puede incrementar mediante un electrolito que mejora la conductividad del agua.

La electricidad no se utiliza principalmente por el alto coste de la electricidad. La eficiencia de la producción de energía eléctrica influye en la eficiencia de la electrólisis. Actualmente, la eficiencia de la producción de energía eléctrica está entre el 30 y el 40%, utilizando los recursos disponibles; por tanto, la eficiencia de la electrólisis está entre el 25 y el 35%. Comparada con otros métodos, la electrólisis tiene una alta demanda energética. El consumo de energía es de 5.2 kWh por cada m³ de Hidrógeno, lo que hace 57 kWh por cada kilogramo. La electrólisis es una opción prometedora para la producción de Hidrógeno sin dióxido de carbono a partir de fuentes renovables.

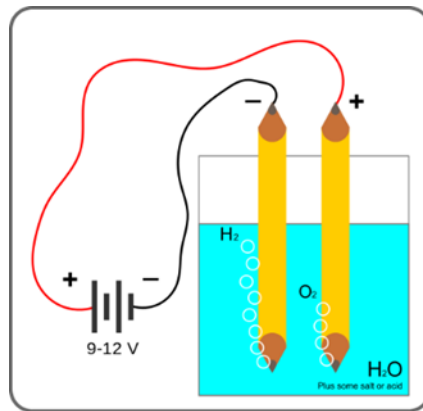


Figure 3 Diagrama de la electrólisis del agua.

La electrólisis se utiliza donde se dispone de energía «verde» asequible, y donde hay una sobreproducción de energía. Adicionalmente, se produce Oxígeno, que también se puede utilizar.

3.2 ELECTRÓLISIS EN AGUA ALCALINA

Se utilizan disoluciones ácidas o alcalinas para dividir el agua. Un electrolito alcalino es ideal para prevenir la corrosión que ocurre cuando se utilizan ácidos. Usualmente, se utiliza hidróxido de potasio altamente concentrado (KOH al 25-30%). Se necesita también una alta superficie de contacto entre los electrodos y el electrolito para un correcto desarrollo del proceso. El producto final se separa de los electrodos. Acero bajo en carbono, en ocasiones cubierto por una fina capa de Niquel, es utilizado para los cátodos. Los ánodos están hechos de acero bajo en carbono recubierto de níquel, o acero al níquel. El platino se utiliza en ocasiones como catalizador. Un diafragma separa los electrodos para evitar una reacción entre el

Hidrógeno y el Oxígeno producidos. Antiguamente, el diafragma estaba hecho de asbestos, pero debido a los riesgos que implicaba para la salud, fue prohibido y nuevos materiales fueron probados.

3.3 ELECTRÓLISIS CON ELECTROLITO POLIMÉRICO

En la electrólisis con electrolito polimérico, la membrana de intercambio de protones (MIP) se utiliza para transferir. El agua se pone en contacto con una placa bipolar, circula hasta el ánodo, donde se divide en Oxígeno. Los protones producidos se transportan a través de la MIP hasta el cátodo. Los electrones salen por el ánodo a través del circuito de energía externo, que proporciona la energía para que suceda la reacción (el voltaje de la celda). En el lado del cátodo, los protones y los electrones se recombinan para producir Hidrógeno. La MIP separa los gases producidos, y los electrodos están en contacto directo con la MIP para evitar reacciones indeseadas. Los electrodos están hechos de platino, y de sus aleaciones. Deben ser resistentes a los ácidos, ya que la MIP tiene las mismas propiedades que un ácido fuerte.

3.4 ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA (EAT)

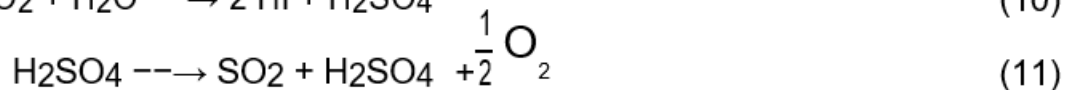
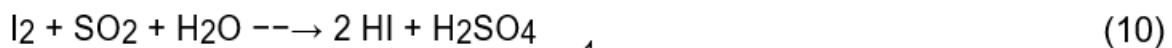
La electrólisis de alta temperatura se denomina en ocasiones electrólisis de vapor. Es muy similar a la electrólisis del agua. La diferencia está en la forma de proporcionar la energía al proceso. Parte de la energía se aporta en forma de energía eléctrica, y parte en forma de calor. De esta forma, la eficiencia del proceso se incrementa. Agua e Hidrógeno entran en el electrolizador, formando una mezcla enriquecida (75% Hidrógeno y 25% Vapor). El Hidrógeno entonces es dissociado en la unidad de condensación. Las reacciones en los electrolitos de alta temperatura son las opuestas a las reacciones en las celdas de combustible de óxidos sólidos. Las demandas energéticas para el proceso son temperaturas de entre 600 y 1000°C. En el proceso EAT, el agua se convierte primero en vapor utilizando energía nuclear térmica en lugar de electricidad, y entonces se disocia en el cátodo para formar moléculas de Hidrógeno e iones de Oxígeno, que posteriormente migran a través del material del electrolito de óxidos sólidos y forman moléculas de Oxígeno en la superficie del ánodo.

La eficiencia global puede llegar a entre el 45 y el 50%. La demanda de energía es menor que en la electrólisis convencional ya que, cuanto mayor es la temperatura del vapor, menor es la demanda de electricidad. Es un método muy limpio para la producción de Hidrógeno, y está en constante desarrollo como uno de los candidatos para la producción de Hidrógeno a gran escala. La energía nuclear es una de las fuentes de electricidad principales.

3.5 DIVISIÓN TERMOQUÍMICA DEL AGUA

Durante la división termoquímica del agua, el agua se separa en Oxígeno e Hidrógeno utilizando reacciones químicas. Estas reacciones se inician por calor o por la combinación de calor y energía eléctrica en ciclos híbridos. Este proceso solo necesita una fuente de agua y calor, ya que el resto de las sustancias químicas se pueden reutilizar. Los productos finales son Hidrógeno y Oxígeno.

Uno de los ciclos es el ciclo termoquímico del azufre y el yodo. Es un método barato y eficiente de producir Hidrógeno utilizando energía nuclear. El primer paso del proceso es la reacción del agua con yodo y sulfuro de azufre (fórmula 10). Los productos de esta reacción son ácido sulfúrico e hidruro de yodo. El siguiente paso es la descomposición endotérmica del ácido sulfúrico y el hidruro de yodo (fórmulas 11 y 12), que requieren altas temperaturas (800 a 1200°C y 450°C respectivamente).



La eficiencia de un proceso tan complejo es difícil de establecer. Generalmente, varía entre el 40 y el 52% (50% a 950°C). Mayores temperaturas significan una mayor eficiencia del ciclo. Comparado con la

electrólisis, la pérdida de energía durante la producción de energía eléctrica es eliminada. Las desventajas se basan en las altas temperaturas y en la agresividad de los químicos, tales como el ácido sulfúrico y el ácido hidrioduro. Por tanto, los recipientes tienen que estar hechos de materiales con una alta resistencia a estos compuestos. De la misma forma que la electrólisis, en teoría, ningún producto de desecho se produce durante la división termoquímica. No obstante, una pequeña cantidad de productos químicos se pierde durante el proceso y debe ser reemplazada regularmente. Este camino tecnológico tiene el potencial de tener bajas o nulas emisiones de carbono. No obstante, este proceso es difícil de ampliar a la escala industrial.

3.6 FOTOELECTRÓLISIS DEL AGUA

En la fotoelectrólisis del agua, el Hidrógeno se produce a partir del agua utilizando luz solar y semiconductores especializados, similares a los utilizados en las células solares. La energía de la luz se utiliza para disociar directamente las moléculas de agua en Hidrógeno y Oxígeno. En las células fotovoltaicas, el principio de funcionamiento es que dos semiconductores (de tipo p y tipo n) se unen para formar una unión p-n. La recogida de portadores generados por la luz por la unión p-n genera un movimiento de electrones hacia el lado del semiconductor tipo n y de huecos hacia el semiconductor tipo p. Bajo condiciones de cortocircuito, no existe acumulación de carga, ya que los portadores salen del dispositivo como una corriente generada por la luz. Para

la fotoelectrólisis, el semiconductor está inmerso en un electrolito con base de agua, donde en lugar de producir electricidad, la energía solar se utiliza para dividir el agua.

3.7 OTRAS TECNOLOGÍAS

Ciclo del azufre Westinghouse

El ciclo del azufre Westinghouse es un proceso termoquímico híbrido desarrollado por la compañía Westinghouse en 1975 que utiliza ácido sulfúrico. El material de partida consiste en agua y dióxido de

azufre. Estos se hacen reaccionar electrolíticamente para producir Hidrógeno y ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico se descompone en Oxígeno y los materiales de partida. Es el proceso más simple que involucra azufre y su eficiencia es de en torno a 40%. La principal ventaja es que requiere de entre 3 y 4 veces menos electricidad que la electrólisis del agua. La principal desventaja es las altas propiedades corrosivas del ácido sulfúrico.

Planta eléctrica de Hidrógeno alimentada con energía solar

La investigación de SolarLab está enfocada en la energía solar. El concepto de central de energía de Hidrógeno desarrollado por esta compañía se basa en un principio muy simple. Las celdas solares se colocarían en el mar, y la eficiencia de producción del Hidrógeno aumentaría hasta en un 30%, debido a las propiedades refrigerantes del agua de mar. La energía eléctrica producida por los paneles solares sería entonces utilizada para la electrólisis del agua. El Hidrógeno se almacenaría en tanques en el fondo del mar, eliminando el riesgo de explosión y sería distribuido a la costa por una conducción, resultando en un proceso de producción de Hidrógeno relativamente seguro y barato.

Potencial de la orina

Gerardine Botte, profesora de ingeniería química y biomolecular de la Universidad de Ohio, ha desarrollado una tecnología para producir Hidrógeno a partir de la orina. La orina contiene dos compuestos que pueden ser una fuente de Hidrógeno: amoníaco y urea. La tecnología se basa en los principios de la electrólisis del agua con una diferencia en los requerimientos energéticos, ya que el enlace de Hidrógeno del amoníaco y la urea es más débil que el del agua. La tecnología de Botte tiene cierto potencial en lugares donde una gran cantidad de gente se reúne, como aeropuertos y estadios deportivos. También se puede utilizar en el tratamiento de la contaminación ambiental asociada a grandes granjas de animales. De acuerdo con la profesora Botte, la orina producida por mil vacas podría generar entre 40 y 50 kW de energía, y el dañino amoníaco podría ser eliminado en el proceso.

3.8 PRODUCCIÓN BIOLÓGICA DE HIDRÓGENO

La biomasa pertenece a uno de los recursos renovables del futuro. Su uso energético, incluyendo la producción de Hidrógeno es muy versátil. El contenido de Hidrógeno en la biomasa (del 6 al 6.5% en masa) es menor que el del gas natural (25% en masa) pero igual al contenido de Hidrógeno del carbón (5% en masa).

Biomasa seca

La biomasa seca es el nombre que se le da a la madera y los residuos secos de plantas. Puede ser procesada posteriormente quemándola y gasificándola.

Procesado termoquímico

El procesado termoquímico incluye el reformado con vapor de la biomasa. Este proceso en dos pasos consiste de la pirólisis, donde se generan productos gaseosos (metano, Hidrógeno y monóxido de carbono) y un segundo paso donde se emplean altas temperaturas (600 a 1000°C). Durante el segundo paso, mediante una serie de reacciones químicas, los residuos sólidos y el metano son transformados en Hidrógeno y dióxido de carbono utilizando vapor de agua. Y la cantidad de Hidrógeno producida se incrementa todavía más transformando el dióxido de carbono en Hidrógeno y monóxido de carbono. Los químicos utilizados en el proceso se pueden

reutilizar en cada ciclo, creando un lazo cerrado que solo consume agua y produce Hidrógeno y Oxígeno. Los materiales que pueden ser procesados mediante este método van desde la basura general, residuos industriales alimenticios, desechos de granja y carbón. Este proceso puede variar en función de los materiales de partida, la temperatura y el tipo de catalizador.

Biomasa con alto contenido en agua

Comparada con la biomasa seca, la contenida con alto contenido en agua no es adecuada para un procesado termoquímico tradicional debido a razones económicas. En su lugar, se procesa mediante procesos biotecnológicos catalizados por microorganismos en un entorno acuático bajo bajas

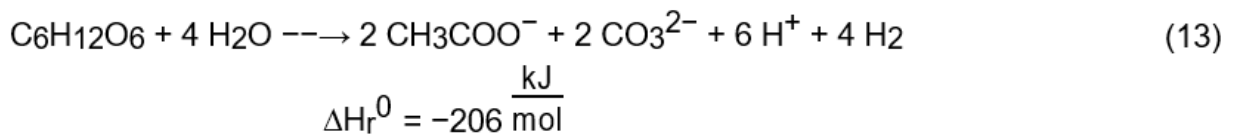
temperaturas y presiones. Estos procesos biológicos usualmente emplean algas o bacterias anaeróbicas que se encuentran en entornos donde no hay Oxígeno atmosférico. El efecto de los microorganismos varía en base al alimento y las condiciones del proceso empleadas.

Repaso de los procesos más comunes para producir Hidrógeno utilizando medios biotecnológicos:

Fotólisis directa La fotólisis directa utiliza luz solar y enzimas producidas por microorganismos para dividir el agua en Oxígeno e Hidrógeno. Estos procesos utilizan sistemas de microalgas fotosintéticas para recoger la energía solar y convertirla en la energía química necesaria para dividir el agua. Estos procesos son solo posibles bajo condiciones anaeróbicas, donde el contenido de Oxígeno máximo es de un 0.1%, ya que las enzimas son muy sensibles a la presencia de Oxígeno. La sustancia de partida de la fotólisis directa es solo agua, que es gratis y fácil de obtener. La desventaja de la fotólisis directa es la baja eficiencia del 5%, que puede ser elevada en condiciones de laboratorio al 15%. Otra opción es la fotólisis indirecta, un método más complejo consistente en varios pasos: producción de biomasa a partir de la fotosíntesis, concentración de la biomasa, fermentación anaeróbica y una conversión del acetato (sales de ácido acético). La fotólisis indirecta utiliza cianobacterias.

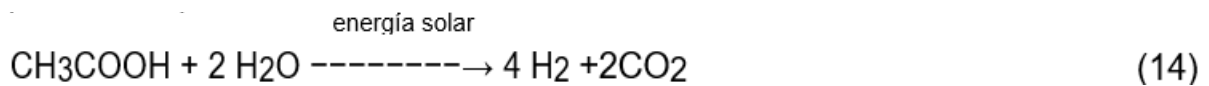
Fermentación La fermentación es la conversión de sustancias utilizando enzimas de microorganismos debidas a la actividad metabólica. Las sustancias orgánicas (carbohidratos) se convierten en compuestos de baja energía (etanol, dióxido de carbono). Los recursos más convenientes son las patatas y la caña de azúcar. Hay dos tipos principales de fermentación. La primera es la fermentación del Hidrógeno (fermentación oscura) y la segunda es la fotofermentación.

Fermentación Oscura La fermentación oscura se lleva a cabo por bacterias anaeróbicas forzadas y facultativas en ausencia de luz y Oxígeno. Los compuestos orgánicos son la principal fuente de energía e Hidrógeno. Diferentes tipos de bacteria utilizan la reducción por protones a Hidrógeno para almacenar los electrones producidos durante la oxidación de compuestos orgánicos. Los productos teóricos de 1 mol de glucosa se muestran en la siguiente ecuación (fórmula)



La máxima cantidad de Hidrógeno producida es 4 moles y 206 kJ de energía son liberados. Además, de los dos moles de acetato producidos se pueden producir otros 4 moles de H₂.

De forma similar a la fermentación oscura, la fotofermentación produce Hidrógeno y CO₂ utilizando bacterias y materia orgánica. La diferencia es que los procesos son realizados utilizando luz solar. Uno de los grupos de microorganismos con la habilidad de la fotofermentación son las bacterias púrpuras no sulfurosas que, bajo condiciones anaeróbicas, utilizan ácidos orgánicos simples. El proceso se describe mediante la siguiente ecuación.



La ventaja de utilizar bacterias es su habilidad para adaptar el proceso metabólico. Lo cual significa que pueden ser utilizadas en una gran variedad de condiciones. Ambos tipos de fermentación son combinados con un gran beneficio económico, y el acetato residual de la fermentación oscura se utiliza para la fotofermentación. Es una bioproducción en dos pasos de Hidrógeno. En el primer paso, el Hidrógeno es producido a partir de materia orgánica mediante la fermentación del Hidrógeno, y en el segundo paso, el biogás se recicla o el Hidrógeno se produce a partir de la fotofermentación. También es posible obtener energía quemando la biomasa residual.

Resumen del capítulo

- Cuando una corriente continua fluye a través de una disolución acuosa, rompe los enlaces químicos entre el Hidrógeno y el Oxígeno
- La eficiencia global de la electrólisis está entre el 25 y el 35%.
- La electrólisis tiene una gran demanda energética. Unos 5.2 kWh se utilizan para producir 1 m³ de Hidrógeno.
- Hidrógeno gas de gran pureza se produce en la electrólisis, debido a la limpieza del proceso.
- La electrólisis se utiliza donde hay disponible energía verde y barata.
- En la electrólisis alcalina se utiliza una disolución ácida o alcalina.
- La electrólisis con un electrolito polimerizado utiliza una membrana para transportar los iones.

- Parte de la energía necesaria para la electrólisis de alta temperatura se aporta en forma de electricidad y parte en forma de calor.
- Durante la división termoquímica del agua, las reacciones químicas se inician por el calor y el resto de las sustancias químicas son recicladas.
- En la fotoelectrolisis, los electrodos están mezclados con el electrolito, pero en lugar de producir una corriente eléctrica, el agua se divide en Hidrógeno y Oxígeno.
- El ciclo del azufre de Westinghouse utiliza energía eléctrica, agua y dióxido de azufre para producir Hidrógeno y ácido sulfúrico.
- Paneles solares sobre la superficie del mar pueden ser utilizados para realizar electrólisis en el agua.
- El amoníaco y la urea contenidos en la orina pueden ser utilizados para producir Hidrógeno utilizando tecnologías de orina.
- La energía producida durante la quema o la gasificación de la biomasa puede ser utilizada para producir Hidrógeno, por ejemplo por reformado por vapor.

Preguntas de final de capítulo:

1. Describe los principios de la electrólisis del agua.
2. Qué sustancia se utiliza como electrolito durante la electrólisis alcalina del agua?
3. Qué sustancia química se utiliza como electrolito en la electrólisis del agua con membrana polimérica?
4. Cuáles son las temperaturas de operación durante la electrólisis de alta temperatura?
5. Qué energía se utiliza durante la electrólisis termoquímica del agua?
6. Qué es el ciclo del azufre Westinghouse?
7. Dónde es más común el uso de plantas de Hidrógeno alimentadas con energía solar?
8. Explicar el término Potencial de Orina.
9. Nombrar y explicar las tecnologías más comunes utilizadas para producir Hidrógeno a partir de la biomasa

4 CÉLULAS DE COMBUSTIBLE

Objetivos:

- Explicar los principios de funcionamiento de las células de combustible
- Dividir las células en base a su temperatura de uso
- Definir las células en base al tipo de electrolito
- Nombrar otros componentes de un vehículo con células de combustible

Palabras clave:

- Células de combustible
- Electrolito

Existen diferentes tipos de células de combustible que pueden ser diferenciadas principalmente por el electrolito y la temperatura de trabajo. Los sistemas utilizan diferentes reacciones químicas que suceden en los electrodos y la eficacia de la conversión electroquímica.

El principio de la producción de electricidad se basa en la reacción química entre el Hidrógeno y el Oxígeno. Esta reacción produce energía y agua. La energía se obtiene en forma de corriente eléctrica. El funcionamiento de todas las células de combustible se basa en el principio de la figura 4. Si miramos atrás a la producción de Hidrógeno mediante electrólisis, veremos que la célula de combustible funciona de forma similar. En este caso, la sustancia de entrada es el Hidrógeno, y la salida es una corriente eléctrica. El Hidrógeno se bombea al ánodo. El proceso divide al Hidrógeno en iones y cationes (fórmula



El electrolito permite el paso de protones, pero evita el paso de electrones del ánodo al cátodo. Los electrones tienen que llegar al cátodo a través de un circuito externo. El flujo de electrones a través de este circuito produce una corriente eléctrica. Después, el aire se lleva al cátodo, donde se combina con iones de Hidrógeno, y juntos producen agua y calor (fórmula 16).

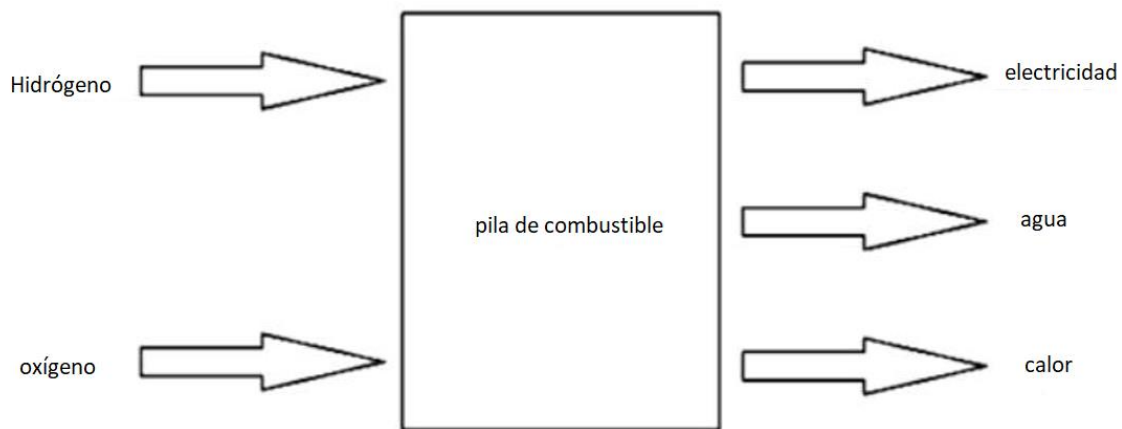


Figure 4 Principio funcional de la célula de combustible.

El voltaje en una célula de combustible es muy bajo, alrededor de 1 V. Tiene que ser mucho más alto para poder ser utilizado en la práctica. Para conseguirlo, se conectan múltiples células de combustible en serie

4.1 ORGANIZACIÓN BÁSICA DE LAS CÉLULAS DE COMBUSTIBLE

Los tipos de las células de combustible difieren básicamente en el tipo de electrolito y en la temperatura de trabajo. Los sistemas utilizan diferentes reacciones químicas que suceden en los electrodos y la eficacia de la conversión electroquímica.

Organización de las células de combustible por su temperatura de trabajo:

- Baja temperatura (60 a 130°C)
- Temperatura media (160 a 220°C)
- Temperatura alta (600 a 1050°C)

Organización de las células de combustible por el tipo de electrolito:

- Células de combustible alcalinas, en las que el electrolito es principalmente hidróxido potásico (KOH) diluido.
- Células de combustible de membrana y electrolito polimerizado, en las que el electrolito es un sólido orgánico polimerizado
- Células de combustible de ácido fosfórico, en las que el electrolito es ácido fosfórico (HPO₃)
- Células de combustible de carbonato fundido, en las que el electrolito es una mezcla de carbonatos fundidos
- Células de combustible de óxidos sólidos, en las que el electrolito son óxidos de varios metales
-

Los coches alimentados con Hidrógeno necesitan incluir otras partes, sin las cuales no podrían funcionar.

- Depósito de combustible: Uno o más cilindros almacenan Hidrógeno comprimido a una presión de entre 30 y 70 MPa.
- Batería: Almacena energía eléctrica y apoya el coche cuando acelera. La energía obtenida mediante recuperación convierte la energía cinética del frenado y la deceleración en energía eléctrica.
- Motor eléctrico: Un motor con un alto par mueve el eje posterior o anterior. La energía se obtiene directamente de la célula de combustible o de la batería. Necesita menos mantenimiento que un motor de combustión.

Resumen del capítulo

- El principio de la producción de electricidad se basa en la reacción química entre el Hidrógeno y el Oxígeno.

- Por su temperatura, las células de combustible se dividen en grupos de: baja, media y alta temperatura.
- Por el tipo de electrolito, las células de combustible se dividen en: alcalinas, poliméricas, de ácido fosfórico, de carbonatos fundidos y de óxidos sólidos.

Preguntas de fin de capítulo

1. Qué reacción química tiene lugar en una célula de combustible?
2. Qué voltaje se genera en una célula de combustible?
3. A qué temperaturas operan las células de combustible de alta temperatura?
4. Qué sustancia química forma el electrolito de una célula de energía alcalina?

5 SEGURIDAD Y ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

Objetivos

- Definir guías de seguridad para manejar el Hidrógeno y sus efectos biológicos
- Explicar las diferencias entre almacenar Hidrógeno en forma líquida y como gas
- Explicar los principios del almacenamiento del Hidrógeno como hidruro
- Explicar los términos absorción y adsorción

Palabras Clave:

- Almacenamiento de Hidrógeno
- Cámara criogénica
- Hidruros
- Absorción
- Adsorción

Este capítulo está dedicado a las tecnologías de almacenamiento del Hidrógeno, que son los principales factores limitantes para el amplio uso del Hidrógeno. El Hidrógeno, de todos los tipos de combustible, tiene la menor densidad y punto de ebullición, lo cuál hace su almacenamiento un desafío. Las principales formas de almacenamiento se dividen entre las que son bien conocidas y los nuevos y alternativos métodos.

5.1 USO SEGURO DEL HIDRÓGENO

El uso inexperto del Hidrógeno ha dado lugar a abundantes accidentes, influyendo de forma significativa en la percepción de su uso por parte del público. Se considera muy peligroso. No obstante, estos accidentes fueron causados principalmente por cuestiones técnicas y fallos en el servicio. Por tanto, es crucial considerar los peligros cuando se trabaja con Hidrógeno e incrementar la atención a las condiciones de operación en entornos con Hidrógeno.

El Hidrógeno crea un compuesto combustible cuando se mezcla con Oxígeno, Fluor y Cloro. La regla de seguridad más importante es evitar el contacto del Hidrógeno con el aire, ya que esta mezcla es altamente inflamable. Puede hacer ignición con cigarrillos, cargas eléctricas, chispas, o incluso objetos calientes. Por ello, es necesario seguir unas regulaciones de seguridad, técnicas y de fuegos muy estrictas, y tener unas guías en todas las áreas donde el Hidrógeno se utilice o almacene.

El Hidrógeno tiene un coeficiente de Joule-Thomson negativo a temperatura estandar y, por tanto, su temperatura se incrementa cuando la presión disminuye. Esto da lugar al riesgo de combustión espontánea durante la expansión rápida de Hidrógeno comprimido. Por ello, las áreas donde se almacene y se utilice el Hidrógeno deben de estar muy bien ventiladas.

Dado que el Hidrógeno es más ligero que el aire, se puede acumular bajo el techo, incrementando el riesgo de explosiones. En cilindros presurizados con gas comprimido, la presión se eleva con la temperatura. Por tanto, las condiciones de almacenamiento de los cilindros presurizados no pueden

exceder los 50°C, de otra forma, existe riesgo de daños mecánicos en los sistemas de colección y distribución (válvulas, reguladores y cuadros de distribución).

5.2 EFECTOS BIOLÓGICOS DEL HIDRÓGENO

Una alta concentración de Hidrógeno en zonas cerradas puede ser perjudicial para las personas, ya que disminuye la cantidad de Oxígeno en el aire. No obstante, la concentración de Hidrógeno necesaria para crear un entorno con insuficiente Oxígeno es mucho mayor que el punto de inflamación, por lo que el peligro de explosión es mayor. El Hidrógeno líquido y el gas frío liberados del líquido pueden causar quemaduras en contacto con la piel. La piel puede pegarse a contenedores de Hidrógeno que no estén suficientemente aislados y puede ser arrancada de la carne. La inhalación de Hidrógeno puro puede causar la pérdida de consciencia y la muerte casi inmediata.

5.3 ALMACENAMIENTO DE GAS COMPRIMIDO

Almacenar el Hidrógeno como un gas comprimido requiere de menos energía comparado con almacenarlo en forma líquida. Los recipientes estacionarios para el almacenamiento de Hidrógeno están hechos de acero bajo en carbono o una aleación de acero y cromo y no tienen soldaduras. La presión en estos tanques es de unos 200 bares. En la república Checa, los recipientes de 61 kg y 50 l son los más comunes. Los cilindros de 1 o 2 l se utilizan para Hidrógeno de alta pureza. Para aumentar la capacidad, contenedores pequeños se agrupan y unen. Usualmente, hay diez cilindros por grupo.



Figure 5 Señal - Extremadamente inflamable.

Los cilindros de materiales compuestos se utilizan para el transporte de Hidrógeno. Estos se hacen en volúmenes de 10 a 300 l y se recubren con una fina capa de metal o un polímero especial. Esta capa previene las fugas. La presión en estos cilindros es de entre 350 y 700 bares, y el límite tecnológico de estos contenedores es de 1000 bares. En el caso de aplicaciones de grandes volúmenes, es más conveniente utilizar vehículos con células de combustible. Los vehículos con células de combustible están equipados con

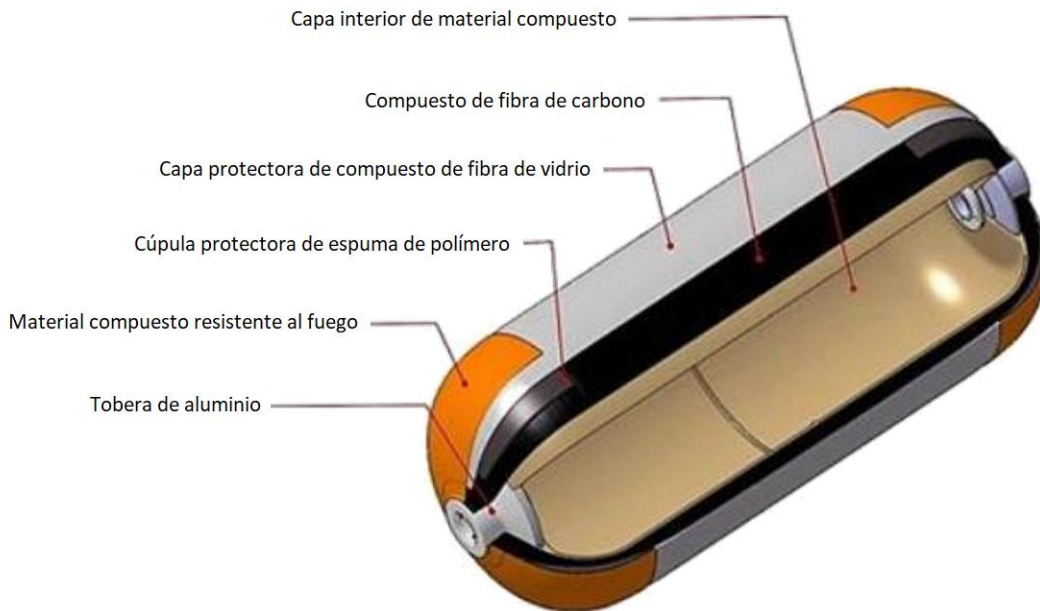


Figure 6 Sección cruzada de un cilindro de almacenamiento de Hidrógeno.

numerosos cilindros de 50 l o con nueve tanques de presión horizontales. El gas se transfiere a tanques de presión estacionarios cuando se le lleva al cliente. Los tanques de presión estacionarios son cilindros estandar y operan a una presión de 50 bares. Se fabrican en volúmenes de 25, 50 y 90 m³.

Otro método es el almacenamiento subterráneo. Para ello, se emplean cavidades en minas de sal y depósitos de gas vacíos. De esta forma, el Hidrógeno se puede almacenar a presiones de hasta 110 bares. Presiones más altas pueden superar la fuerza de capilaridad que almacena el agua en microporos y puede resultar en fugas de Hidrógeno.

El Hidrógeno en su forma gaseosa puede ser almacenado en microesferas de cristal huecas. Este método todavía está bajo desarrollo. Debería ser una forma de almacenamiento de Hidrógeno segura para aplicaciones móviles. Las microesferas se llenan de Hidrógeno a entre 350 y 700 bares de presión y a 300 °C usando difusión. El gas queda atrapado cuando se enfrían a temperature

5.4 ALMACENAMIENTO CRIOGÉNICO DE HIDRÓGENO LÍQUIDO

Licuar el Hidrógeno incrementa su densidad de almacenamiento, por tanto, es posible almacenar más energía que cuando se almacena como gas. El LH₂ (H₂ líquido) se almacena a una temperatura de -253°C, y la principal preocupación es los requerimientos energéticos del proceso de liquefacción del Hidrógeno, que utiliza un 30% de energía obtenida de quemar el Hidrógeno líquido. Otro problema es la pérdida de un 3% en volumen del Hidrógeno almacenado diariamente. Por tanto, es crucial desarrollar nuevos métodos de licuar para reducir las demandas energéticas y aumentar la eficiencia del proceso.

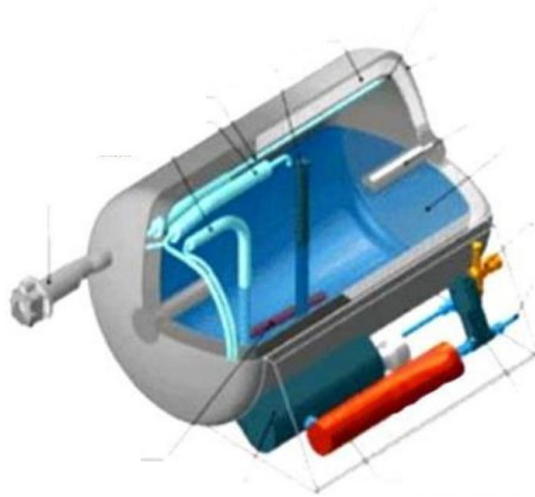


Figure 7 Contenedor criogénico de Hidrógeno.

Tipo de Contenedor	Masa del contenedor (kg)	Volumen del contenedor (l)
Tanque de combustible	55	45
Tanque criogénico	100	180
Tanque de acero a 350 bares	360	290
Tanque de composites a 350 bares	120	290
Tanque de composites a 450 bares	130	230
Tanque de composites a 700 bares	140	200

Fig. 7: Jämförelse av vanliga lagringsmetoder

El LH₂ se almacena en contenedores de múltiples capas con buenas propiedades aislantes, equipadas con protección contra las sobrepresiones. La protección contra la sobrepresión libera el LH₂ evaporado para evitar que se acumule presión en el tanque. Las pérdidas diarias usuales son de un 3% en volumen por día. A veces, el LH₂ evaporado es capturado y almacenado en tanques de presión adicionales.

Comparación de métodos convencionales

La siguiente tabla muestra una comparación entre las masas y los volúmenes característicos de un tanque de combustible lleno para un coche con una autonomía de 500 km, que representa un equivalente entre unos 6 kg de H₂ y 45 l de gasolina.

Un coche de Hidrógeno con una autonomía de 500 km necesitaría estar equipado con un tanque de combustible de casi 4 veces el tamaño y de entre 2 a 3 veces la masa comparado con un coche de gasolina (en el caso de un tanque de acero, entonces de hasta 7 veces la masa).

5.5 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN HIDRUROS

Este método de almacenamiento se basa en enlazar el Hidrógeno a materiales basados en metales bajo condiciones de temperatura y presión convenientes. La reacción del Hidrógeno con un metal se llama absorción del Hidrógeno. El Hidrógeno es absorbido directamente en el volumen del material. El Hidrógeno atómico se incorpora al espacio intersticial de la red cristalina de hidruros metálicos simples cristalinos. El enlazado del Hidrógeno es una reacción exotérmica, y se libera calor durante el llenado del depósito. Por tanto, debe ser refrigerado. Durante el proceso opuesto, cuando se libera el Hidrógeno, se debe aplicar calor de forma externa. El Hidrógeno se libera en forma de gas, y el proceso puede ser repetido sin ninguna pérdida para la capacidad de almacenamiento. Se está investigando la termodinámica de la reacción, la cinética de la adsorción y desadsorción, la capacidad volumétrica y gravimétrica, el precio y la complejidad de los procesos. El potencial para el almacenamiento de Hidrógeno en hidruros metálicos se basa en los coches y otros medios de transporte donde un almacenamiento reversible es necesario. La desadsorción del Hidrógeno se realiza a rangos de temperatura y presión bajos. Las condiciones de trabajo óptimas para células de combustible con membrana polimérica son presiones de entre 1 y 10 atmósferas y temperaturas de entre 25 y 120°C. El calor residual de una célula de combustible se considera. Un hidruro metálico simple, como el LaNi₅H₆ puede ser empleado en esta situación. Las desventajas son la baja capacidad gravimétrica (ratio entre la capacidad de la célula y la masa de la célula) del almacenamiento de Hidrógeno (aproximadamente 1.3%) y el elevado precio para la industria de la automoción.

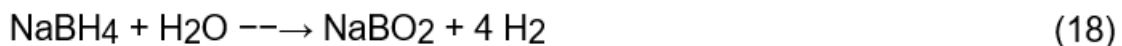
Otros materiales para el almacenamiento de Hidrógeno incluyen los basados en el Magnesio. Su capacidad gravimétrica es de entre 5 y 6% en condiciones experimentales de entre 260 y 280°C. Hidruros complejos también ofrecen mejores capacidades gravimétricas (18% para el LiBH_4) que los hidruros simples, pero la reversibilidad (la liberación del Hidrógeno) es peor.

Almacenamiento de Hidrógeno en hidruros químicos

El almacenamiento de Hidrógeno en hidruros químicos es la etiqueta para otros hidruros que no contienen metales. Estos hidruros son principalmente compuestos de Boro y Nitrógeno. El Hidrógeno se obtiene por una reacción química entre los hidruros y agua o alcohol. Esta reacción es menos reversible que para los hidruros metálicos; por tanto, su uso en vehículos es complicado. El combustible quemado y los subproductos son retirados del vehículo y para su reprocesamiento.

Hidrólisis

La hidrólisis es la reacción entre hidruros químicos y agua que produce Hidrógeno. Un ejemplo es la reacción entre el agua y el borohidrato de sodio:



Para evitar esta reacción (iniciada por el agua) durante la manipulación del combustible, se emplea un líquido estabilizante. Cuando se necesita combustible, el líquido estabilizante se mezcla con agua, produciendo un Hidrógeno de alta pureza. La capacidad gravimétrica de de en torno al 4%. Otro material adecuado para la hidrólisis es el MgH_2 . Su capacidad gravimétrica en condiciones de laboratorio es de hasta el 11%:25



Reacciones de Hidrogenización/Deshidrogenización

La hidrogenización es una reacción química por la cual se le añade una molécula de Hidrógeno a un compuesto. La reacción opuesta es la deshidrogenización, durante la cual el Hidrógeno es liberado del compuesto. La hidrogenización y deshidrogenización son una posible forma de almacenamiento del Hidrógeno que ha sido estudiada por muchos años. Una de estas reacciones es la reacción de la decalina a naftalina, que puede liberar un 7.3% de su masa como Hidrógeno a 210°C mediante la reacción 20. La ventaja de este método es que no se necesita agua.



Nuevos estudios están enfocados en la reacción entre metales ligeros con metanol o etanol. La producción deliberada de Hidrógeno debería ser posible a temperatura ambiente. La desventaja es la misma que la de la hidrólisis, el reprocesado de los subproductos es complicado. La desventaja para la industria automovilística es la necesidad de alcohol, que incrementa la masa y el precio del proceso.

La sorción del Hidrógeno

La investigación del almacenamiento del Hidrógeno utilizando sorción ha sido un campo de interés científico durante los últimos años. La Sorción es un proceso en el cuál una sustancia se queda pegada a la superficie de otra. la capacidad de absorción de una sustancia crece con el tamaño de su superficie. Dos métodos conocidos son la absorción física, que utiliza una fuerza de atracción, y la sorción química, que utiliza enlaces químicos.

Nanotubos de carbono

Nuevos estudios muestran que la capacidad de almacenamiento de Hidrógeno en nanotubos de carbono a temperatura ambiente y una presión de 8 MPa no supera el valor del 0.42% de fracción en masa. Conjuntos de nanotubos pueden almacenar una gran cantidad de Hidrógeno en condiciones criogénicas. Muchos estudios teóricos y experimentales confirman que la capacidad de almacenamiento del Hidrógeno en nanoestructuras de carbono está mediada por la débil interacción entre el H₂ y los nanotubos a temperatura ambiente.

Nanotubos de nitruro de boro

Otro material adecuado para el almacenamiento de Hidrógeno son los nanotubos basados en carbono y nitruro de boro. Añadiendo heteroátomos de nitruro de boro a los nanotubos de carbono, la interacción de los materiales con el H₂ es más fuerte que con los nanotubos de carbono. Los estudios han mostrado que la capacidad de estos nanotubos a temperatura ambiente es de hasta el 2.6%, y que puede ser incrementada hasta el 4.2% de la fracción en masa del Hidrógeno cuando la estructura de los nanotubos colapsa.

Grafeno apilado

Los materiales basados en el carbono tienen un gran potencial para el almacenamiento de Hidrógeno en la industria. Uno de los problemas que ralentizan su distribución es la capacidad de almacenamiento. Es crucial incrementar el número de moléculas de Hidrógeno absorbidas. Se ha probado que la absorción depende de la porosidad del material; por ello, un nuevo material (el grafeno apilado) ha sido desarrollado. Combina dos estados alotrópicos del carbono (nanotubos y hojas) creando un material 3D con poros ajustables.

Los poros pequeños en los materiales evitan la inserción del Hidrógeno; los poros grandes causan espacio residual en los materiales. Por tanto, solo poros de un tamaño ideal pueden crear condiciones de almacenamiento del Hidrógeno eficientes. La variación del tamaño del poro se puede conseguir con la libertad de variar la longitud y el diámetro del tubo, de forma conjunta a la distancia entre tubos.²⁸

Repaso de tecnologías alternativas

En el capítulo previo, se han descrito las tecnologías de almacenamiento del Hidrógeno más desarrolladas. Hay una gran cantidad de métodos en desarrollo. Adicionalmente, se están realizando experimentos con compuestos del Hidrógeno (hidrocarburos, amoníaco). Los métodos utilizados actualmente se están mejorando. La figura 8 muestra los principios de los métodos convencionales y alternativos.

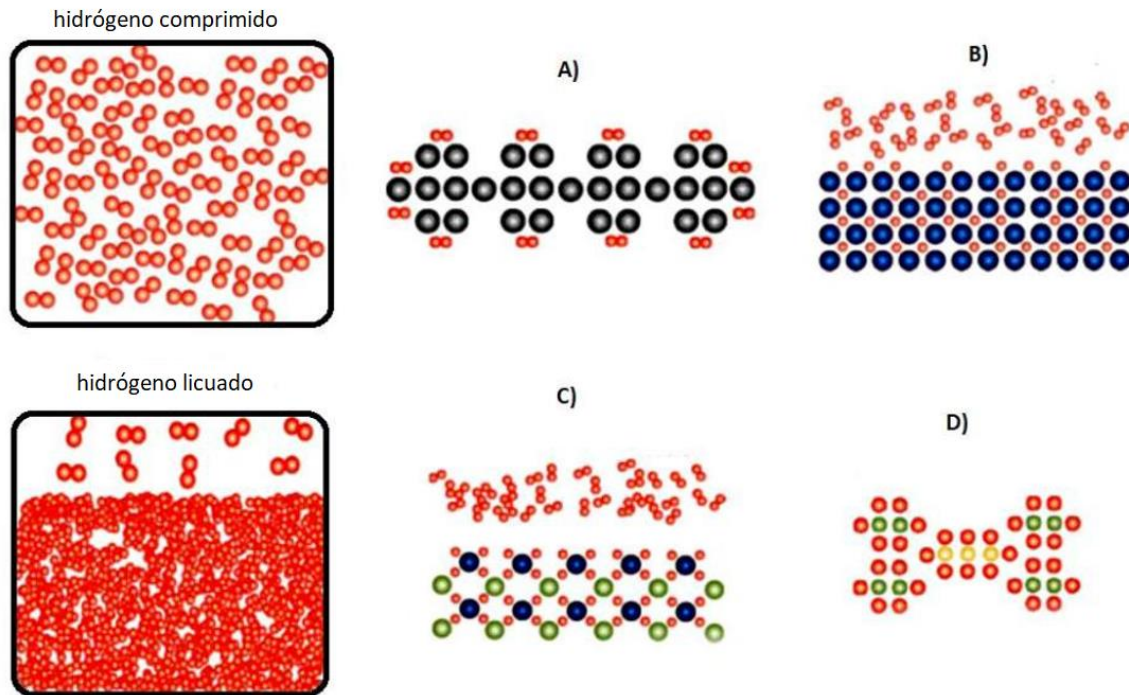


Figure 8 Diferentes métodos de almacenar Hidrógeno y sus principios.

Las figuras de la primera columna muestran Hidrógeno comprimido y licuado. La imagen A) muestra el almacenamiento del Hidrógeno por la absorción sobre la superficie de sustancias sólidas, donde el Hidrógeno está enlazado en moléculas de Hidrógeno o en átomos. La imagen B) representa la absorción de átomos de Hidrógeno que están introducidos en la red del material (este método presenta una gran capacidad de almacenamiento en pequeños volúmenes, a presiones bajas y temperaturas casi ambiente). Las figuras C) y D) muestran hidruros complejos, donde el Hidrógeno está fuertemente enlazado en estructuras moleculares formando compuestos químicos. La densidad se incrementa de A a D.

5.6 SEGURIDAD EN LA INDUSTRIA DEL AUTOMOVIL

Todos los combustibles tienen una alta concentración de energía y son, por tanto, bajo ciertas condiciones, peligrosos. El Hidrógeno debe de ser considerado de una forma similar o incluso más segura que cualquier otro combustible. Los tanques de Hidrógeno son probados no solo en ensayos estándar de choque, sino que también aguantan el disparo de un rifle. Los tanques pueden aguantar

el doble de la presión a la que se los somete normalmente. Una seguridad similar se consigue en las estaciones de llenado que contienen diferentes tipos de sistemas de seguridad enfocados en condiciones de alta presión.

La seguridad del Hidrógeno se basa en su pequeña densidad. Por ello, cuando el depósito se agujerea, el gas sube rápidamente a la atmósfera, evitando la acumulación en el lugar del accidente. También, durante un fuego, la llama se eleva verticalmente por encima del vehículo, evitando una llamarada, como es común con combustibles fósiles líquidos.

La producción del Hidrógeno ha estado ahí durante décadas, y no ha habido ninguna tragedia excepcional. El Hidrógeno es también un gas que no es peligroso para la salud, y una posible fuga no pondría en peligro a las personas. Además, los sistemas del Hidrógeno en vehículos modernos están diseñados de forma que se aislarían en caso de un accidente para evitar llamaradas súbitas.

Resumen del capítulo:

- El Hidrógeno forma compuestos explosivos con el Oxígeno, el Fluor y el Cloro, y son muy inflamables.
- Una rápida expansión del Hidrógeno comprimido puede hacer que entre en autoignición.
- El contacto directo con el Hidrógeno causa quemaduras, y su inhalación directa causa la pérdida de la consciencia y la muerte.
- El almacenamiento del Hidrógeno como gas requiere menos energía, y se emplean cilindros de 50 l y 200 bares de presión.

- Otra forma de almacenar Hidrógeno gas es el almacenamiento subterráneo.
- El Hidrógeno gaseoso también se puede almacenar en microesferas de cristal.
- El Hidrógeno líquido se almacena a una temperatura de -253°C .
- Hasta un 30% de la energía que se obtiene del Hidrógeno líquido se emplea para licuarlo.
- Bajo la influencia del calor ambiente, el LH_2 se evapora e incrementa la presión en el tanque.
- La red cristalina de materiales metálicos y no metálicos pueden absorber Hidrógeno.
- El Hidrógeno puede ser ligado a la superficie de diferentes materiales por adsorción y entonces ser almacenado.

Preguntas de final de capítulo:

1. Qué sustancias químicas pueden causar combustión cuando se mezclan con Hidrógeno?
2. Describe en qué estados se puede almacenar el Hidrógeno

3. Explicar el concepto de almacenamiento del Hidrógeno en forma de hidruros.
4. Qué es la absorción?
5. Qué es la adsorción?

6 CONCLUSIONES

El Hidrógeno como fuente de energía es un importante tema de actualidad. Se lo denomina el combustible del futuro. La producción de Hidrógeno es un proceso crucial que puede realizarse a partir de varios recursos. Actualmente, el 48% del Hidrógeno se produce del gas natural, el 30% del petróleo, el 18% del carbón, y el 4% de la electrólisis. Es evidente que los combustibles fósiles dominan la producción de Hidrógeno, y que solo una pequeña cantidad se produce por electrólisis. Procesos de producción termoquímicos, bioquímicos y fotoquímicos todavía están empezando y no tienen capacidad industrial. En la industria automovilística, solo el Hidrógeno producido mediante métodos alternativos tiene sentido, ya que los combustibles fósiles pueden ser utilizados como combustible directamente. Esta es la principal razón para buscar alternativas.

La electrólisis del agua no puede desafiar a los métodos tradicionales dada su alta demanda energética. Su uso es adecuado para países con una abundancia de agua y de electricidad barata. Islandia es uno de esos países, ya que obtienen su energía de fuentes geotermales. Otros métodos interesantes para producir Hidrógeno son los generadores de cuarta generación. Un medio de refrigeración ccaliente tiene suficiente temperatura como para permitir ciclos químicos o electrólisis de alta temperatura. El método más relevante que puede desafiar a los combustibles fósiles en un futuro próximo es la producción de Hidrógeno utilizando biomasa. La biomasa pertenece a una fuente de energía renovable prometedora. Excepto para la producción de Hidrógeno, también tiene un uso energético a gran escala. Los problemas restantes del Hidrógeno son su almacenamiento. La capacidad de almacenamiento necesita mejorar para la proliferación a escala global del Hidrógeno, dados su alta masa y volúmenes. El coste del Hidrógeno todavía está por encima del coste de los combustibles fósiles. La eficiencia energética (alta demanda energética de la compresión, liquefacción o el reprocesado de compuestos químicos) es otro aspecto que necesita ser mejorado.

