

MTL 2016 – La Plata, Argentina

## MÉTODOS AMIGABLES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA LIMPIA

Diego Venegas<sup>1</sup>, Manuel Meléndrez<sup>2</sup>,  
Santiago Celi<sup>3</sup>, César Ayabaca<sup>4</sup>

1-Departamento de Ingeniería de Materiales Universidad de Concepción,  
Calle Edmundo Larenas 270, Concepción Chile.

diegofvenegas@udec.cl

2-Departamento de Ingeniería de Materiales Universidad de Concepción,  
Calle Edmundo Larenas 270, Concepción Chile.

mmelendrez@udec.cl

3-Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad Internacional SEK,  
Quinta Transversal y Alberto Einstein, Quito Ecuador.

santiago.celi@uisek.edu.ec

4-Departamento de Ingeniería Mecánica Escuela Politécnica Nacional,  
Ladrón de Guevara E 11-253, Quito Ecuador.

cesar.ayabaca@epn.edu.ec

**Palabras clave:** Reducción de contaminantes, producción de hidrógeno, energías renovables.

### Resumen

Los últimos años han sido testigos de fenómenos climáticos extremos, la comunidad científica concuerda que uno de los factores que más influencia en este cambio es el uso de energías no renovables por parte del ser humano. Cuando se quema gasolina, se producen entre otros: nitrógeno, vapor y dióxido de carbono, los cuales producen el efecto invernadero, que atrapa la radiación solar en la atmósfera, calentándola [1] [2]. Se hace cada vez mayor la necesidad de apuntar al desarrollo de energías limpias, y que sean benignas en términos de impacto sobre el medio ambiente y el ser humano [3].

El hidrógeno es el más ligero, simple y abundante de los elementos químicos en el universo, y está siendo utilizado como una fuente de energía limpia en términos de emisiones. En la actualidad, el hidrógeno es producido por diferentes fuentes: 48% a partir de gas natural, 30% de aceite, 18% a partir de carbón, y la electrólisis del agua sólo el 4%.

Se produce sólo en combinación con otros elementos, principalmente con oxígeno en agua y con carbono, nitrógeno y oxígeno en materiales vivos y combustibles fósiles. La producción de hidrógeno a partir de gas, petróleo y carbón provoca graves problemas de contaminación por emisiones de carbono, plomo y otros contaminantes [2].

En las celdas de combustible, se combina con el oxígeno sin generar CO<sub>2</sub>, el único subproducto es agua. Algunas de las ventajas de la producción de hidrógeno son:

- (i) la seguridad energética mediante la reducción de las importaciones de petróleo,
- (ii) sostenibilidad mediante el aprovechamiento de fuentes de energía renovable,
- (iii) menos contaminación y mejor calidad del aire urbano por la producción de casi cero de carbono, hidrocarburos, gases de efecto invernadero y emisiones NOx.

- (iv) viabilidad económica en la formación de los futuros mercados energéticos mundiales.
- (v) tiene un alto contenido de energía por unidad de masa en comparación con el petróleo.
- (vi) la hidroelectricidad a partir de hidrógeno se puede utilizar para producir energía a zonas remotas o aisladas [4] [5] [6]

## 1. Introducción

El presente trabajo pretende mostrar algunos de los métodos de producción de hidrógeno como un elemento portador de una energía limpia y amigable con el medio ambiente, además se presentarán las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos.

### Introducción

Los últimos años han sido testigos de fenómenos climáticos extremos, de lo cual la comunidad científica concuerda que uno de los que más influencia en este incremento es el uso de energías no renovables. Cuando se quema gasolina, se producen entre otros: nitrógeno, vapor y dióxido de carbono, los cuales producen el efecto invernadero, que atrapa la radiación solar en la atmósfera, calentándola [1] [2].

Los gobiernos del mundo se están cada vez más preocupando por disminuir el impacto ambiental que se está produciendo por la producción de energía necesaria para satisfacer las necesidades humanas, y por ello se están dictaminando políticas en pro de generar energía con cero o bajo impacto ambiental.

Se hace cada vez mayor la necesidad de apuntar al desarrollo de energías que no degraden el planeta, y que sean benignas en términos de impacto sobre el medio ambiente y el ser humano.

Como el elemento más abundante sobre el universo, al hidrógeno se lo puede encontrar en diferentes sustancias en la naturaleza, siendo el hidrógeno un portador de energía "verde" [7].

### *a. Breve historia del hidrógeno*

Se tienen registros que el hidrógeno ha sido utilizado para usos militares, industriales y comerciales desde el siglo XIX [8]. El hidrógeno se ha utilizado y producido para fines industriales desde 1920 para síntesis de amoníaco, como el amoníaco reemplazada salitre como el material básico para la fabricación de explosivos y fertilizantes. Hasta 1960, se utilizó hidrógeno en muchos países de la forma de gas ciudad (una mezcla de hasta un 50% de hidrógeno, con monóxido de carbono y metano) para el alumbrado público, así como para el suministro de energía en el hogar (cocina, calefacción iluminación).

En la actualidad el hidrógeno se utiliza mayormente para la síntesis de amoníaco y otros fertilizantes nitrogenados, refinación y desulfuración, hidrogenación de los desechos peligrosos, plantas químicas, preparación de alimentos, síntesis de metanol, etanol, síntesis alternativa de combustibles, combustible para cohetes, combustible para motores de combustión interna, hornos industriales de alta temperatura, entre otras aplicaciones. En menor medida, se lo está utilizando en el refinado de metales como níquel, tungsteno, molibdeno, cobre, zinc, uranio y plomo.

En el futuro, es probable que se utilicen como combustible en casi todas las aplicaciones en las que los combustibles fósiles se utilizan hoy en día. Para transportación en particular, el hidrógeno podría ofrecer beneficios inmediatos en términos de reducción de la contaminación y el medio ambiente más limpio [9].

Hoy en día, el hidrógeno es una materia prima importante en la química y la industria del petróleo y es producido por diferentes fuentes, según lo expresado en la Tabla 1.

Tabla 1. Contenido energético de diferentes combustibles [10].

Fuente	Billones de m <sup>3</sup> /año	Porcentaje
Gas natural	240	48
Petróleo	150	30
Carbón	90	18
Electrólisis de agua	20	4
<b>Total</b>	<b>500</b>	<b>100</b>

### *b. Ventajas de producir hidrógeno*

La producción de hidrógeno tiene algunas ventajas entre las que se pueden mencionar:

- i. Es el más ligero, simple y abundante de los elementos químicos en el universo.
- ii. Se produce sólo en combinación con otros elementos, principalmente con oxígeno en agua y con carbono, nitrógeno y oxígeno en materiales vivos y combustibles fósiles.
- iii. Es muy limpio en términos de emisiones lo que conlleva mejor calidad del aire urbano. En las celdas de combustible, se combina con el oxígeno sin generar CO<sub>2</sub>, hidrocarburos, gases de efecto invernadero y emisiones NO<sub>x</sub>. El único subproducto es agua.
- iv. Seguridad energética mediante la reducción de las importaciones de petróleo,
- v. Sostenibilidad mediante el aprovechamiento de fuentes de energía renovable,
- vi. Viabilidad económica en la formación de los futuros mercados energéticos mundiales.
- vii. La hidroelectricidad a partir de hidrógeno se puede utilizar para producir energía a zonas remotas o aisladas.
- viii. Alto contenido de energía por unidad de masa en comparación con el petróleo. La Tabla 2 muestra la comparación entre los diferentes valores de aporte de energía que tienen diferentes combustibles [4] [5] [6].

Tabla 2. Contenido energético de diferentes combustibles [6].

Combustible	Contenido energético (MJ / kg)	Combustible	Contenido energético (MJ / kg)
Hidrógeno	120	Etanol	29,6
Gas natural licuado	54,4	Metanol	19,7
Propano	49,6	Coke	27
Gasolina automotriz	46,4	Madera (seco)	16,2
Diésel automotriz	45,6	Bagazo	9,6

*c. Desventajas de producir hidrógeno*

La seguridad energética y aspectos ambientales de varios métodos de producción de hidrógeno han sido el problema más crítico que debe ser resuelto antes de establecer una técnica de producción de hidrógeno que sea económicamente viables[2].

El almacenamiento de hidrógeno también es uno de los principales problemas que afectan el futuro economía del hidrógeno. Las instalaciones para almacenamiento de hidrógeno, tanto para régimen estacionario y para aplicaciones móviles, son complicadas debido a su muy bajo punto de ebullición (20,2 K) y muy baja densidad, tanto en forma de gas (0,09 kg / Nm<sup>3</sup> (kilogramo por metro cúbico normal)) y un líquido (70,9 kg / Nm<sup>3</sup> ). Se pueden almacenar físicamente cambiando sus condiciones de estado (temperatura, presión, fase), y la química o físico-químicamente en diversos compuestos sólidos y líquidos (hidruros metálicos, nanoestructuras de carbono, borohidruros, metano, metanol, hidrocarburos ligeros).

El hidrógeno es actualmente almacenada en los vehículos como un gas en cilindros de alta presión (de hasta 700 bar) o como un líquido a 20 K en los embalses criogénicos [11].

Dado que el hidrógeno tiene la más pequeña molécula que tiene una mayor tendencia escapar a través de pequeñas aberturas que otros combustibles líquidos o gaseosos. Basado en las propiedades de hidrógeno tales como la densidad, la viscosidad, y coeficiente de difusión en el aire, la propensión de hidrógeno a la fuga a través de agujeros o juntas en líneas de combustible de presión puede ser sólo 1,26 a 2,8 veces más rápido que una fuga de gas natural a través del mismo agujero.

Algunos aceros de alta resistencia son propensos a la fragilización por hidrógeno. La exposición prolongada al hidrógeno, en particular en altas temperaturas y presiones, pueden hacer que el acero pierda fuerza, que finalmente lo lleve a romperse.

Otro peligro potencial es una violenta explosión de un punto de ebullición vapor de expansión de líquido en caso de un fallo de la válvula de alivio de presión [12].

**2. Métodos de producción de hidrógeno**

Al ser el elemento más abundante de la naturaleza, el hidrógeno está presente en muchas de las cosas que nos rodean, por tanto existen varias fuentes primarias para su obtención, las cuales se las puede ver en la Figura 1.

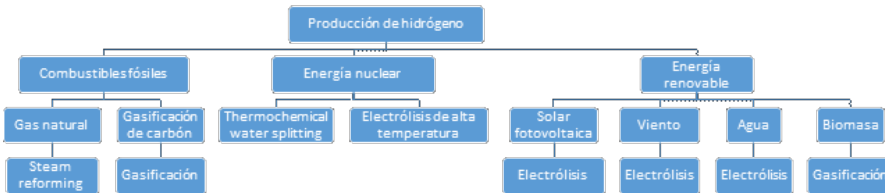


Figura 1. Métodos de producción de hidrógeno [7].

### *a. Combustible fósil reformado*

Es un método de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Siendo el procedimiento menos costoso y más común para generar hidrógeno a partir de combustibles fósiles [7].

Se emiten hidrógeno ( $H_2$ ), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). En este procedimiento, el gas natural ( $CH_4$ ) debe ser limpiado de impurezas, se lo mezcla con carbón y se lo hace circular por un reactor (fuente de calor externa). [13].

### *b. Gasificación de carbono*

Las grandes reservas mundiales de carbono hacen que este sea un procedimiento comercialmente viable a escala industrial. Durante este procedimiento se oxida parcialmente al carbono con vapor y oxígeno en un reactor de alta presión y temperatura [7].

En la gasificación, el carbón es parcialmente oxidado con vapor y los productos son principalmente  $H_2$ , CO, mezclado con vapor y  $CO_2$  (gas de síntesis). Este gas de síntesis va a través de una reacción de desplazamiento con el fin de aumentar el paso de hidrógeno.

El producto de gas puede ser procesado y limpiado en los casos donde hay una necesidad de recuperar el azufre elemental o ácido sulfúrico. A pesar de algunas ventajas de la gasificación de carbón, debido al alto contenido de carbono del carbón, este método provoca mayores emisiones de  $CO_2$  en comparación con otras tecnologías de producción de hidrógeno disponibles.

En la actualidad, el coste de este proceso es ligeramente superior al del gas natural reformado con vapor, sin embargo los costos de la materia prima son más bajos, por lo que se lo hace viable a gran escala [13].

### *c. Thermochemical water splitting*

La producción de hidrógeno es posible a través de diversos esquemas basados en energía nuclear. Estos incluyen la conversión térmica nuclear de agua utilizando diferentes procesos químicos, tales como el ciclo de sodio-yodo, electrólisis del agua utilizando energía nuclear [9].

Es un ciclo termoquímico que divide el agua y no requiere catálisis para conducir el producto químico. Excepto el agua, que es la fuente de material de la producción de hidrógeno, todos los productos químicos utilizados en la termoquímica pueden ser reciclados. Entre las ventajas de este proceso se pueden mencionar las siguientes:

- No hay necesidad de membranas de separación entre el  $O_2$  y el  $H_2$
- Temperatura razonable entre 600 - 1200 K
- Bajo requerimiento de energía eléctrica [14].

### *d. Electrólisis a alta temperatura*

Es un método de electrólisis donde el vapor se disocia a  $H_2$  y  $O_2$  a temperaturas entre 700 y 1000 °C. Se lo considera como más eficiente comparado con la electrólisis a temperatura convencional.

Aquí el agua se convierte en vapor utilizando energía térmica. Los componentes del sistema son calentados: directamente por el suministro de vapor o indirectamente por el calor a transferir. Por lo tanto la necesidad de energía eléctrica en este tipo de electrólisis es menor que en la electrólisis convencional. Otra ventaja de este método es la posibilidad de lograr emisiones de gases de efecto invernadero cero cuando se tiene una fuente de calor limpia (solar, geotérmica, y/o nucleares).

Los retos que tiene este proceso hacia el futuro son:

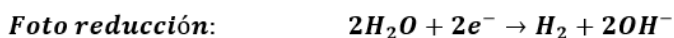
- Desarrollo electrolito químicamente estable con alta conductividad iónica y baja conductividad electrónica,
- Lograr que sea químicamente estable el electrodo en la reducción en ambientes altamente oxidantes
- Lograr ambientes químicamente estables a altas temperaturas [13].

#### *e. Electrólisis PV*

Electrólisis PV es uno de los métodos de producción de hidrógeno más caros; aproximadamente 25 veces mayor que la de las alternativas de combustibles fósiles, por lo que económicamente no es un procedimiento viable para producción de hidrógeno. Sin embargo se espera que con el desarrollo de la tecnología este procedimiento pueda reducirse a 6 la razón entre este método y la producción de hidrógeno por combustibles fósiles.

La fotocatalisis convierte la energía fotónica (viene de la irradiación solar) en energía química (hidrógeno). La energía transportada por el fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación dada por  $hn$  donde  $h$  es la constante de Planck y  $n$  es la frecuencia. Cuando un fotón golpea el fotocatalizador, un par electrón-hueco se genera y se obtiene carga eléctrica que se utiliza para disociar agua.

Para que un fotocatalizador pueda dividir el agua y generar hidrógeno, debería tener una brecha de banda adecuada y correctamente ubicadas las bandas de conducción para reacciones de oxidación/reducción, cuyas ecuaciones se pueden escribir como:



Las celdas fotoelectroquímicas (PEC) convierten la energía solar en un portador de energía a través de la luz que es la que estimula los procesos electroquímicos, combinando ambos procesos en una sola unidad. Esta es una clara ventaja de PEC, ya que no requieren un generador de energía separado tal como una célula PV y por lo tanto son más compactos [13].

En un futuro la energía solar puede convertirse en la mejor opción del futuro por varias razones:

- Es la más abundante fuente de energía renovable.
- Fuente de energía en forma de calor y luz.
- Es de libre disposición en casi todos los lugares del planeta.
- Actualmente es un mercado todavía por explotar, en su mayoría está siendo desperdiciada [15].

El principal problema que tiene generar energía a partir de PV es la baja eficiencia en la captura de la energía, debido a la fluctuación del flujo solar, sobre todo en países de cuatro estaciones, en época de otoño e invierno. Para disminuir este inconveniente, se está desarrollando un concepto de seguimiento para aumentar la captación de energía solar disponible.

#### *f. Energía eólica*

La energía eólica utiliza la potencia disponible en el viento para hacer girar una turbina y producir electricidad. La mayoría de las turbinas modernas utilizan un diseño de la turbina de eje horizontal. Las turbinas eólicas son típicamente montadas en grandes grupos para formar grandes parques eólicos.

El viento es una forma indirecta de energía solar en el que aproximadamente el 2% de toda la radiación solar en la superficie de la tierra se convierte en la energía cinética del aire que se mueve con aproximadamente 30% de esta energía. El potencial eólico estimado en Estados Unidos se estima en 10.777 TW h/año, que es dos veces y media más energía que la de la producción de energía eléctrica en 2007 [16].

#### *g. Electrólisis de agua*

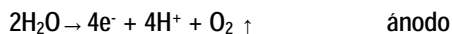
Este procedimiento no requiere ninguna pieza móvil y aplica una corriente eléctrica directa (DC), lo que lo hace que la producción de hidrógeno por este método sea muy sencilla. La descomposición electroquímica del agua es confiable y limpia. La eficiencia de obtención de hidrógeno es muy alta (99,999 %) [4] [17].

Dependiendo del pH que tiene el medio acuoso, la electrólisis de agua puede clasificarse como AWE (medio alcalino) o PEWE (medio ácido) [13].

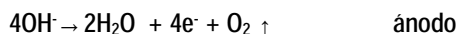
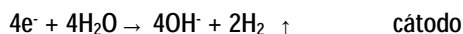
La electrólisis del agua alcalina ha sido ampliamente utilizado en la aplicación industrial y para un gran número de unidades construidas ya en servicio, mientras que la electrólisis del agua PEWE todavía tienen una aplicación limitada en términos de capacidad de producción debido a la vida útil que es muy limitada y la corrosión de las celdas.

El principio de la electrólisis es que se producen reacciones de oxidación y reducción, conocidas como reacciones anódica y catódica, las cuales se pueden describir mediante las siguientes ecuaciones [3] [8]:

PEWE:



AWE:



La eficiencia y la densidad de corriente son los parámetros más importantes. Se utilizan catalizadores con el fin de aumentar la densidad de corriente y velocidad de las reacciones de electrólisis, siendo muy común la utilización del platino como catalizador [13] [8].

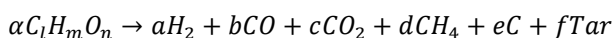
### *h. Conversión termoquímica de biomasa, gasificación, y reformado de biocombustible*

La biomasa puede ser considerada como la mejor opción y tiene la mayor potencial, que cumple con los requisitos de energía y podría asegurar de suministro de combustible en el futuro. Los recursos energéticos de la biomasa comprenden 220 millones de toneladas de secado en horno de la producción primaria anual. El futuro potencial de la biomasa podría alcanzar hasta 25% de mundial de energía primaria para el año 2050 con el uso de los bosques y residuos urbanos, además de cultivos energéticos perennes [11].

Tecnologías de conversión de biomasa se dividen en dos categorías: procesos bioquímicos y procesos termoquímicos. Los procesos termoquímicos tienden a ser menos caros porque pueden ser operados a temperaturas más altas y por lo tanto logran una mayor velocidad de reacción. Se puede tener procesos de gasificación o pirólisis (calentamiento de biomasa en ausencia de oxígeno) para producir un rico hidrógeno en una corriente de gas conocida como "syngas" (una mezcla de hidrógeno y de monóxido de carbono).

El hidrógeno también puede producirse a partir de material de alimentación biorenovable a través de procesos de conversión termoquímicos como la pirólisis, gasificación de vapor, reformado con vapor de bioaceites y gasificación supercrítica de la biomasa del agua [9].

Cuando se utiliza la biomasa para extraer hidrógeno, el contenido de humedad debe mantenerse por debajo de un cierto nivel mediante secado. La reacción para conversión de biomasa es:



Dónde:

$C_l H_m O_n$	Simbolo químico general de la biomasa.
$Tar$	Producto no deseado de la reacción.

Se utilizan catalizadores con el fin de controlar, minimizar y prevenir la formación de alquitrán en esta reacción.

Algunos de los ejemplos de biomasa sólida son el aserrín de madera y caña de azúcar y biomasa líquida son el etanol y el metanol [13].

### **3. Conclusiones**

Se ve la necesidad de realizar mayores investigaciones con el fin de desarrollar métodos de producción de energías más limpias, que puedan suplir con la demanda de energía que tiene el ser humano.

El hidrógeno es considerado el elemento del presente y futuro como un productor de energía limpia y amigable con el planeta, sin embargo, está el reto por hacer de este elemento una fuente económicamente más rentable.

Existen varias formas de producción de hidrógeno como fuente de energía renovable, dependerá de la disponibilidad de equipos y laboratorios para poder realizar mayores estudios a profundidad con el fin de incrementar la eficiencia en los procesos.

Todavía están pendientes mejorar la eficiencia y la seguridad en los métodos de producción y distribución de hidrógeno.



#### 4. Referencias

- [1] Copa Airlines, "Panorama de las Américas," *Energías verdes*, p. 234, 2015.
- [2] M. Shahid, "Production and Enhancement of Hydrogen From Water : A Review," vol. 134, no. September, pp. 1–4, 2012.
- [3] E. Fabbri, "Catalysis Science & Technology Developments and perspectives of oxide-based," *Catal. Sci. Technol.*, vol. 4, pp. 3800–3821, 2014.
- [4] C. F. Pérez-brokate, É. Mahé, D. Féron, and J. De Lamare, "Cyclic voltammetry simulations with cellular automata," vol. 11, pp. 269–278, 2015.
- [5] M. Becherif, H. S. Ramadan, K. Cabaret, F. Picard, N. Simoncini, and O. Bethoux, "Hydrogen Energy Storage : New Techno-Economic Emergence Solution Analysis," *Energy Procedia*, vol. 74, no. 0, pp. 371–380, 2015.
- [6] J. A. Turner, "Sustainable Hydrogen Production," no. September 2004, 2016.
- [7] C. Acar and I. Dincer, "ScienceDirect Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 1–12, 2013.
- [8] K. Mazloomi, N. Sulaiman, and H. Moayedi, "Electrical Efficiency of Electrolytic Hydrogen Production," vol. 7, pp. 3314–3326, 2012.
- [9] S. Sharma and S. Krishna, "Hydrogen the future transportation fuel : From production to applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 1151–1158, 2015.
- [10] M. Balat, "Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems," vol. 33, pp. 4013–4029, 2008.
- [11] H. Balat and E. Kırtay, "Hydrogen from biomass e Present scenario and future prospects," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 14, pp. 7416–7426, 2010.
- [12] P. Beach, "Towards a Hydrogen Economy," no. 5, 2005.
- [13] I. Dincer and C. Acar, "ScienceDirect Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 34, pp. 11094–11111, 2015.
- [14] I. Dincer, "Green methods for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1954–1971, 2011.
- [15] N. Kannan and D. Vakeesan, "Solar energy for future world : - A review," vol. 62, pp. 1092–1105, 2016.
- [16] J. R. Bartels, M. B. Pate, and N. K. Olson, "An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 16, pp. 8371–8384, 2010.
- [17] J. Turner, G. Sverdrup, M. K. Mann, P. Maness, B. Kroposki, M. Ghirardi, R. J. Evans, and D. Blake, "Renewable hydrogen production," no. February 2007, pp. 379–407, 2008.

