

Universidad Militar Nueva Granada

RECTOR

BG (RA) Luis Fernando Puentes Torres

VICERRECTOR GENERAL

BG (RA) Alfonso Vaca Torres

VICERRECTORA ACADÉMICA

Dra. Claudia Helena Forero Forero

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO

MG (RA) Gustavo Adolfo Ocampo Nahar

VICERRECTORA DE INVESTIGACIONES

Dra. Martha Jeaneth Patiño Barragán

VICERRECTOR CAMPUS NUEVA GRANADA

CR (RA) Gustavo Enrique Becerra Pacheco

EDITOR GENERAL - EDITORIAL NEOGRANADINA

Carlos Arturo Arias Sanabria

Inti Camilo Monge Romero

HIDRÓGENO: COMBUSTIBLE DEL FUTURO

Proyecto de Iniciación Científica
Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas
(PIC-CIAS-2912)

Hidrógeno: combustible del futuro

© Universidad Militar Nueva Granada,
Vicerrectoría de Investigaciones

© Editorial Neogranadina
Primera edición, 2020

Diagramación
Isabel Sandoval

Cómo citar:

Monge Romero I. C. (2020) *Hidrógeno: combustible del futuro Proyecto de Iniciación Científica (PIC-CIAS-2911)*. Bogotá: Editorial Neogranadina

DOI: <https://doi.org/10.18359/fwp.5075>

Universidad Militar Nueva Granada
Editorial Neogranadina
Sede Campus, edificio de posgrados, primer piso
Kilómetro 2, vía Cajicá-ZiPaquirá, costado oriental
Teléfono: 650 00 00 Ext. 3092
editorial.neogranadina@unimilitar.edu.co
www.umng.edu.co



HIDRÓGENO: COMBUSTIBLE DEL FUTURO

Proyecto de Iniciación Científica (PIC-CIAS-2911)

Inti Camilo Monge Romero
| Universidad Militar Nueva Granada |

HIDRÓGENO: COMBUSTIBLE DEL FUTURO

Proyecto de Iniciación Científica (PIC-CIAS-2911)

En la actualidad, el precio del petróleo es oscilante a consecuencia de la imposición mundial de los países árabes que con su gran producción del hidrocarburo imponen sus condiciones al mercado mundial. Este factor y otros deberían hacernos replantear la dependencia directa que tenemos sobre este tipo de ingreso económico al país; sobre todo ahora, que Japón e Inglaterra han establecido entre sus políticas nacionales de corto plazo eliminar el consumo de la gasolina y cambiarlo por hidrógeno (H_2), un elemento con excelentes propiedades termodinámicas y a su vez más amigable con el medio ambiente.

La comunidad científica en general opina que el hidrógeno es el combustible del futuro dado que la materia prima de la que saldría cubre tres cuartas partes del planeta (H_2O). Además, los sistemas de celdas de combustión resultan más eficientes (aprox. de un 92%) que los motores de combustión interna cuya eficiencia no supera el 40%. Incluso, los países árabes, han empezado a producir hidrógeno a través de la hidrólisis del agua empleando campos de paneles solares y aprovechando el abundante sol que poseen por sus grandes y extensas zonas desérticas. El conocimiento sobre el hidrógeno no es nuevo, y por esta razón la presente cartilla trata de enseñarle a los estudiantes, de los distintos programas que ofrece la Universidad Militar Nueva Granada, la perspectiva actual sobre el tema energético del hidrógeno y lo próxima que está realmente su implementación en el mundo.

INTI CAMILO MONGE ROMERO

Nació en Managua-Nicaragua, en 1983. En el 2009, recibió el título de Químico de la Universidad Nacional de Colombia, gracias al trabajo de grado titulado “Expresión y purificación in vitro de la *Thermus aquaticus* DNA polimerasa”. Entre el 2009 y 2010 fue profesor catedrático en la Universidad de la Amazonia e instructor en el Centro Tecnológico de la Amazonía, SENA, en Florencia, Caquetá. En el 2014, recibió el título de Magíster en Ciencias Químicas con énfasis en Electroquímica de la Universidad Nacional de Colombia bajo la tutoría del profesor Marco Fidel Suarez-Herrera.

Durante la maestría obtuvo financiación por parte de la Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología, FPIT, del Banco de la República para el proyecto No 3059: “Estudio Electrocatalítico de la Reacción de Reducción de Oxígeno sobre Películas Ultradelgadas de Polianilina (PANI) Sintetizadas Vía Electroquímica sobre Electrodo de Carbón Vítreo, Platino y Oro modificados con Poli-(3,4-etilendioxi-tiofeno)(PEDOT)”. Gracias a este proyecto se publicó el artículo “Electrocatalysis of the hydroquinone/benzoquinone redox couple at platinum electrodes covered by a thin film of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)” en el 2013, en la revista holandesa *Synthetic Metals*. En la actualidad, es docente ocasional tiempo completo en la Universidad Militar Nueva Granada y catedrático en la Universidad Central.

CONTENIDO

- 11 Hidrógeno ($H_{2(g)}$)
- 14 Síntesis de amoníaco
- 14 Síntesis de metanol
- 15 Síntesis de hidrógeno por reformado
- 23 Referencias bibliográficas

El hidrógeno es una de las moléculas de mayor impacto en la industria química para la producción de amoníaco y metanol. De hecho, en un futuro muy cercano, sustituirá como combustible a otras especies químicas que encontramos en la gasolina (hidrocarburos C₅-C₉₀) y el gas natural (metano).



Hidrógeno

A principios de 1500, el alquimista Paracelso observó, por primera vez, que se desprendían burbujas inflamables de la reacción entre limaduras de hierro y ácido sulfúrico. Posteriormente, en 1671, Robert Boyle hizo la misma observación y, al igual que su predecesor, caracterizó dicho descubrimiento. Henry Cavendish, en 1766, recolectó las burbujas y mostró que eran diferentes de otros gases, lo que lo hizo merecedor del descubrimiento. Finalmente, fue Antoine Lavoisier quien dio el nombre de hidrógeno a dicho gas.

En 1931, en la Universidad de Columbia, en los Estados Unidos, se detectó la segunda forma de hidrógeno, con el doble de masa, al que llamaron Deuterio.

Hidrógeno ($H_{2(g)}$)

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo. Equivale al 75% del contenido detectable y, por *nucleosíntesis* (fusión atómica), dio origen a los demás elementos de la tabla periódica [1]. En nuestro planeta, su abundancia en la atmósfera terrestre, en forma de $H_{2(g)}$, es muy restringida, ya que no supera una parte por millón del volumen del aire. No obstante, es un elemento que se encuentra en grandes cantidades sobre la superficie terrestre en forma de agua (H_2O), la cual cubre tres cuartas partes del planeta.

La importancia del hidrógeno (H_2) radica en que es un gas bastante inflamable (Tabla 1), cuyo poder calorífico, a diferencia de otros combustibles (gas natural, gasolina, diesel, etc.), genera más del doble de la energía (reacción exotérmica) por efecto de la combustión [2].

TABLA 1. Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) para distintos tipos de combustibles.

Combustible	Estado a T_{amb} y P	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Hidrógeno	Gas	141.9	119.9
Metano	Gas	55.5	50
Etano	Gas	51.9	47.8
Gasolina	Líquido	47.5	44.5
Diesel	Líquido	44.8	42.5
Metanol	Líquido	20	18.1

Fuente: traducción a partir de [2].

En sus inicios, el hidrógeno se empleaba como sustituto del helio para el relleno de globos o Zeppelin, por su notable ligereza frente a los componentes del aire (21% en O_2 y 78% en N_2); sin embargo, su uso en este tipo de sistemas de transporte se dejó de lado en 1937, debido al accidente del Hindenburg (Imagen 1), en el que murieron aproximadamente 36 personas [3].



IMAGEN 1. Accidente del Zeppelin Hindenburg ocurrido el 6 de mayo de 1937. Fuente: [19].

En la actualidad, el hidrógeno es una de las moléculas más empleadas en el área de la petroquímica para la síntesis de formaldehído, metil-terbutil éter, ácido acético, metilmetacrilato, tereftalato de dimetilo y como extensor de la gasolina. Entre otros usos industriales, y a gran escala, también está la síntesis de amoníaco (E. 1), el cual sirve como precursor en la síntesis de muchos fertilizantes agrícolas a base de compuestos nitrogenados (i.e., nitrato de amonio, NH_4NO_3); y para la síntesis de ciclohexano y metanol (E. 2), como intermediarios en la producción de plásticos y productos farmacéuticos [4]. También se usa para la eliminación de azufre de los combustibles durante el refinamiento del petróleo y para la hidrogenación de aceites para la obtención de grasas saturadas como las margarinas. Solamente, para el caso particular del metanol, se tiene una producción anual que llega hasta unos 55 millones de toneladas, lo que correspondería a usar unos 10.3 millones de toneladas de hidrógeno (Imagen 2) [5].

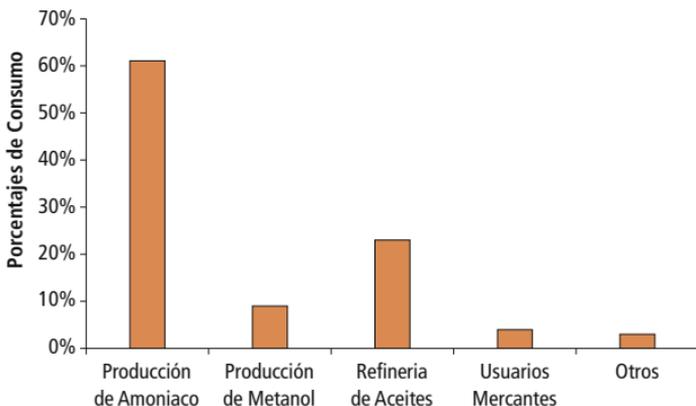
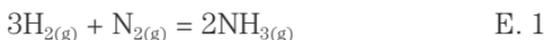


IMAGEN 2. Consumo global de hidrógeno. Fuente: [5].

Síntesis de amoníaco



Síntesis de metanol



El 96% de la síntesis de hidrógeno se hace por reformado de compuestos orgánicos como el gas natural, el nafta y el carbón (E. 3, E. 4 y E. 5). Solamente un 4% (Imagen 3) es sintetizado por la electrólisis del agua, ya sea acoplado a sistemas fotovoltaicos o a energía eólica. La complicación de los métodos de reformado radica en que generan grandes cantidades de CO_2 o de CO , lo cual contribuye con el calentamiento global; además, resulta costoso, ya que

depende de fuentes orgánicas como el gas natural y de otros combustibles fósiles.

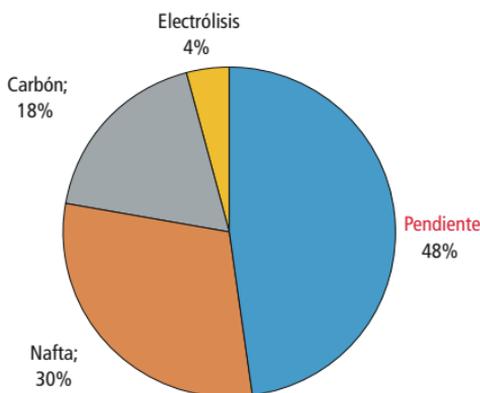


IMAGEN 3. Porcentajes de distribución para la síntesis de hidrógeno. El reformado es la principal técnica de síntesis para generar hidrógeno a partir de carbón, gas natural y de nafta. La electrólisis corresponde a la aplicación de corriente eléctrica para la reducción de hidrógeno [5].

Síntesis de hidrógeno por reformado



La gran demanda energética que existe en la actualidad busca sobretodo satisfacer o cumplir los *12 principios de la química verde* (Tabla 2) [6], por ello es que las técnicas de reformado no resultan tan satisfactorias para la generación

de hidrógeno y su posterior uso como combustible. Desde el punto de vista ecológico, la generación de CO₂, o de CO, no cumplen con el *principio 1*, el de *prevención*, ya que su acumulación en la atmósfera es en la actualidad responsable del calentamiento global; por ello, las nuevas técnicas que se desarrollen deben cumplir sobretodo este punto. Además, el *principio 6*, que habla sobre la eficiencia energética, no lo cumplen las técnicas del reformado, ya que se realizan siempre a temperaturas bastante elevadas (entre 500°C - 1000°C) y, sobretodo, el *principio 7*, debido a que se emplean combustibles fósiles que por definición equivalen a materia no económica y no renovable.

TABLA 2. Doce principios de la química verde y su breve explicación.

1. Prevención	Prevenir la generación de cualquier tipo de residuo es la mejor manera de garantizar la limpieza.
2. Economía atómica	Minimizar el uso de algunas especies químicas envueltas en la síntesis de un producto final.
3. Menos síntesis de productos químicos peligrosos	Menos tóxico significa tener un menor riesgo en el espacio de trabajo y para el medio ambiente.
4. Diseño de productos químicos más seguros	Para el diseño experimental deben elegirse reactivos con menor grado de toxicidad.
5. Solventes y auxiliares más seguros	Los solventes que resulten tóxicos deben ser reemplazados por otros que no lo sean tanto.
6. Energía eficiente	Métodos de síntesis cuyas condiciones de equilibrio sean cercanas a la temperatura ambiente y la presión atmosférica circundante.

7. Uso de materias primas renovables	Debe emplearse materia prima que sea renovable en vez de económica o susceptible de agotarse.
8. Reducir derivados	La síntesis de especies derivadas debe minimizarse en lo posible, ya que tales pasos extras requieren de más reactivos y generan más residuos.
9. Catálisis	El uso de catalizadores se utiliza para aumentar la eficiencia y el rendimiento de las reacciones.
10. Diseños para degradación	Al final de su vida útil, los productos deben degradarse con facilidad.
11. Análisis en tiempo real	Los procesos analíticos deben permitir el monitoreo y control de la formación de sustancias peligrosas.
12. Química inherentemente más segura	Toda sustancia utilizada en un proceso debe seleccionarse adecuadamente para minimizar los riesgos de accidentes, explosión e incendio

La electrolisis es el mejor método para la síntesis de hidrógeno (E. 6), básicamente, porque no genera CO₂ como en el reformado [5,7]. Por ello, las investigaciones de los últimos años presentan un alto incremento en la producción de material científico, así como del número de publicaciones en torno a la producción de hidrógeno (Imagen 4). Todo lo anterior, con el fin de disminuir el alto consumo de energía que implica de por sí la electrólisis (Imagen 5) frente a las otras técnicas de producción.



Particularmente, las nuevas técnicas de producción de hidrógeno abarcan estudios biológicos orientados hacia la fermentación y la biofotólisis; dichos ensayos se basan en

el empleo de metaloenzimas (hidrogenasas) sintetizadas por microorganismos que transforman la biomasa y la luz solar en hidrógeno. La ventaja de este tipo de enzimas es que se pueden inmovilizar sobre liposomas y emplearse para la producción de hidrógeno a escala industrial [8]. Por otro lado, la fermentación oscura se basa en la capacidad de un microorganismo de metabolizar un sustrato (i.e. glicerol, glucosa, biomasa e, incluso, frutas como el melón) y de convertirlo en hidrógeno y ácidos orgánicos, estos últimos capaces de inhibir el proceso [9-14].

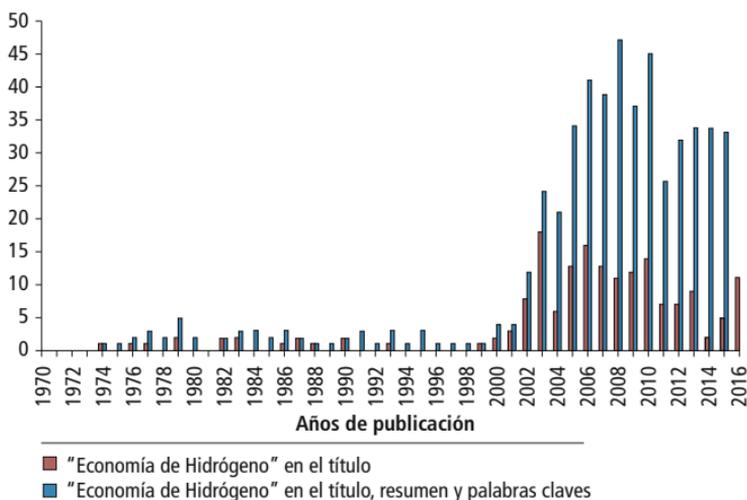


IMAGEN 4. Número de publicaciones que reportaron en el título, resumen y palabras clave "economía de hidrógeno". Fuente: [15].

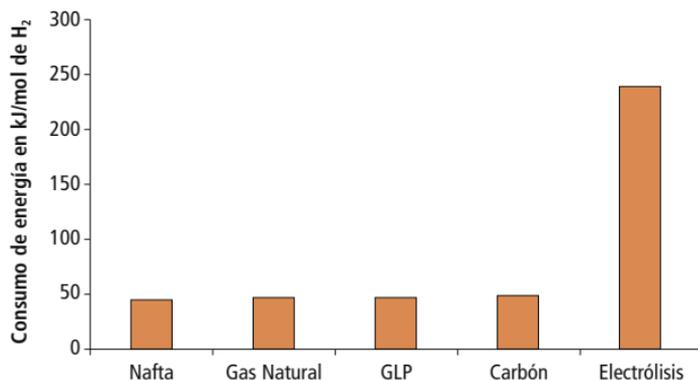


IMAGEN 5. Costo energético para la producción de hidrógeno basado en las distintas técnicas existentes.

Otras técnicas utilizadas para la producción de hidrógeno, libres de emisión de carbón, son la electrólisis, la ruptura térmica del agua (*splitting water*) y los procesos termoquímicos (termólisis, Imagen 6). La dificultad de los procesos térmicos radica en las temperaturas elevadas, de aproximadamente 850°C, temperatura que solo es alcanzada en reactores químicos [16-18].

Otros tipos de sistemas que se han acoplado a la electrólisis son la energía eólica y los paneles solares, los cuales a su vez son más populares en todo el mundo y ayudan a la reducción del uso de combustibles fósiles. La principal complicación de esta clase de sistemas radica en el costo final del hidrógeno obtenido, el cual sigue siendo muy superior al del proceso de reformado.

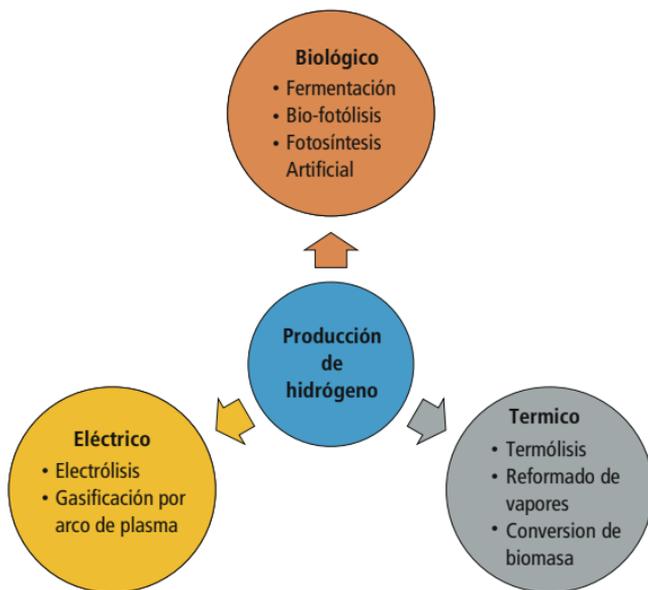


IMAGEN 6. Producción de hidrógeno según los métodos más empleados en la actualidad y según el área de investigación. Fuente: elaboración propia.

Por último, países como Japón [7] se han propuesto sustituir para el 2022 todos los combustibles fósiles por alternativas más amigables con el medio ambiente como lo es el hidrógeno, siempre y cuando no se sintetice por reformado, cuyo resultado final continuaría siendo el mismo que cualquier otro que genere CO_2 ; además, como se observa en la Tabla 3, el costo por daño ambiental para el uso de combustibles fósiles o fuentes no renovables es muy elevado, con un total de $1,216 \times 10^{12}$ \$ USD por año, sin contar con las consecuencias, que aún no son medibles.

TABLA 3. Consumo mundial de combustibles fósiles y su daño ambiental (2015-2016)

Uso de combustibles fósiles	(en 10¹⁸ J por año)
Carbón	112.5
Petróleo	208.6
Gas natural	126.6
Total	447.8
Daño ambiental	(en 10⁹ \$ USD)
Carbón	522.0
Petróleo	442.8
Gas natural	252.0
Total	1216.8

La economía de Colombia, en la actualidad, depende fuertemente de la producción de petróleo, gas natural y carbón, sin tener en cuenta el alto precio que pagará con sus recursos naturales. Por ello, deben tomarse nuevas decisiones, tanto en el ámbito económico como político, para desarrollar alternativas más saludables y amigables con el medio ambiente.

Referencias bibliográficas

- [1] J. Llorca, *Sobre el origen y distribución de los elementos en la enseñanza de la química*, Departamento de Química Inorgánica: Universitat de Barcelona.
- [2] S. Z. Baykara, “A Brief Overview on its Sources, Production and Environmental Impact”, *Intern. Journ. Hydrogen Energy*, vol. 43, pp. 10605-10614, 2018.
- [3] A. Bain, “A Review of Hindenburg: Exploring The Truth”, *Intern. Journ. Hydro. Energy*, vol. 40, p. 752, 5 Jan. 2015 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.10.113>
- [4] O. Bicakova and P. Straka, “Production of Hydrogen from Renewable Resources and its Effectiveness”, *Intern. Journ. Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 11563-11578, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.047>
- [5] S. Banerjee, Md. Nor. Musa, Abu Bakar Jaafar, “Economic Assessment and Prospect of Hydrogen Generated by OTEC as Future Fuel”, *Intern. Journ. Hydro. E.*, vol 42, pp. 26-37, 5 Jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.115>

- [6] D. Celik, M. Yildız, “Investigation of Hydrogen Production Methods in Accordance with Green Chemistry Principles”. *Intern. Journ. Hydrog. E.*, vol. 42, pp. 23395-23401, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.104>
- [7] K. Itaoka, A. Saito and K. Sasaki, “Public Perception on Hydrogen Infrastructure in Japan: Influence of Rollout of Commercial Fuel Cell Vehicles”, *Intern. Journ. Hydrog. E.*, vol. 42, n° 11, , pp. 7290-7296, 16 Mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.123>
- [8] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, “A Comparative Overview of Hydrogen Production Processes”. *Renew. Sust. E. Rev.*, vol. 67, pp. 597-611, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- [9] Xuekui Wang, Na Tang, Yue Guan, Huifang Sun, Jinling Cai , “Hydrogen production from shrimp mariculture waste based on sludge pretreatment by heating”, *Intern. Journ. Hydro. E.*, vol. 43, pp. 9591-9598, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.061>
- [10] T. Chookaew, S. O-Thong and P. Prasertsan, “Biohydrogen Production from Crude Glycerol by Two Stage of Dark and Photo Fermentation”. *Intern. Journ. Hydro. E.*, vol. 40, pp. 7433-7438, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.133>
- [11] R. Łukajtis, I. Hołowacz and K. Kucharska, “Hydrogen Production from Biomass Using Dark Fermentation”, *Renew. Sust. E. Rev.*, vol. 91, pp. 665-694, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.043>

- [12] S. Turhal and M. Turanbaev, "Hydrogen Production from Melon and Watermelon Mixture by Dark Fermentation", *Intern. Journ. Hydro. E.*, vol. 44, n° 34, pp. 18811-18817, 12 Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.011>
- [13] Kuan-Yeow Show, Yuegen Yan, Ming Ling, "Hydrogen Production from Algal Biomass - Advances, Challenges and Prospects", *Bio. Tech.*, vol. 257, pp. 290-300, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.105>
- [14] S. E. Baker and R. C. Hopkins, "Hydrogen Production by a Hyperthermophilic Membrane-Bound Hydrogenase in Water-Soluble Nanolipoprotein Particles", *J. Am. Chem.*, vol. 131, pp. 7508-7509, 2009. <https://doi.org/10.1021/ja809251f>
- [15] K. Alanne and S. Cao, "Zero-energy Hydrogen Economy (ZEH2E) for Buildings and Communities Including Personal Mobility", *Renew. Sust. E. Rev.*, vol. 71, pp. 697-711. May. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.098>
- [16] G.L. Khorasanov and V.V. Kolesov, "Concerning Hydrogen Production Based on Nuclear Technologies". *Nuc. E. Tech.*, vol. 1, pp. 126-129, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2016.01.004>
- [17] H. Park, D. Vecitis, and M. Hoffmann, "Solar-Powered Electrochemical Oxidation of Organic Compounds Coupled with the Cathodic Production of Molecular Hydrogen", *J. Phys. Chem.*, vol. 112, pp. 7616-7626, 2008. <https://doi.org/10.1021/jp802807e>

- [18] H. Zou, S. Chen and Z. Zhao, “Hydrogen Production by Hydrolysis of Aluminum”. *Journ. All. Comp.*, vol. 578, pp. 380-384, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.06.016>
- [19] *R. Chang. Chemistry*, 10a Edición. Nueva York McGraw Hill 2010, p. 232.