



Innovation in research and engineering education:  
key factors for global competitiveness

Innovación en investigación y educación en ingeniería:  
factores claves para la competitividad global

# ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA ECONOMIA DEL HIDRÓGENO EN COLOMBIA

**Alejandro Martínez, Diana Barreneche, Daniela Bellon, Diana Plata, Diana Latorre, Alex Porras, Luis Rincón**

**Universidad de Santander  
Bucaramanga, Colombia**

## Resumen

El hidrógeno apunta como un vector de solución y desarrollo a mediano plazo en el sector energético mundial, este es llamado a ser el sucesor de los combustibles fósiles permitiendo que los países puedan tener acceso a ella redistribuyendo las riquezas con otra gran ventaja que es el de ser amigo del medio ambiente. Una de las principales aplicaciones es que puede alimentar las células o pilas a combustible que son el corazón de los nuevos vehículos que se mueven con electricidad lo cual generaría un impacto ambiental positivo. Lo anterior es sustentado por las grandes inversiones de los Estados Unidos y la Unión Europea de aproximadamente 3000 millones de dólares para su estudio e implementación. Los países en vía de desarrollo no cuentan con políticas claras que apoyen este tipo investigación y es en esta vía que debemos trabajar unidos en la innovación de esta nueva fuente de energía. En este trabajo se muestra un estudio inicial de factibilidad de la implementación de la economía del hidrógeno en Colombia.

**Palabras clave:** hidrógeno; medio ambiente; pilas a combustible

## Abstract

*Hydrogen points as a solution vector and medium-term development in the global energy sector, this is destined to be the successor of fossil fuels allowing countries can access it by redistributing the wealth with another great advantage is to be environmentally friendly. One of the main applications is that can fuel cells or fuel cells that are the heart of the new vehicles that move electricity which would generate a positive environmental impact. This is supported by large investments in the United States and the European Union about 3000 million dollars for their study and implementation. The developing countries do not have clear policies that support such research and are in this way that we work together on innovation of this new energy source. This paper is an initial feasibility study of the implementation of the hydrogen economy in Colombia.*

**Keywords:** *hydrogen; environment; fuel cells*

## 1. Introducción

La demanda energética mundial se ve cubierta en más del 87% por combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural. Desde el punto de vista ambiental el uso de combustibles fósiles constituye el principal causante de la emisión de gases responsables del calentamiento global, sumado a la contaminación del aire en las principales ciudades que está ocasionando graves problemas respiratorios (A.K. Akella *et al*, 2009) . Esta situación no es sostenible a mediano plazo por lo tanto se tiene la necesidad de encontrar diferentes formas de producción y consumo energético que sea limpio, seguro y fiable.

Una de las respuestas para esta crisis es la implementación del hidrógeno como una fuente de energía. Esto se enmarca en “la economía del hidrógeno” término usado actualmente para referirse al modelo económico alternativo al uso de los combustibles fósiles principalmente para ser utilizado en los medios de transporte. Este elemento como vector energético revolucionará nuestro futuro inmediato (Andrews. J *et al*, 2012).

La principal ventaja que posee el hidrógeno es que es el elemento más abundante en la tierra, se encuentra tanto en el agua como en los combustibles fósiles, está presente en el universo, y su combustión no produce emisiones nocivas de dióxido de carbono como el petróleo. El principal problema es que muy raras veces se halla en estado libre, con lo cual resulta clave desarrollar la manera de explotarlo efectivamente.

Esta nueva forma de generación de energía limpia y económica reducirá la dependencia de la sociedad a los combustibles fósiles ya que el hidrógeno podría ser generado a partir de otras fuentes primarias como las renovables o la nuclear. La implementación de la economía del hidrógeno no es inmediata aunque ya se están realizando importantes avances tecnológicos aun así se requieren dar respuestas a importantes retos tecnológicos, económicos y sociales.

Se debe trabajar para solucionar varios aspectos importantes el primero es el de la producción del hidrógeno, hay que considerar que los métodos actuales resultan costosos y se basan principalmente en la gasificación de combustibles fósiles a altas presiones y temperaturas y es en esta vía en la que se está avanzando en el uso de fuentes renovables para su producción como solar, eólica, biomasa.

El otro aspecto es el almacenamiento del hidrógeno actualmente son usados tanques presurizados para almacenarlo en forma gaseosa, tanques a temperaturas criogénicas para almacenarlo en forma líquida y los hidruros metálicos para almacenarlo en el estado sólido, todos se encuentran desarrollados y en constante progreso, sin embargo, se debe buscar el que ofrezca mayor costo-beneficio enmarcado dentro de la sostenibilidad ambiental. (Zuttel, 2007).

Actualmente países como España, Estados Unidos, Alemania Japón y otros países interesados en el uso de hidrógeno como fuente energética; han hecho un gran avance en el desarrollo de ésta nueva forma de energía con numerosos automóviles movidos con pilas de hidrógeno o células a combustible que circulan por carreteras europeas gracias a las ayudas y subvenciones de la Unión Europea. Igualmente existe en Alemania, Japón entre otros países, estaciones de servicio, “hidrogenas”, que suministran hidrógeno, gas a presión e hidrógeno líquido (Comisión Europea, 2003).

La economía del hidrógeno facilitará una enorme redistribución del poder, con consecuencias trascendentales para la sociedad porque que acabaría con la especulación de los precios del crudo ya que todos los países podrán tener acceso a ella. El hidrógeno tiene el potencial de poner fin a la dependencia que el mundo tiene del petróleo y el poder reducir de una forma drástica las emisiones de dióxido de carbono además reduciría los efectos del calentamiento global, y dado que este elemento es tan abundante y se encuentran en todas las partes del mundo, todos los seres humanos podrían disponer de este tipo de energía.

En este trabajo se hace un análisis tecnológico, económico y social para la implementación de la economía del hidrógeno en Colombia

## 2. Características y producción

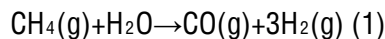
El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, en nuestro planeta no se encuentra solo sino ligado a otros elementos formando por ejemplo agua, petróleo, gas natural. Una de las principales características es que posee la más alta energía por unidad de peso comparativamente con cualquier combustible ya que es liviano al no tener los pesados átomos de carbono. Por ejemplo durante una reacción de hidrógeno se libera una energía que es 2.5 veces mayor que la del poder de combustión de los hidrocarburos (ver Tabla 1)

Tabla 1. Poder calorífico de diferentes combustibles

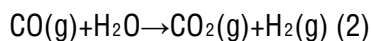
Combustible	Valor del poder calorífico Superior (a 25°C, 1atm)	Valor del poder calorífico Inferior (a 25°C, 1atm)
Hidrógeno	141.86 KJ/g	119.93 KJ/g
Metano	55.53 KJ/g	50.02 KJ/g
Propano	50.36 KJ/g	45.6 KJ/g
Gasolina	47.5 KJ/g	44.5 KJ/g
Gasóleo	44.8 KJ/g	42.5 KJ/g
Metanol	19.96 KJ/g	18.05 KJ/g

El hidrógeno es el ideal para alimentar las pilas o células a combustible, sin embargo, existe a nivel mundial poca infraestructura para su producción, esta proviene principalmente de fuentes de energía primaria.

La primera forma más usada actualmente por la industria es el vapor reformado o gas natural, básicamente se expone el gas natural (metano) u otros hidrocarburos a altas temperaturas:



El paso siguiente es convertir el monóxido de carbono con vapor para producir hidrógeno más dióxido de carbono lo que resulta en un aumento en la producción del mismo en el proceso:



En este proceso se aprovecha casi un 90% de hidrógeno, las desventajas es que producirlo es muy costoso por unidad energética, se usan fuentes de energía no renovables y se libera dióxido de carbono al medio ambiente.

El otro método usado es la electrolisis del agua la cual se basa en usar la electricidad para separar el hidrógeno y el oxígeno obteniéndose un rendimiento global del 95%



El principal problema es que se necesita grandes cantidades de energía para producirlo, sin embargo, las fuentes de energía alternativas o renovables podrán ser los principales protagonistas para ser usadas en este proceso de producción. Existen otros métodos prometedores como algunos microbios fotosintéticos que producen  $\text{H}_2$ , algunas algas que sobre condiciones especiales producen  $\text{H}_2$  (dos Santos *et al*, 2005).

En el caso Colombiano el Gobierno lanzó una ambiciosa política llamada Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales (PROURE, 2010), del Ministerio de Minas y energía cuyo principal objetivo es crear mecanismos de mayor impacto e importancia que permite asegurar el abastecimiento energético, la competitividad de la economía nacional, la protección del consumidor, la protección del medio ambiente y la promoción de las fuentes energéticas no convencionales como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional de acuerdo con lo establecido en la ley.

Se espera que con la participación del sector público, privado, universidades y centros de investigaciones lograr para el 2020 disminución de los impactos ambientales, el mejoramiento de la calidad de vida y el acceso a fuentes limpias y renovables para todos los ciudadanos, como ejemplo de estas políticas está el proyecto por el Sistema Nacional de Regalías el cual otorgó por \$81.000 millones para su implementación y uso en los departamentos de Vichada, Casanare, Caquetá así como una convocatoria por Colciencias para la implementación de la energía solar en la Guajira por un valor de \$1.900 millones en el 2013.

Colombia es un país privilegiado por la posición geográfica en diferentes tipos de explotación de energías alternativas y es así como estas podrían servir en un futuro no muy lejano en la producción de hidrógeno económico y principalmente no contaminante en su proceso.

### 3. Almacenamiento

Uno de los principales problemas para usar el hidrógeno en aplicaciones móviles es su forma de almacenamiento ya que este es el principal alimentador de las pilas a combustibles. Una de las formas desarrolladas y comercialmente disponibles son los tanques presurizados. Son cilindros livianos hechos de aluminio o acero reforzado con materiales compuestos que pueden resistir presiones de hasta 70 MPa alcanzando densidades volumétricas de aproximadamente  $36 \text{ Kg.m}^3$ .

Las principales desventajas radican primero en la baja densidad de energía volumétrica que no alcanza las expectativas propuestas por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) estos objetivos son presentados en la tabla 2 y con expectativas para alcanzar en el 2015.

Tabla 2. Objetivos propuestos por el DOE dos EUA. Cálculos hechos con base en 5 kg de H<sub>2</sub>

	2010	2015
<b>Sistema gravimétrico</b>	2.0 kWh/kg \ (72 MJ/kg)	3.0 kWh/kg \ (10,8 MJ/kg)
<b>Capacidad</b>	6 % en peso	9 % en peso
<b>Energía específica</b>	0.60 kg. H <sub>2</sub> /kg (sistema)	0.90 kg. H <sub>2</sub> /kg (sistema)
<b>Peso total</b>	83 kg. H <sub>2</sub>	55.6 kg. H <sub>2</sub>
<b>Sistema volumétrico</b>	1.5kWh/l (5,4 MJ/l)	2.7kWh/l (9,7 MJ/l)
<b>Capacidad</b>	0.045 kg.H <sub>2</sub> /l	0.081 kg.H <sub>2</sub> /l
<b>Costo del sistema</b>	\$4/kWh=\$133/kg.H <sub>2</sub>	\$2/kWh=\$67/kg.H <sub>2</sub>
<b>Costo total</b>	\$665	\$335
<b>Tasa de recarga</b>	1.5 kg.H <sub>2</sub> /min	2.0 kg.H <sub>2</sub> /min
<b>Tempo total</b>	3.3 min	2.5 min

El otro problema es la seguridad ya que el hidrógeno puede permear a través de las paredes del tanque lo que origina fallas en la estructura, debido a la fragilización que ocurre por largas exposiciones al hidrógeno lo que reduce la ductilidad generando grietas y eventualmente un accidente de grandes proporciones.

Otra forma de almacenarlo es en el estado líquido el cual se consigue disminuyendo la temperatura hasta -253 C este proceso se denomina criogenia, rama de la físico-química que estudia tecnologías para la producción de temperaturas muy bajas.

De esta forma el hidrógeno es almacenado en tanques tipo Dewars que usa una capa de vacío para aislarlo del exterior, estos tanques son hechos en general de aluminio con diferentes metales de adición (Si, Fe, Mg, Mn, Cr, Zn, Ti) la ventaja radica en que su densidad de energía es mayor que la del hidrógeno comprimido del orden de los 70 Kg.m<sup>3</sup>, además que usa presiones menores entre 0.1 MPa a 0.35 MPa para liquefacerlo lo que permite la utilización de materiales livianos (Bououdina *et al*, 2000).

La principal desventaja es que se necesita mucha energía para este proceso además de las perdidas por evaporación es decir parte del hidrógeno líquido se reduce en el intercambio de calor y se convierte en gaseoso y puede escaparse por permeación llevando a un consumo total del hidrógeno sin ningún tipo de funcionamiento del motor (Ahluwalia *et al*, 2008).

El hecho de que muchos metales y aleaciones reaccionan con el hidrógeno produciendo hidruros hace con que sea posible usar este medio almacenador como candidato en aplicaciones móviles y estacionarias entre las cuales se destacan los hidruros metálicos, alanatos y aminoboranos.

A corto plazo será necesario que esta tecnología sea eficiente y económicamente viable y los esfuerzos en este sentido se centran en materiales que absorban hidrógeno pues en la práctica su densidad volumétrica es mayor que la del hidrógeno líquido. Uno de los hidruros metálicos promisorios es el hidruro de magnesio MgH<sub>2</sub> que presenta una alta densidad de energía 9 MJ/kg de Mg además de su bajo costo y abundancia (Martínez *et al*, 2012).

La ventaja radica es que los hidruros metálicos son completamente seguros presentando una alta densidad de energía el principal problema son las altas temperaturas para absorción y desorción de hidrógeno así como su lenta cinética en la reacción.

En cuanto a las investigaciones en estos sistemas es muy poco lo que se hace, se conocen trabajos de pregrado y maestrías en la UIS y la Universidad Nacional sin embargo el apoyo por los actores

gubernamentales es irrelevante como para iniciar un trabajo a gran escala, contradictoriamente se cuenta con el recurso humano altamente capacitado para emprender esta tarea.

#### **4. Presente y Futuro**

Actualmente en Colombia dos empresas extranjeras una de origen español Ecowill Engineering Group y la francesa Mcphy energy se radicaron en Bogotá, cuentan con diferentes patentes en los procesos de extracción y almacenamiento de hidrógeno con fines energéticos.

Estas empresas afirman lo siguiente “La tecnología McPhy se está desarrollando en Europa con filiales en Alemania e Italia. Nuestro deseo de implementación en Colombia con la colaboración de Ecowill Engineering Group responde a nuestros objetivos de expansión por América del Sur. Colombia va a jugar un papel fundamental en la construcción de una futura economía del hidrógeno en esta zona. Colombia constituye para McPhy un mercado con un alto potencial de desarrollo de las energías renovables” (DIC).

Estas empresas afirman que uniendo la experiencia que cuenta la empresa española en producción de energía con fuentes renovables como solar, eólica y plantas de biodiesel unida con la experiencia de la compañía francesa de crear y almacenar energía para difundirla por Centroamérica y sur América.

La tecnología creada en el laboratorio del CNRS en Grenoble Francia almacena la energía en forma de hidrógeno sólido por medio de hidruros de magnesio y se convierte en electricidad por medio de una pila de combustible o de una turbina de gas que funciona con hidrógeno.

Desde ese punto de vista el gran reto es dar a conocer y demostrar que este tipo de opción energética es viable en un futuro no muy lejano. Solo necesitamos voluntad política para que se destinen los recursos económicos porque el capital humano en cada una de nuestras universidades existe, además la zona geográfica en la que se encuentra favorecida Colombia la hace privilegiada para que desde nuestro país sea un foco de desarrollo así como un exportador de energía verde sin contar con la excelente opción de la creación de nuevas empresas en este sector.

#### **5. Conclusiones**

Los combustibles fósiles son cada día más escasos y representan un gran impacto ambiental, por tanto es necesaria una nueva visión para enfrentar estos problemas. Una solución planteada es cambiar poco a poco esa base energética actual, utilizando fuentes de energía que sea mucho más amigable con el ambiente y que esté al alcance de todos. En este sentido se busca que el hidrógeno como vector energético sea la base de una economía limpia y sostenible.

Se pudo obtener una visión clara acerca del hidrógeno; sus posibles formas de obtención, de almacenamiento, y su enorme potencial a ser sucesor de éstos combustibles. En este contexto, existe una gran factibilidad al desarrollar la tecnología del hidrógeno como una solución alterna a los combustibles fósiles.

La utilización de la economía del hidrógeno y sus aplicaciones, que en un futuro pueden llegar a ser muy útiles para el desarrollo energético mundial, se sustentara directamente de las fuentes renovables de energía

como solar, eólica, biomasa y geotérmica, esta sinergia permitirá suplir el consumo de energía a poblaciones que hoy en día carecen de este servicio debido a su interconectividad de la red nacional eléctrica.

## Referencias

- Martínez, D. S. dos Santos (2012). Influence of the substitution of V by Nb in the structure and properties of hydrogen absorption/desorption of  $TiCr_{1.1}V_{0.9}$  alloy. *Journal of Alloy and Compounds*, Vol 536S, pp. S231-S235.
- A.K. Akella, R.P. Saini, M.P. Sharma. (2009). Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 390–396
- Andreas Zuttel. (2007). Hydrogen storage and distribution system. *Mitig Adapt Strat Glob Change*, Vol 12, pp. 343-365.
- Andrews, J. and Shabani, B. (2012). Re-envisioning the Role of Hydrogen in a Sustainable Energy Economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 37, pp. 1184-1203.
- Bououdina M, Soubeyroux JL, Rango P De, Fruchart D (2000). Phase stability and neutron diffraction studies of the Laves phase compounds  $Zr(Cr_{1-x}Mo_x)_2$  with  $0.0 < x < 0.5$  and their hydrides. *International Journal of Hydrogen Energy*, V 25, pp.1059-1068.
- Comisión Europea (2003) Hydrogen energy and fuel cells. A vision of our future. Informe EUR 20719 EN, European Commission, Directorate-General for Research, Directorate J – Energy, Bruselas. Consultado el 1 de Mayo de 2012 en [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hydrogen-report\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hydrogen-report_en.pdf)
- Directorio Industrial y Comercial. Información Profesional Especializada. Bogotá. Legis. S. A Consultado el 25 de Abril de 2012 en <http://www.dic.com.co/Llega-la-era-del-Hidrógeno.asp>
- DOE (2004) DOE Hydrogen Program; FY 2004 Annual Progress Report. U.S. Department of Energy; Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program, Washington. Consultado el 25 de Abril de 2012 en [http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_progress04.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress04.html).
- Fernando Miguel Soares Mamede dos Santos (2005). Combustível “Hidrogenio”. *Revista Millenium*, Vol 31, pp. 252-270.
- Proure, Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales (2010), informe final. Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia. Bogotá, Colombia. Consultado el 28 de Abril de 2012 en <http://www.si3ea.gov.co/Portals/2/plan.pdf>.
- R.K. Ahluwalia, and J.K. Peng (2008). Dynamics of cryogenic hydrogen storage in insulated pressure vessels for automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, V 3, pp 4622-4633.

## Sobre los autores

- **Alejandro Martínez:** Licenciado en Física y Matemáticas (UPTC), Máster en Física (UIS), Doctor en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales (UFRJ). Docente Tiempo Completo Universidad de Santander. [alejandrodavidm@yahoo.com](mailto:alejandrodavidm@yahoo.com)
- **Diana Barreneche:** Administradora de Empresas (UNAB). Magister en Administración de Empresas (USTA). Docente Tiempo Completo Universidad de Santander.
- **Daniela Bellon:** Estudiante de ingeniería Industrial (UDES). Semillero “Grupo de investigaciones en Desarrollo Sostenible energético. (GIDSE).”

- **Diana Plata:** Estudiante de ingeniería Industrial (UDES). Semillero “Grupo de investigaciones en Desarrollo Sostenible energético. (GIDSE).”
- **Diana Latorre:** Estudiante de ingeniera Industrial (UDES). Semillero “Grupo de investigaciones en Desarrollo Sostenible Energético. (GIDSE).”
- **Alex Porras:** Estudiante de ingeniería Industrial (UDES). Semillero “Grupo de investigaciones en Desarrollo Sostenible Energético. (GIDSE).”
- **Luis Rincón:** Estudiante de ingeniería Industrial (UDES). Semillero “Grupo de investigaciones en Desarrollo Sostenible Energético. (GIDSE).”

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería y de la International Federation of Engineering Education Societies

Copyright © 2013 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI), International Federation of Engineering Education Societies (IFEES)