

## El desarrollo del Sistema Energético Solar-Hidrógeno en América Latina: Potencialidades, oportunidades y barreras

*Fausto R. Posso<sup>1,2</sup>, Johanna P. Sánchez<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Investigador Prometeo, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias, Universidad de Los Andes, Núcleo-Táchira, Av. La ULA, Sede Paramillo, Venezuela.

<sup>3</sup> Centro de Energía, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: fausto@ula.ve & fausto.posso@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 8 de abril 2014 - Fecha de aceptación: 13 de mayo 2014

### RESUMEN

El Sistema Energético Solar-Hidrógeno (SESH) constituye un sistema energético cuya fuente primaria es la energía solar, directa o indirecta, y la secundaria el hidrógeno. Actualmente, se considera como la mejor opción para complementar en el mediano y sustituir en el largo plazo, al actual sistema energético basado en fuentes fósiles. En este contexto se desenvuelve este trabajo, cuyo objetivo es identificar y analizar los factores intervinientes en el desarrollo del SESH en el ámbito latinoamericano, mediante una investigación documental basada en una amplia revisión bibliográfica. Se obtiene que la mayoría de países latinoamericanos disponen de ingentes potenciales aprovechables de energías renovables que harían posible y atractiva económicamente la implantación del SESH; que la hidrogenaria y biomasa son las fuentes más adecuadas como base para esta implantación, tanto por su potencial como por su presencia en la matriz energética y costos del SESH. Los estudios indican que la energización rural y el transporte urbano constituyen nichos de oportunidad para la penetración del SESH. También se reportan barreras: acciones de investigación escasas y concentradas en pocos países, un exiguo talento humano formado y capacitado para operar y desarrollar esta tecnología, como resultado de una débil oferta formativa; y la carencia de un marco legal e institucional que incentive el desarrollo de este sistema. Se concluye que sólo con la acción concertada de centros de investigación, universidades y la empresa privada, bajo la tutela del estado, se logrará que este elemento químico singular conduzca el desarrollo humano de la región por caminos sustentables.

Palabras clave: Sistemas energéticos, energía del hidrógeno, energías renovables, vectores energéticos.

### ABSTRACT

Solar-Hydrogen Energy Systems (SHES) are systems whose primary energy source is solar energy, directly or indirectly, and the secondary is hydrogen. Those systems are currently considered as the best option to complement and replace mid-term the energy systems based on fossil fuels. The main objective of the work presented herein is the identification and analysis of the factors involved in the development of SHES in Latin America. The study is a documentary research based on an extensive review of literature. Latin American countries possess an enormous potential of exploitable renewable energy; among them hydropower and biomass are often seen as the most suitable contributors to the energy mix, however SHES might evolve with time to an economic attractive alternative. Studies indicate that rural electrification and urban transport are niche opportunities that will enhance the development of SHES. The barriers hindering in Latin America the development and application of hydrogen energy are discussed: among them Latin American countries invest little in hydrogen energy research, and the few research is concentrated in a limited number of countries; the availability of poor trained and skilled human talent to further develop, adopt and operate this technology, with the

consequence of an overall weak formative offer; a non competitive cost structure with respect to the fossil fuel based energy systems; and the lack of an institutional framework that encourages the development of this system. It is concluded that only the concerted action of research centers, universities and the private sector, guided by the government, will make it possible that this unique chemical element via sustainable applications shall contribute to the human development in Latin America.

Keywords: Energy systems, hydrogen energy, renewable energy, energy carriers.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad no existen dudas en considerar al actual sistema energético, de alcance mundial, basado en el uso intensivo de las fuentes fósiles de energía como inconveniente e incapaz de motorizar el desarrollo sustentable de la sociedad humana. La certeza del agotamiento en el mediano plazo de tales fuentes; los grandes desequilibrios ambientales, en todos los ámbitos y formas, derivados de un consumo desmedido; y los conflictos geopolíticos causados por su desigual distribución geográfica, que atentan contra la seguridad energética de los países, constituyen claras desventajas de este sistema energético. En este escenario han resurgido las energías renovables (ER), contribuyendo ya con el 19% de la generación mundial de energía para el año 2012, (REN21, 2013). Sin embargo, las ER tienen varias limitaciones: la intermitencia y disponibilidad en su captación; la distancia entre producción y consumo; las dificultades de su almacenamiento y la imposibilidad de utilizarse directamente en el transporte automotor. Todas ellas constituyen barreras que deben superarse para lograr que las ER tengan una mayor participación en la matriz energética mundial y regional. Al respecto, el Hidrógeno,  $H_2$  en adelante, en tanto vector energético o fuente secundaria de energía, está siendo considerado, cada vez con mayor frecuencia, como un mecanismo idóneo para superar en gran parte tales limitaciones (Barbir, 2009). Así, el Sistema Energético Solar-Hidrógeno (SESH), ha despertado el interés de investigadores, centros de I&D y los propios Estados, al visualizarlo como una vía adecuada hacia el desarrollo sustentable; en consecuencia, en una amplia cantidad de países, diseminados en diversas regiones del mundo, se están llevando adelante ambiciosos programas de I&D del SESH con vista a su utilización masiva en un plazo no mayor a 30 años (Bockris, 2013).

En este sentido, la existencia de grandes potenciales de ER en América Latina (AL), condición *sine qua non* para la presencia del SESH, propicia y hace atractivo estudiar la posibilidad del desarrollo del SESH en la región con vista a la satisfacción de las necesidades energéticas en diferentes sectores de la economía, como el sector rural, cuya carencia de servicios energéticos no ha sido totalmente satisfecha por la vía tradicional de la extensión de la red eléctrica, ni probablemente lo sea; y también como un mecanismo de mitigación de la contaminación ambiental asociada con el uso intensivo de combustibles fósiles, como sucede en el sector del transporte urbano masivo. En este contexto, se inscribe este trabajo, cuyo principal propósito es precisar y analizar los factores desencadenantes o inhibidores del avance del SESH en la región latinoamericana. Se pretende contribuir a la conformación de una base de conocimiento lo más actualizada posible que estimule y respalde la realización de estudios más detallados para casos particulares o aplicaciones específicas.

## 2. LA METODOLOGÍA

El estudio de los factores que propician o desestimulan el avance del SESH en la región latinoamericana se aborda desde diferentes perspectivas: los potenciales aprovechables de las ER; la investigación científica y desarrollo tecnológico; los costos asociados con su eventual implantación; las políticas públicas y el marco legal; y las acciones de formación, divulgación y promoción del  $H_2$  como vector energético y el SESH como sistema. Por tanto, la investigación es de tipo documental y procede mediante una indagatoria en varias fuentes de información: artículos publicados en revistas científicas especializadas, memorias de eventos científicos, documentos oficiales y páginas web de

organizaciones relacionadas con las ER y el H<sub>2</sub>. Como resultado de ello, se obtiene la información primaria, de cuya clasificación, interpretación y análisis se deriva un conocimiento de las acciones y omisiones sobre el uso del H<sub>2</sub> como vector en la región latinoamericana. Es importante aclarar que no se pretende presentar el estado del arte de la investigación científica y tecnológica sobre la energía del H<sub>2</sub> en AL, lo cual está fuera del alcance de este trabajo, sino analizar las condiciones y situaciones que favorecerían o no la participación del SESH en el concierto energético regional. Y finalmente, como un objetivo complementario, presentar los rasgos distintivos de este sistema energético con el fin de proporcionar el marco conceptual en el cual se lleva a cabo el estudio.

### 3. EL SISTEMA ENERGÉTICO SOLAR HIDRÓGENO

Conceptualmente, el SESH es un sistema energético cuya fuente primaria es la energía solar, directa o indirecta, y el H<sub>2</sub> es la principal fuente secundaria o vector de energía. Estructuralmente, el SESH comporta los mismos componentes de todo sistema energético: transformación, almacenamiento, transporte, distribución y usos finales. Entre sus características distintivas están: eficiencia superior a la de los sistemas energéticos tradicionales, al basarse en formas diferentes de conversión de energía; compatibilidad ambiental, al generar bajas emisiones de contaminantes en su funcionamiento; y autosuficiencia, al conformar un sistema cerrado en su operación, lo cual le permite ser especialmente apropiado para el suministro fiable a emplazamientos aislados, tales como: poblados rurales, estaciones de telecomunicación, puestos fronterizos aislados o islas (Veziroglu y col., 2008). Finalmente, sus tecnologías de uso final permiten satisfacer las necesidades energéticas más comunes de toda sociedad: electricidad, movilidad, calor, acondicionamiento ambiental e iluminación. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los componentes del SESH.

La etapa de *transformación* tiene como propósito convertir la energía disponible en la fuente primaria en energía química contenida en el H<sub>2</sub>, de ahí que el H<sub>2</sub> se incluya en la categoría de vectores energéticos, como la electricidad o gasolina (Winter, 2009). Los métodos de obtención del H<sub>2</sub> se clasifican, por lo general, según el tipo de fuente primaria que da origen al proceso de transformación; así, se distinguen los métodos basados en fuentes fósiles y los basados en fuentes renovables. En este estudio, el énfasis está en los segundos, y las características de varios de ellos se presentan en la Tabla 1, elaborada a partir de la información de Holladay y col. (2009).

**Tabla 1.** Tecnologías de producción de H<sub>2</sub> a partir de ciertas ER.

Tecnología	Materia Prima	Eficiencia (%)	Desarrollo tecnológico
Gasificación	Biomasa	35-50	Comercial
Fotólisis	Luz + agua	0,5	Largo plazo
Fermentación oscura	Biomasa + luz	0,1	Largo plazo
Foto fermentación	Biomasa + luz	0,1	Largo plazo
Electrólisis microbiana	Biomasa + electricidad	78	Largo plazo
Electrólisis alcalina	Agua + electricidad	50-60	Comercial
Electrólisis PEM	Agua + electricidad	55-70	Corto plazo
Electrólisis oxido sólido	Agua + electricidad + calor	40-60	Mediano plazo
Rompimiento termoquímico	Agua + calor	nd	Largo plazo
Rompimiento foto electroquímico	Agua + luz	12	Largo plazo

En la electrólisis, las ER generan la electricidad requerida por aquella; de ésta manera, la electricidad puede tener origen solar directo e indirecto, en el primero se incluye la solar fotovoltaica, mientras que en el segundo caso, están la energía eólica, hidro-energía, solar de concentración e incluso la biomasa. De todas estas opciones, la producción de H<sub>2</sub> por electrólisis, con la electricidad a partir de hidroelectricidad, es una tecnología madura, muy poco contaminante, siendo el proceso

utilizado en la industria química desde al menos noventa años, (Wang y *col.*, 2014). La energía solar de concentración también puede proporcionar la energía térmica para los procesos de escisión de la molécula de agua. Por su parte, la gasificación de biomasa es una tecnología madura y comercialmente disponible, mientras que las otras tecnologías de producción biológica de H<sub>2</sub> se encuentran aún en la etapa de laboratorio.

Una vez producido el H<sub>2</sub>, debe ser almacenado para garantizar su abastecimiento *in situ* para aplicaciones estacionarias, o para su posterior transporte y distribución. Los métodos de *almacenamiento* se clasifican según el estado físico del H<sub>2</sub>, el uso final del mismo y los volúmenes a acumular, mostrando varios de ellos en la Tabla 2. Los dos primeros métodos son ampliamente usados en la industria química, petroquímica y aeroespacial, mientras que los demás métodos están en diferentes etapas de desarrollo tecnológico y comercial (Dutta, 2013). Para el uso del H<sub>2</sub> como vector energético, se reconoce el papel crucial de esta etapa para lograr la utilización masiva del H<sub>2</sub> en los diferentes sectores de la economía, en especial en el transporte automotor; en consecuencia, se están haciendo ingentes esfuerzos y dedicando grandes recursos humanos y económicos, no sólo por parte de los centros de investigación sino también de la industria automotriz, para lograr un desarrollo tecnológico que permita superar las limitaciones inherentes a las propiedades del H<sub>2</sub>, en especial su baja densidad energética en estado gaseoso.

**Tabla 2.** Métodos de almacenamiento de H<sub>2</sub>.

Proceso	Estado Físico	Modo de almacenamiento	Aplicaciones
Compresión	Gas	Cavernas, cilindros, tanques	Estacionarias, móviles
Licuefacción	Líquido	Depósitos criogénicos	Estacionarias, móviles
Absorción	Gas	Hidruros metálicos, químicos	Móviles, portátiles
Adsorción	Gas	Carbón activado, nano estructuras de carbono	Móviles, portátiles
Compresión	Gas	Microesferas de vidrio	Portátiles

Cuando es necesario *transportar y distribuir* el H<sub>2</sub>, es decir, cuando la producción y el consumo no están localizados en el mismo sitio, usualmente se lo hace en forma gaseosa, aprovechando el conocimiento adquirido en el manejo del gas natural u otros combustibles gaseosos. De hecho, las grandes industrias químicas, tal como Air Liquide, disponen de redes de gasoductos que interconectan sus instalaciones con un manejo seguro del mismo (Air Liquide, 2009). No obstante, si no se requiere de un gran flujo continuo de H<sub>2</sub>, éste puede ser transportado en tanques cisternas; en camiones, confinado en cilindros de diferente tamaño; y también en trenes y barcos.

El último componente en la estructura del SESH corresponde al de *usos finales*, y como su nombre lo indica, su propósito es poner a disposición del usuario la energía del H<sub>2</sub> para la satisfacción de necesidades energéticas de diferente índole. Por tanto, en las tecnologías de uso final se lleva a cabo la conversión de la energía química del H<sub>2</sub> en energía térmica, potencia mecánica o eléctrica. Similarmente al componente almacenamiento, su pleno desarrollo determinará en gran medida la penetración exitosa y la utilización masiva del H<sub>2</sub> como vector energético en el futuro mediato. La Fig. 1 muestra las diferentes rutas y formas de aprovechamiento del H<sub>2</sub> (Posso, 2011).

También debe mencionarse la incursión del H<sub>2</sub> en los *early markets*, o mercados emergentes, que están siendo considerados nichos de oportunidad para la penetración de las tecnologías del H<sub>2</sub> en la economía de un país, en especial las celdas de combustible. Estos mercados están asociados con las actividades de logística relativas al transporte masivo de personas y materiales en grandes aeropuertos, usando los vehículos de soporte en tierra; o la actividad en grandes almacenes y centros de distribución de materiales con vehículos de diferente tipo y capacidad de carga, como los montacargas, (Larriba y *col.*, 2013). Incluso este uso del H<sub>2</sub> se ha llegado a considerar como una etapa previa necesaria para la comercialización de las celdas de combustible en el transporte automotor, mucho más compleja tecnológicamente al requerir de una amplia infraestructura de distribución del H<sub>2</sub> (Mahadevan y *col.*, 2007).

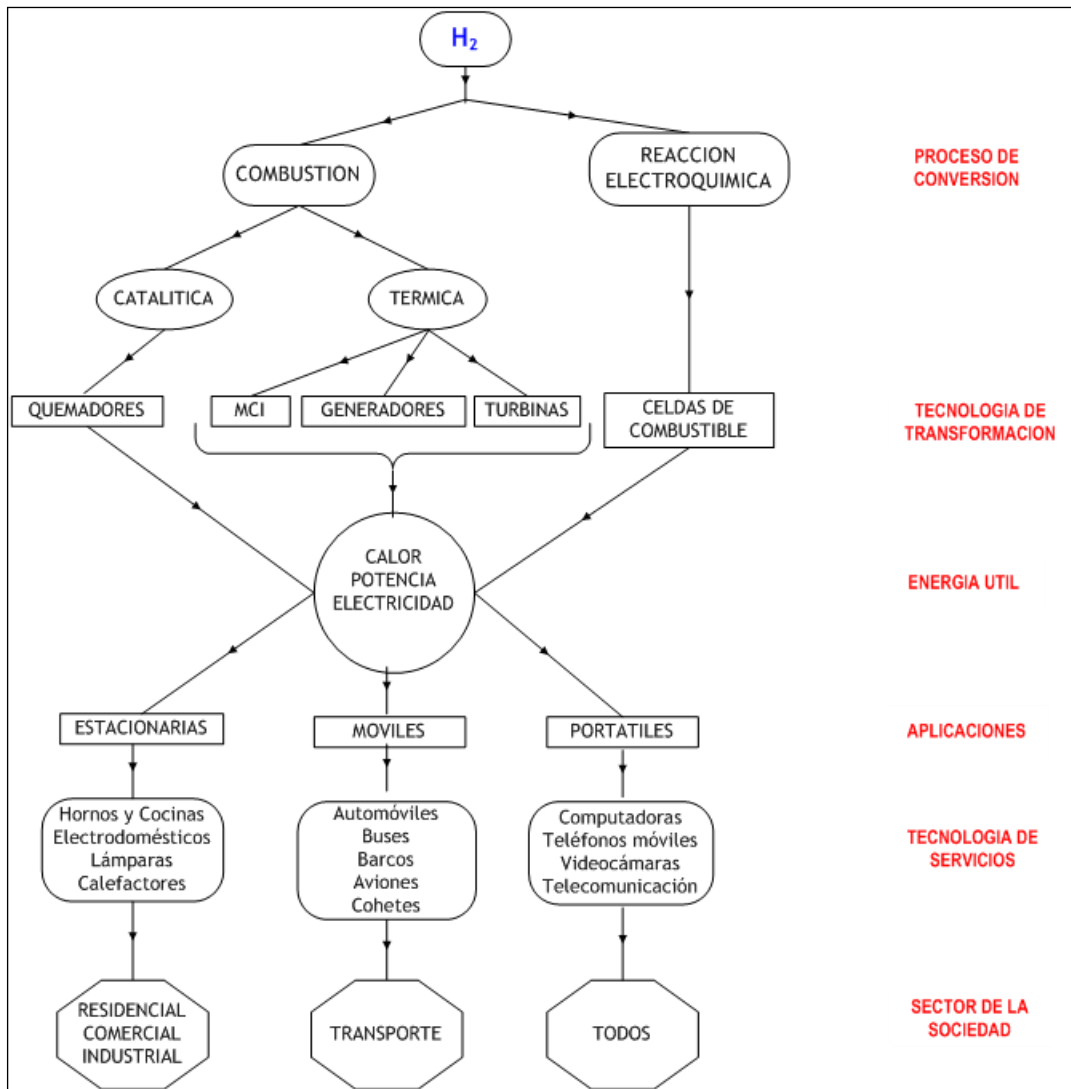


Figura 1. Rutas para el aprovechamiento energético del H<sub>2</sub>.

#### 4. RESULTADOS

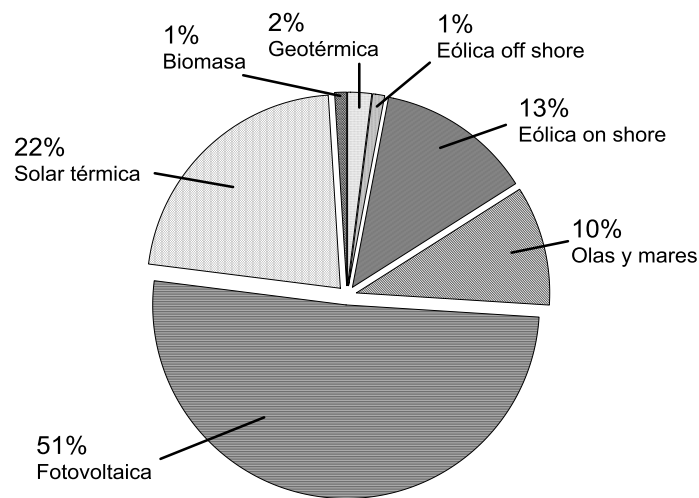
Los resultados de la búsqueda bibliográfica se analizan para cada una de las dimensiones que deben tomarse en cuenta en cualquier propuesta integral de desarrollo del SESH en una región o país.

##### 4.1. Desde los recursos renovables de energía

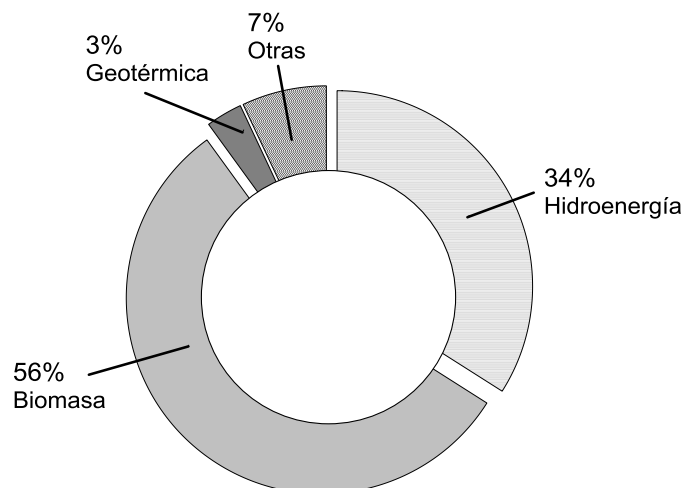
La presencia de las ER en la región se pondera considerando sus potenciales, su participación en la matriz energética regional y su capacidad teórica de producción de H<sub>2</sub>. En primer lugar, se puede afirmar que América Latina (AL) constituye una región privilegiada en recursos energéticos de todo tipo; por una parte, alberga amplias reservas de fuentes fósiles, y por la otra, su situación geográfica y topografía le permite captar ingentes cantidades de ER, cuya cuantificación y disponibilidad se ha llevado a cabo, en mayor o menor grado, en casi todos los países de AL. Los resultados son generalmente presentados en forma de mapas de potencial georeferenciados, elaborados a partir de mediciones directas de las variables de interés en estaciones meteorológicas, o de data satelital; o alternativamente, en gráficos y tablas. Al respecto, el Observatorio Latinoamericano de Energías Renovables, iniciativa auspiciada por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), está realizando una

gran labor de recopilación y ordenamiento de la información para cada país, (OERLAC, 2014). Sin embargo, para la región como un todo, no ha sido posible obtener estimados fiables y completos de sus recursos energéticos renovables.

Donde sí existe información más precisa y relevante para los propósitos de este estudio es sobre la evaluación del potencial de ER de la región para la producción de electricidad; en efecto, el mismo ha sido cuantificado en un reciente estudio (Vergara y col., 2013), señalando que AL podría generar alrededor de 78 PWh de energía eléctrica (1 PWh =  $10^{15}$  Wh), a partir de energía solar, eólica, oceánica, geotérmica y biomasa, con una potencia pico nominal de 34 TW, y cuya distribución según el tipo de ER, se presenta en la Fig. 2, estas cifras son ampliamente suficientes para satisfacer la demanda actual y proyectada de toda la región, e incluso satisfacer varias veces la demanda mundial. En esta cuantificación se ha excluido la hidroenergía, en un todo de acuerdo con la posición, cada vez más generalizada, de no considerarla una auténtica renovable por el gran impacto ambiental que genera la construcción y operación de centrales hidroeléctricas, en especial las de gran tamaño o capacidad de generación.



**Figura 2.** Potencial de producción de energía eléctrica en AL según el tipo de ER.



**Figura 3.** Aporte porcentual de las ER a la matriz energética regional, año 2010.

De las ER presentes en la Fig. 2, se hace una consideración sobre el cálculo de la FV, la de mayor aporte, aunque conceptualmente es un recurso ilimitado, su evaluación está restringida a la

disponibilidad de espacio. Así, se ha asumido una disponibilidad de 269 millones de hectáreas para México y Centroamérica y de 1.761 millones de hectáreas para América del Sur, contemplando además un factor de uso de la tierra de 0,6; una irradiación solar promedio entre 152,4 - 175,9 W m<sup>-2</sup>, una eficiencia de conversión del 25%, y un factor de desempeño del 90% (Vergara y col., 2013).

Respecto a la participación porcentual de las ER en la matriz energética regional, ésta asciende al 25% para el año 2010 (Dávalos, 2012), y la distribución de este aporte por tipo de ER muestra la preponderancia de la biomasa y de la hidroenergía (ver Fig. 3); este resultado podría atribuirse al uso histórico de la biomasa tradicional para la satisfacción de las necesidades energéticas primarias. Sobre ello, en el último informe sobre el desarrollo de las ER en el ámbito mundial, se señala que alrededor de 65 millones de personas en AL (14% de su población total), utilizan la biomasa tradicional para cocción de alimentos y calentamiento ambiental (REN21, 2013), mientras que para la segunda, la mayoría de países de la región han visto a la generación hidroeléctrica como un medio de reducir la dependencia en los combustibles fósiles. De esta manera, el 54% de la potencia eléctrica de la región para el año 2010 proviene de este tipo de generación (Vergara y col., 2013). En cuanto al consumo de energía primaria, las auténticas ER sólo aportan el 2,3% del total; sin embargo, al considerar la energía hidroeléctrica, este porcentaje asciende al 27,2%, lo cual muestra la gran contribución de este tipo de energía (Yépez-García y Johnson, 2011).

Finalmente, con el fin de tener un orden de magnitud de la cantidad de H<sub>2</sub> que teóricamente podría obtenerse a partir de las ER, se supone que el H<sub>2</sub> se va a producir por electrólisis del agua, con la electricidad de origen renovable como fuente primaria, y cuya cantidad obtenible máxima se ha estimado en 78 PWh. Asumiendo un escenario conservador, en el cual sólo el 10% de este potencial se destina a la producción de H<sub>2</sub>, la eficiencia del proceso electrolítico del 60%, tomando además el Valor Calorífico Superior del H<sub>2</sub> (HHV) como base para el cálculo, se tiene:

$$P_{H_2} = (P_{GE} \times E_F \times D_H) / HHV \quad (\text{Ec. 1})$$

$$P_{H_2} = (78 \text{ PWh} \times 10^{12} \text{ KWh (PWh)}^{-1} \times 0,1 \times 0,60 \times 0,0899 \text{ kg Sm}^{-3}) / 3,54 \text{ KWh Sm}^{-3} \text{ H}_2 \\ = 19 \times 10^{11} \text{ kg} \quad (\text{Ec. 2})$$

Sobre este resultado pueden mencionarse dos referentes: uno, la capacidad de producción mundial de H<sub>2</sub> de todas las refinерías, para enero de 2013, fue de 12,61 x 10<sup>9</sup> kg (OGJ, 2013); y dos, la producción de H<sub>2</sub> en la Unión Europa en el año 2009, fue de 7,19 x 10<sup>8</sup> kg (HARC, 2013). En ambos casos, el valor obtenido en (Ec. 2) es ampliamente superior, lo cual da una idea de la magnitud del potencial de H<sub>2</sub> que podría obtenerse de las ER en la región.

#### 4.2. Desde la investigación científica y tecnológica

Para conocer las acciones de este componente clave para el surgimiento del SESH en la región, se realizó una búsqueda bibliográfica en varias bases de datos científicas, tales como: ScienceDirect, IEEEExplore, Realcyt, Dialnet, Scopus y Open Access Journal, obteniendo un total de 73 artículos científicos en el lapso 2004-2014, con autores cuya instituciones de adscripción corresponden a 9 países de AL.

Es importante señalar que la indagatoria ha estado orientada hacia publicaciones sobre la puesta en uso del SESH y sus componentes, más que hacia publicaciones de resultados de investigaciones de aspectos teóricos fundamentales sobre sistemas de conversión energética, tales como: diseño de reformadores, reactores, celdas de combustible y desarrollo de catalizadores; formas novedosas de almacenamiento u otros avances teóricos relativos al estudio del H<sub>2</sub> como vector. En otras palabras, la búsqueda tuvo un criterio muy definido y el análisis de sus resultados, de ninguna manera puede tomarse como un juicio crítico sobre el estado de la investigación en energía del H<sub>2</sub> en un país determinado.

De la información contenida en los artículos analizados se elaboró un conjunto de gráficos que proporcionan elementos para valorar los estudios hechos en la región sobre el SESH como sistema energético. Es necesario recalcar que el análisis se remite exclusivamente a los resultados obtenidos de las bases de datos consultadas y que de una revisión más exhaustiva en una mayor cantidad de bases

de datos científicas, muy probablemente se obtenga una mayor cantidad de artículos sobre la gran variedad de tópicos relativos al H<sub>2</sub> como vector energético. Como una muestra de esta afirmación, en un informe del año 2012 sobre el Programa del H<sub>2</sub> en Argentina se señala que se han generado 180 publicaciones en revistas científicas en el lapso 2008-2013 sobre investigación básica en H<sub>2</sub> energético (Lombardo, 2012). Sin embargo, se reitera lo indicado sobre la naturaleza de ésta investigación.

El primer elemento a analizar tiene que ver con los países en los cuales se han publicado resultados de investigaciones en los aspectos señalados (ver Fig.4).

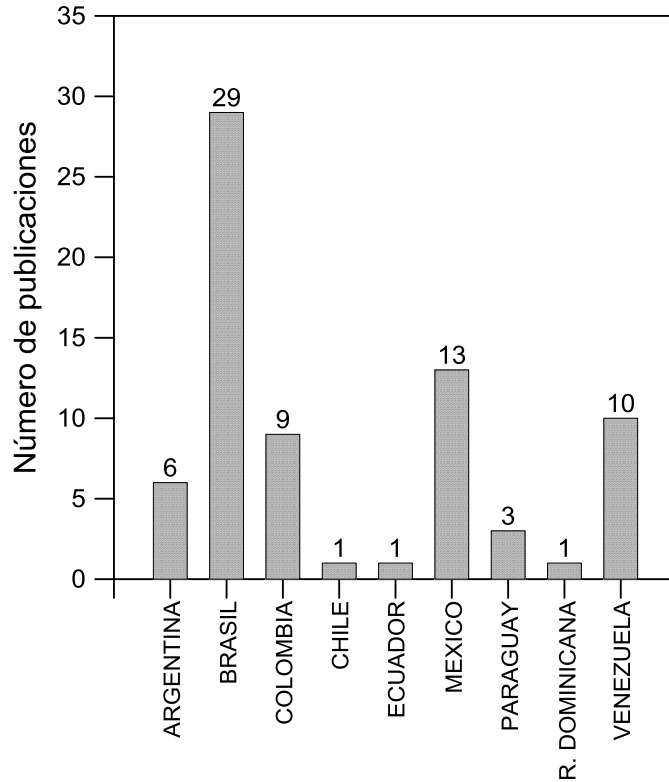


Figura 4. Países de AL con publicaciones sobre el H<sub>2</sub> como vector de energía y el SESH.

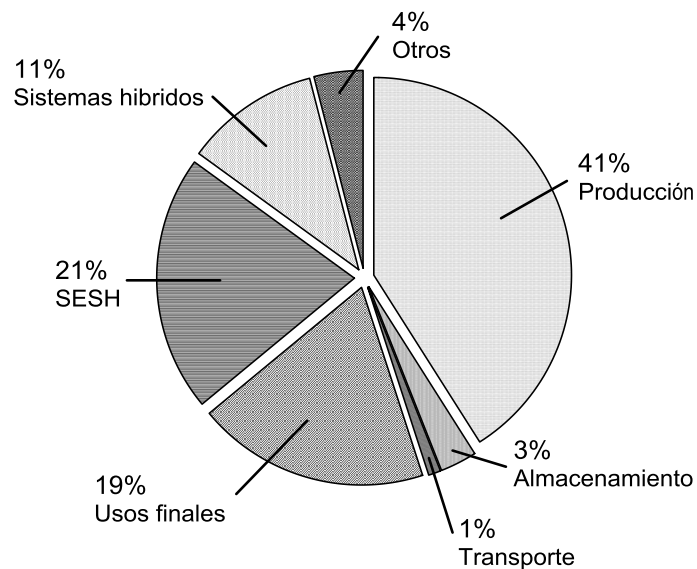


Figura 5. Distribución porcentual de los componentes del SESH estudiados en las publicaciones.



De estos resultados se aprecian varios rasgos característicos: (i) la cantidad de países con publicaciones (9), equivale al 40% del total de AL; y (ii) existe una distribución heterogénea en la productividad científica; en efecto, Brasil sobresale de los demás, con un grupo de 4 países con una productividad media y una cifra similar con una baja productividad, todo con referencia a la de Brasil.

Este puesto de vanguardia de Brasil no es casual, sino el resultado de un trabajo continuado de alrededor de 30 años, ya que el Programa Nacional del Hidrógeno de Brasil, data de hace 29 años (Mattos, 1985) y en él se establecen las líneas directoras para la incorporación del H<sub>2</sub> en la matriz energética brasileña. En grandes rasgos se señala la importancia del aprovechamiento de la generación hidroeléctrica no utilizada en la producción del H<sub>2</sub> por electrólisis, optimizando la operación de las centrales hidroeléctricas, siendo además un novedoso mecanismo de conexión entre los grandes centros de generación, ubicados en la Amazonía, con los grandes centros de consumo, ubicados en la región sureste del país. Este programa se analizará más en detalle en un apartado posterior.

La distribución de la producción científica, según el componente del SESH estudiado y otros tópicos complementarios, se muestra en la Fig. 5. En esta distribución se aprecia claramente que el componente de *producción del SESH* ha sido el más estudiado, y al añadir el aporte de las publicaciones sobre el componente *usos finales* se alcanza el 60% del total. En gran parte, esta situación puede explicarse porque en ambos componentes tienen lugar los procesos de conversión energética, complejos en su naturaleza y evolución, al implicar fenómenos eléctricos, químicos, eléctricos y fluidos dinámicos, y por tanto, son los que despiertan mayor interés desde el punto de vista teórico y de desarrollo tecnológico. También debe señalarse que este interés está en sintonía con lo señalado respecto a que el avance del SESH dependerá en gran parte de la penetración exitosa de las tecnologías de uso final. Otro resultado interesante radica en que todas las investigaciones, 14 en total, sobre el componente *usos finales*, versan exclusivamente sobre el uso de las celdas de combustible como tecnología de uso final, y específicamente, sobre las celdas de combustible de membranas poliméricas (PEMFC), por sus siglas en inglés, tanto para aplicaciones móviles como estacionarias, lo cual podría deberse al auge que las mismas tienen en la actualidad por sus características de alta eficiencia, versatilidad y durabilidad (Wang y Peng, 2014).

En segundo lugar en importancia están las publicaciones relativas al SESH como un todo y orientadas a analizar las condiciones técnicas y económicas de su implantación en diferentes escenarios; en conjunto con las que dedicadas al estudio de los Sistemas Híbridos, entendidos como aquellos sistemas energéticos cuya fuente primaria renovable no es única, sino una combinación de varias; como la combinación de solar FV e hidroenergía, o de solar FV y energía eólica. Estos sistemas tienen el propósito de garantizar un suministro permanente de energía, complementando la generación de potencia renovable con la producción y almacenamiento de H<sub>2</sub>, para ser usado en la generación de electricidad en celdas de combustible cuando la fuente primaria no esté disponible o no sea suficiente para satisfacer las necesidades puntuales de energía; razón por la cual se han orientado principalmente a la satisfacción de requerimientos de energía en sistemas aislados o “*stand alone*” (Yilancy y col., 2009). Finalmente, los demás componentes del SESH han sido poco estudiados, mientras que en la clase *otros* se encuentran las investigaciones relativas a planificación y seguridad en la operación del SESH y de aspectos generales sobre el H<sub>2</sub> como vector.

Al analizar más en detalle las publicaciones del componente *producción* se obtienen ciertos rasgos sobre las fuentes primarias utilizadas, los procesos manejados y los países involucrados (ver Tabla 3).

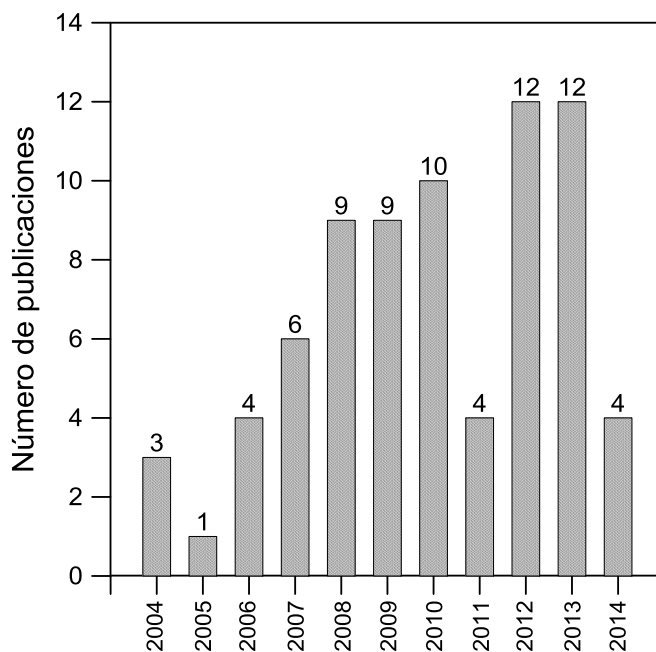
La biomasa e hidroenergía son amplia mayoría en las fuentes primarias seleccionadas como base para el SESH, estos resultados revelan la intención de utilizar precisamente las dos ER con mayor participación en la matriz energética regional. En cuanto a la tecnología de transformación, la electrólisis con la hidroelectricidad en exceso o secundaria como fuente para la disociación de la molécula del agua, es la preferiblemente estudiada; mientras para la biomasa, los procesos fermentativos son los preferidos, aunque sin una tendencia clara al respecto; en ambos casos, Brasil es el país que lidera las investigaciones. De los resultados, en primer lugar se puede señalar que las investigaciones están orientadas a aprovechar las ventajas competitivas de la región; y en segundo lugar, que las directrices establecidas en el Programa Nacional del Hidrógeno de Brasil han sido seguidas en sus aspectos esenciales. Por su parte, la intención de beneficiarse de los potenciales locales de ER también se manifiestan en el caso de Argentina y Chile, únicos países de la región en los

cuales se reportan trabajos sobre la producción de H<sub>2</sub> por electrólisis con la electricidad de origen eólico, tipo de ER con grandes potenciales en ambos países.

**Tabla 3.** Producción de H<sub>2</sub> según la fuente primaria, proceso y país.

Fuente primaria		Biomasa				Hidro	Del mar	FV	Eólica	
País	Proceso	Reform	Fermentación	Termoquímica	Fotobiológica	Electrólisis	Electrólisis			
	Argentina									2
Brasil		3			2	1		4	1	
Colombia			3	1				1		
Chile									1	
Ecuador						1				
México			1					1		
Paraguay						2				
República Dominicana					1					
Venezuela						2		1		
TOTAL		3	4	1	3	1	10	1	2	3

Para concluir el análisis de esta dimensión se presenta la evolución en el tiempo de las publicaciones, evidenciándose una tendencia al incremento de la productividad científica. De hecho, es significativo que en los primeros meses del año 2014, se haya publicado el mismo número de artículos que en todo el año 2011 y 2006, y más que en los años 2004 y 2005 (ver Fig. 6).



**Figura 6.** Cantidad anual de publicaciones en AL sobre el SESH.

**4.3. Desde los costos del SESH**

Un elemento relevante para cualquier decisión sobre la implantación del SESH en un país o región, es el relativo a los costos asociados con sus diferentes componentes y con el sistema global. Un valor

referencial de los costos de producción de H<sub>2</sub> a partir de diferentes fuentes y procesos, se muestra en la Tabla 4, adaptada de un estudio más completo (Bartels y col., 2010), y en el cual los precios se han ajustado al año 2007.

**Tabla 4.** Costos de producción de H<sub>2</sub> a partir de varias fuentes.

Fuente	Proceso	Costo (US\$ kg <sup>-1</sup> )
Gas natural	Reformado	2,33 - 3,17
Carbón	Gasificación	1,05 - 1,50
Solar FV	Electrólisis	5,78 - 6,05
Solar térmica	Electrólisis	5,10 - 6,46
Eólica	Electrólisis	3,50 - 6,61
Biomasa	Gasificación	1,99 - 2,83
Biomasa	Pirólisis	1,47 - 2,57

Nótese que los procesos de obtención H<sub>2</sub> a partir de fuentes fósiles son los de menor costo; sin embargo, la producción de H<sub>2</sub> utilizando la biomasa como materia prima ya es competitiva con aquellos, lo cual podría considerarse como una oportunidad para el desarrollo del SESH en AL, tomando en cuenta el potencial de esta fuente en la región, su participación en la matriz energética regional y su preponderancia en las actividades de I&D, todo lo cual se ha ido revelando en el desarrollo de este trabajo.

También se debe señalar que la hidroenergía no ha sido incluida en este análisis de costos; sin embargo, en varios estudios sobre la utilización de esta fuente primaria en AL como base para el proceso de producción de H<sub>2</sub> por electrólisis, se han obtenido valores similares a los reportados para las fuentes fósiles. Así, en un estudio para Venezuela se han reportado costos en el rango de 2,36 a 4,12 US\$ kg<sup>-1</sup> (Contreras y col., 2007); también, en una investigación análoga realizada para Ecuador, se han obtenido costos para la producción de H<sub>2</sub> de 2,26 a 3,62 US\$ kg<sup>-1</sup> (Peláez y col., 2014). En cuanto a Brasil, con una amplia trayectoria en investigación sobre este modo de producción del H<sub>2</sub>, en un estudio reciente sobre la utilización de H<sub>2</sub> electrolítico en el transporte urbano en una estructura centralizada han obtenido un valor de producción de 2,38 US\$ kg<sup>-1</sup> (Godoy y col., 2013). Finalmente, aunque en otro ámbito, en un trabajo en Turquía sobre la utilización de electricidad secundaria proveniente de pequeñas centrales hidroeléctricas, reportan un costo de producción en el rango de 0,55 a 1,21 US\$ kg<sup>-1</sup> aprovechando la disminución de los costos por las economías de escala (Yumurtaci y col., 2004). Todo esto muestra las ventajas competitivas de la utilización de la energía hidroeléctrica en exceso para la producción limpia y eficiente del H<sub>2</sub>.

#### **4.4. Desde las políticas públicas: marco regulatorio y programas de financiamiento**

Para analizar este elemento se parte de la situación de las ER, sobre las cuales existe un creciente interés de los estados nacionales en la participación de tales energías en el balance energético correspondiente; así, para el año 2012, en 127 países se habían propuesto y aplicado una amplia variedad de políticas en pro del desarrollo y despliegue de las tecnologías renovables, incluyendo en ellos a todos los países de AL, con Argentina y Brasil en la punta, y Bolivia y Venezuela en la zaga, (REN21, 2013). Esta situación favorable no acontece en el caso del H<sub>2</sub>, ya que de la indagatoria realizada se obtiene que sólo en la República Argentina existe un documento legal sobre el fomento de la energía del H<sub>2</sub>; en efecto, en el año 2006 se aprueba la Ley 26123, titulada “Régimen para el desarrollo de la tecnología, producción, uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía”, con el propósito de promover la investigación, el desarrollo, la producción y la utilización del H<sub>2</sub> como vector energético, y también estimular el surgimiento de una industria propia relacionada con el H<sub>2</sub>, creando también el Fondo Nacional de Fomento de Hidrógeno (AAH2, 2014a); sin embargo, esta importante iniciativa no se ha plasmado en hechos concretos debido a retardos en la creación del reglamento respectivo. Anteriormente, en el año 2005, en la provincia de Santa Cruz del mismo país se había aprobado la Ley Provincial para la Promoción y Desarrollo del H<sub>2</sub> como energía alternativa, creando también el Programa Provincial del H<sub>2</sub> (AAH2, 2014b); tampoco se dispone de mayor información sobre su puesta en práctica.

En el Ecuador, en el año 2008 se elaboró y presentó un proyecto de ley para promover la investigación, el desarrollo, la producción y el uso del H<sub>2</sub> como combustible y generador energético (Torres, 2008); sin embargo, en conversación privada con su proponente, Dr. Wilson Torres, de EP PetroEcuador, la misma no prosperó. Finalmente, en febrero de 2014, la Sociedad Mexicana del Hidrógeno, anunció que en el Senado de la República Mexicana se introdujo a discusión un Proyecto de Decreto de Ley para la Investigación y Aprovechamiento del Hidrógeno como vector energético alternativo en México, no obstante, no se dispone de mayor información, poniendo en evidencia una gran limitante y debilidad: la ausencia de una información actualizada y fiable sobre las acciones en pro del avance del H<sub>2</sub> en la región latinoamericana.

En cuanto a los programas estatales para el financiamiento de proyectos de I&D, se destaca el Programa de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Economía del Hidrógeno (ProH<sub>2</sub>) de Brasil. Creado en el año 2001 con el nombre de Programa Brasileño de Sistemas de Celdas de Combustible (ProCaC), en el año 2005 cambió su denominación a la actual. Su principal objetivo es el desarrollo de tecnología para todos los componentes del SESH, pero con prioridad en la producción a partir de etanol y glicerol, y en las celdas de combustible para generación distribuida en sistemas aislados y para vehículos para transporte colectivo urbano (Duarte, 2012). Sus principales acciones se orientan a la formación de recursos humanos en los diferentes niveles de educación superior (licenciatura, maestría y doctorado) y capacitación laboral para personal de las instituciones participantes, la dotación de infraestructura, el apoyo a la formación de redes dentro del programa, la elaboración de proyectos cooperativos entre las redes y el apoyo a la normalización. Dentro de sus principales logros están la participación de 40 grupos de investigación de una cantidad similar de universidades y centros de investigación; el desarrollo de patentes sobre catalizadores para el proceso de reformado de etanol y de electrodos que mejoran la eficiencia de celdas de combustible de baja potencia (Laborde y Rubiera, 2010). En cuanto a estudios y publicaciones, pueden mencionarse: un mapa de ruta para la implementación de la economía del H<sub>2</sub> en Brasil, que establece las estrategias y acciones para la introducción del H<sub>2</sub> en la matriz energética a partir de un estudio prospectivo sobre las tendencias tecnológicas del mercado con un horizonte en el año 2020 (Gossman, 2006). Todos estos resultados, confieren al Brasil de un papel estelar en el avance del SESH en AL, incluso con la capacidad de desarrollar proyectos demostrativos con tecnología propia, como el autobús movido con celdas de combustible.

También se debe reseñar el Programa del Hidrógeno en la Argentina, iniciado en el año 2008 e incluido en los programas estratégicos de ese país y que comprende la I&D en todas las fases del SESH. Con un presupuesto de 3 millones de US\$ para los cinco años de duración del programa, obtenido de diferentes fuentes, su actividad se llevó a cabo mediante acciones colaborativas de 10 grupos de investigación de 8 instituciones de educación superior y dos empresas en el área de la energía, aglutinando a 120 investigadores y estudiantes de postgrado en cuatro grandes líneas de investigación: desarrollo de catalizadores y de procesos de producción de alta pureza, ingeniería de procesos, compresión y almacenamiento, y celdas de combustible (Lombardo, 2012). Su principal logro radica en el concurso de una amplia cantidad de investigadores, ubicados en varias regiones del país, en un macro proyecto: el diseño, construcción y operación de una planta piloto para producir 5 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> d<sup>-1</sup> para alimentar una PEMFC de 5 kW; del cual se ha generado la publicación de 180 artículos científicos, ya señalados en la sección 4.2., la formación de cuarto y quinto nivel de 50 investigadores y el desarrollo de dos patentes, además de un conjunto de proyectos cooperativos con Brasil (Lombardo, 2012).

Asimismo, en México se han propuesto varios planes para la introducción del H<sub>2</sub> en el sector de energía del país; en efecto, ya en el año 1996 se formuló un plan de I&D sobre la energía del H<sub>2</sub> y celdas de combustible (Sebastián y col., 1996); mientras que en el año 2004 se proponen varios lineamientos y acciones correspondientes para un mapa de ruta hacia una economía del H<sub>2</sub> en México (Ramírez y Estrada, 2004). De otros países de AL, no ha sido posible obtener información sobre programas específicos de financiamiento de proyectos de investigación sobre la energía del H<sub>2</sub>.

#### 4.5. Desde los programas de formación en el SESH

La oferta académica en fundamentos y aplicaciones del SESH, expresada en titulaciones universitarias de diferente nivel, diplomadas, cursos de actualización, capacitación y entrenamiento, es escasa en la región. Aunque el elemento formativo está incluido en los programas de desarrollo existentes en Brasil y Argentina, descritos en el apartado anterior, no se tienen mayores detalles sobre la forma de hacerlo, y pareciera fundamentarse en la realización de proyectos de grado de diferente nivel y exigencia.

Con respecto a actividades formales, quizás la iniciativa más completa y única en AL, es la desarrollada en la Planta Experimental de Pico Truncado, en el extremo sur de Argentina. Concebida como una escuela/fábrica, consta de dos módulos, el primero destinado a la capacitación teórico-práctica, y el segundo a la producción, almacenamiento, laboratorio, taller y ensayos de prototipos para las diversas aplicaciones del H<sub>2</sub> como combustible (Aprea, 2009). En el primer módulo, se dicta un curso de postgrado en Tecnologías del Hidrógeno de 40 horas de duración, del cual se han generado una amplia cantidad de tesis de posgrado, enfocadas principalmente al desarrollo de catalizadores y de sistemas novedosos de almacenamiento de H<sub>2</sub> (Pico Truncado, 2014). Por su parte, en el programa de maestría en Sistemas Energéticos Avanzados, en la Universidad de Santander (UDES) de Colombia está incluida la asignatura electiva, Sistema Energético Solar-Hidrógeno, con una duración de 36 horas, la única experiencia formativa conocida sobre este sistema (UDES, 2014).

Recientemente, en Paraguay se han adelantado varias acciones en formación e investigación en el SESH; así, en octubre de 2013 se anuncia la creación del Centro de Innovación en Tecnología del Hidrógeno, CITH2, en el Parque Tecnológico Itaipú-Paraguay, con el objetivo de realizar investigaciones, capacitación y procesos de innovación sobre producción de H<sub>2</sub> e Hidrometano (BNAméricas, 2013). Dentro de las actividades tendientes a consolidar el conocimiento teórico y práctico del manejo del H<sub>2</sub> está el Curso Internacional sobre Uso y Producción de H<sub>2</sub> e Hidrometano, dictado en la Universidad Nacional de Asunción, en cooperación con la Universidad de Génova, (ITAIPU, 2013). Ambas iniciativas tienen el propósito de incentivar la utilización de tecnologías limpias, además de promover la introducción del H<sub>2</sub> en la matriz energética del Paraguay, como un combustible alternativo y ecológico, con el fin de apuntalar las bases para el desarrollo de la economía del H<sub>2</sub> en el país.

Por su parte, en Brasil se encuentra el Centro Nacional de Referencia en Energía del Hidrógeno, CENEH, cuyos objetivos son promover, a través de redes de información, la disseminación de referencias en programas, proyectos, investigaciones, desarrollos científicos y tecnológicos en usos de la energía del H<sub>2</sub> propios o en cooperación con otras entidades, realizando alianzas estratégicas y promoviendo la capacitación y actualización profesional en esta área (CENEH, 2013).

**Tabla 5.** Libros publicados como soporte a la formación en la energía del H<sub>2</sub> y el SESH.

Título	Primer autor	Año	País	Editor
Potencialidades del H <sub>2</sub> como vector de energía en AL	Laborde, M.	2010	Argentina	Ediciones CYTED
La energía del H <sub>2</sub>	Laborde, M.	2010	Argentina	Ediciones CYTED
Hidrógeno: Introducción a la energía limpia	González, R.	2009	México	Ediciones UNAM
Tecnologías Solar-Eólica-H <sub>2</sub> -Pilas de combustible como fuentes de energía	Poggi, H.	2009	México	Instituto Tecnológico de Estudios superiores de Ecatepec
Celdas de combustible	Rodríguez, F.	2010	México	Sociedad Mexicana del Hidrógeno
Tecnologías de H <sub>2</sub> y celdas de combustible de fuentes renovables	González, R.,	2012	México	Editorial Académica Española
Modelado y simulación de un sistema energético basado en el H <sub>2</sub>	Posso, F.	2011	Venezuela	Editorial Académica Española

En cuanto a libros de soporte para los procesos formativos en fundamentos teóricos y aplicaciones (ver Tabla 5), se presentan los publicados en idioma español en los últimos cuatro años, ordenados por país, destacándose la actividad de México.

Finalmente, dentro de este componente deben señalarse varias tesis de postgrado que aportan elementos de interés sobre el estado actual del desarrollo de las tecnologías del H<sub>2</sub> en varios países de la región (Lizana, 2007); la factibilidad de la incorporación del H<sub>2</sub> como fuente de energía, que mereció el premio anual de la Sociedad Mexicana del H<sub>2</sub> en el año 2013 (Pérez, 2012); y la oportunidad que ofrece las tecnologías del H<sub>2</sub> para garantizar la sostenibilidad energética en Colombia (Moreno y Vargas, 2013).

#### **4.6. Desde las acciones de promoción y difusión**

En cuanto a las actividades de divulgación y promoción de la energía del H<sub>2</sub> y el SESH, expresados en eventos científicos y revistas especializadas, se pueden mencionar el Congreso Anual de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno, que celebra este año su décima tercera edición, también el Congreso Iberoamericano de Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía (HYFUSEN) en Argentina, de periodicidad bianual, cuya quinta edición debe llevarse a cabo en el año 2015. También merece señalarse el Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível (WICaC) realizado en Brasil con una periodicidad bianual, correspondiendo al 2014 la séptima edición. Todos ellos tienen el propósito de dar a conocer los resultados de investigaciones de amplio espectro sobre diversos aspectos que conlleva el estudio del H<sub>2</sub> como vector y su concurso en los nuevos sistemas energéticos, y promover las actividades conjuntas entre grupos de investigación de uno o varios países.

En ese sentido, también deben mencionarse las actividades colaborativas y de cooperación, entre ellas se encuentran, la Red Iberoamericana de Pilas de Combustible e Hidrógeno, creada en el año 2005 y la Red Iberoamericana Hidrógeno: producción y purificación, almacenamiento y transporte (H2PPAT), que data del año 2007, esta última contó con la participación de más de 200 investigadores de 11 países de la región; resaltando que ambas acciones contaron con el patrocinio y financiamiento de la cooperación española, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

Con referencia a las asociaciones y sociedades orientadas al fomento de la energía del H<sub>2</sub>, pueden nombrarse: la Asociación Argentina del Hidrógeno, la Sociedad Mexicana del Hidrógeno y la Asociación Colombiana del Hidrógeno. Mientras que en Ecuador se reporta últimamente la creación de la Red de Hidrógeno y Celdas de Combustible del Ecuador. De todas ellas, las dos primeras están plenamente consolidadas y realizan un conjunto de actividades de promoción permanentes, tal como la publicación de la Revista Argentina del Hidrógeno, auspiciada por la Asociación Argentina del Hidrógeno, experiencia única en AL.

Por último, se señala una iniciativa plausible: la vivienda sustentable Solar-Hidrógeno, que integra un sistema solar FV y celdas de combustible para satisfacer las necesidades de la vivienda, su diseño móvil le permite recorrer diferentes localidades de México, mostrando las ventajas del sistema y formando en los aspectos fundamentales del mismo (González, 2013).

#### **4.7. Desde la dimensión social**

Al respecto, vale mencionar que si bien la región en su globalidad tiene un 93% de acceso a la red eléctrica, este porcentaje baja al 70% en el sector rural, lo cual significa que alrededor de 24 millones de habitantes rurales no disponen de servicios eléctricos y permanecen sumidos en un estado de privación energética; además, este porcentaje no es uniforme, tal que en Bolivia, sólo el 38% del sector rural tiene acceso a la red, y el 28% en el Perú (Yépez y col., 2008). Con la implantación del SESH en emplazamientos rurales se lograría satisfacer sus necesidades energéticas, se favorecería el empleo local, la economía doméstica y el ingreso económico de sus habitantes, desestimulando la migración rural urbana, fenómeno de grandes dimensiones en la región. En contraste, el escaso nivel cultural y educativo podría perturbar la aceptación a una nueva forma de suministro energético; al respecto, se reconoce que la penetración del H<sub>2</sub> en el sistema energético de un país, debe estar

acompañado de una campaña de capacitación básica, concienciación y divulgación de las ventajas que ofrece (Sherry y *col.*, 2010).

#### 4.8. Desde los nichos de oportunidad

Un resultado importante de este estudio es el relativo a la detección de mercados o sectores de la economía que por sus características, podrían percibirse como nichos de oportunidad para la penetración del SESH en la sociedad. Es así como del análisis hecho en los apartados previos, han emergido dos situaciones de oportunidad: la energización rural y el transporte urbano. En el primer caso, ya se han señalado los beneficios tangibles e intangibles de la utilización del SESH conformando sistemas híbridos, en sectores rurales sin acceso a la energía, ampliamente distribuidos en la región latinoamericana. Sobre este aspecto se han realizado una serie de estudios en varios países, en los cuales se tratan los aspectos técnicos y económicos de esta aplicación (Silva y *col.*, 2010; Chávez y *col.*, 2013; Carvajal y *col.*, 2010). Estos estudios revelan que, a pesar que los costos de la implementación de esta opción de abastecimiento energético es superior al sistema tradicional, existen beneficios difíciles de cuantificar y más aún de monetizar, tales como el grado de satisfacción de la población al disponer de servicios de energía y la mejora en la calidad de vida, que deberían tomarse en cuenta en cualquier decisión sobre el suministro de energía a estos sectores de la población.

Finalmente, se debe referir un estudio integral de la implementación del SESH, que contempla los aspectos técnicos y económicos de todos los componentes y de su acoplamiento para conformar el sistema global, con vista a su implantación en un sector rural de Venezuela previamente seleccionado. Se consideran dos escenarios de desarrollo, tomando en cuenta las mejoras tecnológicas esperadas y las economías de escala, obteniendo para el año 2010, y en las condiciones más favorables, un costo total final del H<sub>2</sub> de 10,2 US\$ kg<sup>-1</sup>, valor altamente influenciado por la baja tarifa eléctrica de Venezuela, y que resulta competitivo con la opción tradicional de la extensión del tendido eléctrico (Contreras y Posso, 2011).

La segunda oportunidad para la introducción del SESH es el transporte urbano masivo; al respecto, en Argentina, en la provincia de Córdoba se ha estudiado producir H<sub>2</sub> vía electrólisis, aprovechando el alto potencial eólico de la provincia para su uso en el transporte vehicular en casi toda la provincia. Analiza diferentes escenarios según la proporción de la mezcla H<sub>2</sub> y gas natural comprimido, obteniendo que el costo del H<sub>2</sub> para abastecer el parque vehicular puede ubicarse alrededor de 3,6 US\$ kg<sup>-1</sup>, para un costo de la electricidad eólica alrededor de 50 US\$ MWh<sup>-1</sup>, lo cual equivale energéticamente a un costo de 1,2 US\$ l<sup>-1</sup> de gasolina (Rodríguez y *col.*, 2010). También en Paraguay se ha analizado la utilización de las PEMFC en el transporte urbano, con el H<sub>2</sub> generado por electrólisis a partir de hidroelectricidad en exceso. Obteniendo que los costos anuales para la operación de una flota de 55 buses propulsados por PEMFC es competitivo comparado con el uso del diésel para la misma flota (Galeano y *col.*, 2012). A las investigaciones sobre la viabilidad económica debe añadirse las realizadas sobre los beneficios ambientales que resultan de la utilización de una tecnología de uso final con mínimas emisiones de contaminantes; así, en México se llevó a cabo un estudio prospectivo sobre la utilización de diversos combustibles y tecnologías, y sus efectos sobre la mitigación de la contaminación ambiental, obteniendo que la utilización de celdas de combustible de etanol directo, en conjunto con motores eléctricos, resulta en una disminución del 35% en emisiones de CO<sub>2</sub>, con un costo de mitigación de 140,14 US\$ ton<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> (Manzini, 2006).

En último lugar, anotar que la inquietud sobre las posibles oportunidades para el H<sub>2</sub> en la región, no es nueva; de hecho, en el año 1998 ya se inquiría sobre la oportunidad del uso de celdas de combustible en la Antártida (Marschoff, 1998).

## 5. CONCLUSIONES

De la investigación documental sobre el desarrollo del SESH en AL han emergido factores desencadenantes e inhibidores, según sea su efecto sobre tal intención. Dentro de los primeros se señalan, el gran potencial aprovechable de ER, en especial, de energía hidroeléctrica y biomasa, que

permitirían satisfacer ampliamente las necesidades de energía primaria para la producción de H<sub>2</sub> con una estructura de costos, que en el marco de una economía de escala, sería competitiva con la producción utilizando fuentes fósiles.

El vector H<sub>2</sub>, en sinergia con la electricidad renovable, conformando sistemas híbridos, podría ser utilizado inicialmente en dos nichos de oportunidad: la energización rural y el transporte urbano en las grandes ciudades; en el primer caso, con un gran efecto económico y social; y en el segundo, más allá de las consideraciones económicas, percibiéndolo como un mecanismo de mitigación de la alta contaminación ambiental derivada de este uso. Desde una visión económica, podría decirse entonces que tanto del lado de la oferta como de la demanda, existen condiciones favorables para la penetración del H<sub>2</sub>, en términos del SESH, en la matriz energética regional y local.

Los factores desfavorables se expresan en una actividad de I&D localizada en muy pocos países, evidenciando un desbalance poco propicio para llevar adelante acciones cooperativas; una mínima presencia de políticas públicas, manifiesta en un débil marco legal y de financiamiento a proyectos de I&D. Por su parte, la formación y capacitación del capital humano que se requeriría para una implantación masiva e incluso para la generación de tecnología propia, no ha merecido la atención de instituciones educativas, públicas y privadas, encargadas de este cometido. Adicionalmente, la actitud de la sociedad juega un rol clave en la aceptación social de este novedoso sistema energético, para lo cual las acciones de promoción y difusión de las ventajas que ofrece el H<sub>2</sub> por parte de redes cooperativas y asociaciones civiles son fundamentales. Finalmente, para desarrollar plenamente el efecto de los primeros, y superar los segundos, se requiere de una visión compartida y consensuada de los actores implicados: los investigadores y centros de I&D, las universidades, en tanto instituciones encargadas de la formación, y la empresa privada, todas bajo la tutela del estado, y en el marco de un esquema legal propicio, para que el SESH se constituya en un mecanismo de desarrollo económico sustentable y progreso social de la América Latina.

Los resultados obtenidos en este trabajo, si bien son de carácter general, podrían tomarse como el punto de partida o línea base para estudios más completos sobre la aplicación del SESH en un país en particular y para unos requerimientos específicos.

## RECONOCIMIENTO

Este trabajo científico ha sido financiado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador.

## NOMENCLATURA

AL: América Latina

E<sub>F</sub>: eficiencia de la electrólisis, adimensional

ER: energía renovable

D<sub>H</sub>: densidad del H<sub>2</sub>, kg Sm<sup>-3</sup>

HHV: valor calorífico superior del H<sub>2</sub>, kWh Sm<sup>-3</sup>

I&D: Investigación y desarrollo

kWh: Equivale a la energía desarrollada por una potencia de un kilovatio (kW) durante una hora

PWh (peta watt hora): 10<sup>3</sup> TWh (tera watt hora) = 10<sup>6</sup> GWh (giga watt hora) = 10<sup>15</sup> Wh (watt hora)

Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>: se define la cantidad de gas (por ejemplo H<sub>2</sub>) ocupando un metro cúbico en las condiciones de T = 0°C y P = 1 atm

PEM: membrana polimérica

PEMFC: pilas de combustible de membrana polimérica

P<sub>H2</sub>: producción teórica de H<sub>2</sub> renovable, kg

P<sub>GE</sub>: potencia eléctrica estimada, PWh

SESH: Sistema de energía solar-hidrógeno

Solar FV: Solar Fotovoltaica



REFERENCIAS

- AAH2a, 2014. Legislación. Asociación Argentina del Hidrógeno. Descargado de [http://www.aah2.org/ley\\_nacional\\_26123.html/](http://www.aah2.org/ley_nacional_26123.html/) el 12 de febrero de 2014.
- AAH2b, 2014. Legislación Asociación Argentina del Hidrógeno. Descargado de [http://www.aah2.org/ley\\_provincial\\_sc\\_2756.html/](http://www.aah2.org/ley_provincial_sc_2756.html/) el 12 de febrero de 2014.
- Air Liquide, 2009. Air Liquide y el hidrógeno, vector de energía limpia. Descargado de [http://www.es.airliquide.com/file/otherelement/pj/dossier\\_de\\_prensa\\_hidrogeno25887.pdf](http://www.es.airliquide.com/file/otherelement/pj/dossier_de_prensa_hidrogeno25887.pdf) el 27 de febrero de 2014.
- Apra, J., 2009. Hydrogen energy: demonstration plant in Patagonia. Description and safety issues. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 34, 4684-4691.
- Barbir, F., 2009. Transition to renewable energy systems with hydrogen as an energy carrier. *Energy*, 34, 308-312.
- Bartels, J., M. Pate, N. Olson, 2010. An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 35, 8371-8384
- BNAmericas, 2013. Paraguay crea centro de investigación y desarrollo para hidrógeno. Descargado de <http://www.bnamericas.com/news/petroleoigas/> el 25 de febrero de 2014.
- Bockris, J., 2013. The hydrogen economy: Its history. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 38, 2579-2588.
- Carvajal, H. J. Babativa, J. Alonso. 2010. Estudio sobre producción de H con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 12, 31-42
- CENEH, 2014. Brazilian Reference Center for Hydrogen Energy. Objetivos. Descargado de <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/objectives> el 12 de enero de 2014.
- Contreras, A., F. Posso, N. Veziroglu, 2007. Modeling and simulation of the production of hydrogen using hydroelectricity in Venezuela. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 32, 1219-1224.
- Contreras, A., F. Posso, 2011. Technical and financial study of the development in Venezuela of the hydrogen energy system. *Renew. Energ.*, 36, 3114-3123.
- Chávez, V., J. Vallejo, J. Cruz, R. Ornelas, G. Orozco, R. Muñoz, L. Arriaga (2013) A hybrid power plant (Solar–Wind–Hydrogen) model based in artificial intelligence for a remote-housing application in Mexico. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 38, 6, 2641-2655.
- Dávalos, V., 2012. Matriz energética en América Latina y el Caribe: Situación actual y perspectivas de las energías renovables. Descargado de <http://www.olade.org/sites/default/files/presentaciones-sej/PresentaciónOLADEUPADI.pdf> el 7 de noviembre de 2013.
- Duarte A., 2012. Os 10 anos do Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio - ProH2. 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells. UNICAMP. Campiñas, Brasil. Descargado de <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/WICaC2012/> el 11 de enero de 2014.
- Dutta, S., 2013. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. *J. Ind. Eng. Chem.*, (In Press, Corrected Proof), 9 págs.
- Galeano, M., E. Peres, J. Camargo, 2012. Are HFC buses a feasible alternative for urban transportation in Paraguay? *Int. J. Hydrogen Energ.*, 37, 16177-16185.
- Godoy, G., C. Cavaliero, E. Silva, 2013. Analysis of electrolytic hydrogen production models and distribution modes for public urban transport: study case in Foz do Iguacu, Brazil. *Int. J. Energ. Res.*, 37, 1142-1150.
- González, R., E. López, B. Velázquez, 2009. Hidrógeno: Introducción a la energía limpia (1a ed.). Ed. SMH2, Ciudad de México, México, 199 págs.
- González, R., 2013. La vivienda sustentable Solar-Hidrógeno. *Memorias del XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno*, Aguas Calientes, México, 45-55.
- González, R., O. Solorza, M. Valenzuela, 2012. Tecnologías de hidrógeno y celdas de combustible de fuentes renovables. Ed. Académica Española, Madrid, 189 págs.

- Gosmann, H., 2006. O roteiro brasileiro para a estruturacao da economia do hidrogenio. Ministério de Minas e Energia. Descargado de <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/WICaC2006/PDF/HugoGosmann.pdf>, el 20 de marzo de 2014.
- HARC, 2013. Hydrogen Analysis Resource Center. Descargado de <http://hydrogen.pnl.gov/cocoon/morf/hydrogen/> el 1 de marzo de 2014.
- Holladay, J., D. Hu, L. King, Y. Wang, 2009. An overview of hydrogen production technologies. *Catal. Today*, 139, 244-260.
- ITAIPU, 2013. Segundo módulo del curso internacional sobre producción y uso de hidrometano e hidrógeno. Descargado de <http://www.pti.org.py/destacados>, el 22 de marzo de 2014.
- Laborde, M.A., E.A. Lombardo, F. Bellot, J. Soares, J.L. Fierro, M.P. González, 2010. Potencialidades del hidrógeno como vector de energía en América Latina. *Ediciones CYTED, Madrid*, 80 págs.
- Laborde, M.A., F. Rubiera (Eds.), 2010. La energía del hidrógeno. *Ediciones CYTED, Madrid*, 80 págs.
- Larriba, T., R. Garde, M. Santarelli, 2013. Fuel cell early markets: Techno-economic feasibility study of PEMFC-based drivetrains in materials handling vehicles. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 38, 2009-2019.
- Lizana, D., 2007. Estado actual de la tecnología de hidrógeno en Sudamérica: Argentina, Brasil, Chile y Colombia. *Proyecto Final de Diploma, Especialización en Tecnologías del Hidrógeno. Universidad de Zaragoza, España*, 40 págs.
- Lombardo, A., 2012. The Argentina National Program on Hydrogen. 6th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells. UNICAMP. Campiñas. Brasil. Descargado de <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/WICaC2012/> el 2 de marzo de 2014.
- Mahadevan, K., H. Stone, K. Judd, D. Paul, 2007. Market opportunity assessment of direct hydrogen PEM Fuel Cells in Pre-Automotive Markets. VP3-DOE Program. Descargado de [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review07/fc\\_26\\_mahadevan.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review07/fc_26_mahadevan.pdf) el 11 de diciembre de 2013.
- Manzini, F., 2006. Inserting renewable fuels and technologies for transport in Mexico city metropolitan. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 31, 327-335.
- Moreno, L., C. Vargas, 2013. La tecnología del hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia. *Tesis de maestría en Dirección y Gerencia de Empresas, Universidad del Rosario, Colombia*, 149 págs.
- Marschoff, C., 1998. Transition from to renewable energy sources: Fuel cells in Antarctica as an economically attractive niche. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 23(4), 303-306.
- Mattos, M., 1985. National hydrogen energy program in Brazil. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 10, 601-606.
- OGJ, 2013. Oil & Gas Journal, 111(1b). Descargado de <http://www.ogj.com/articles/print/volume-111/issue-1b.html> el 25 de noviembre de 2013.
- OERLAC, 2014. Observatorio de energía renovable para América Latina y El Caribe. Descargado de <http://www.renenergyobservatory.org/es/> el 4 de diciembre de 2013.
- Peláez, M., G. Riveros, S. Torres, T. Garcia, E. Albornoz, 2014. Production and use of electrolytic hydrogen in Ecuador towards a low carbon economy. *Energy*, 64, 626-631.
- Pérez, O., 2012. Estudio de factibilidad para implementar el uso del hidrógeno como fuente alterna de energía en México. *Tesis de grado en Maestría en Energía Renovable, Universidad de Guadalajara, México*, 148 págs.
- Pico Truncado, 2014. Planta experimental de hidrógeno. Descargado de <http://www.h2truncado.com.ar/> el 01 de marzo de 2014.
- Poggi, H., A. Martínez, J. Pineda, S. Caffarel, 2009. Tecnologías Solar-Eólica-H<sub>2</sub>-Pilas de combustible como fuentes de energía (1a ed.). *Ed. Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Ciudad de México, México*, 319 págs.
- Posso, F., 2011. Modelado y simulación de un sistema energético basado en el hidrógeno, *Ed. Académica Española, Madrid*, 232 págs.

- Ramírez, J., A. Estrada, 2004. Roadmap towards a sustainable hydrogen economy in Mexico. *J. Power Sources*, 129(2), 255-263.
- REN21, 2013. Renewables 2013: Global status report. Descargado de <http://www.ren21.net/REN21Activities/> el 15 de diciembre de 2013.
- Rodríguez, C., M. Riso, R. Jiménez, R. Ottogalli, 2010. Analysis of the potential for hydrogen production in the province of Córdoba, Argentina, from wind resources. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 35, 5952-5956
- Rodríguez, F., O. Solorza, E. Hernández (Eds.), 2010. Celdas de combustible. *Edit. SMH2, Published in Canada*, 248 págs.
- Sebastian, P., M. Martinez, D. Eapen, O. Savadogo, 1996. Hydrogen energy and fuel cells: A recent R & D program in Mexico. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 21(7), 613-616.
- Sherry, F., H. Devine, P. Devine, 2010. Wright public understanding of hydrogen energy: A theoretical approach. *Energy Policy*, 38, 5311-5319.
- Silva, S., M. de Oliveira, M. Severino. 2010. Economic evaluation and optimization of a photovoltaic-fuel cell-batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon. *Energy Policy*, 38, 6713-6723
- Torres, W., 2008. Proyecto de Ley del Hidrógeno. Descargado de <http://www.derechoecuador.com/articulos/> el 22 de febrero de 2014.
- UDES, 2014. Universidad de Santander. Programa de Maestría en Sistemas Energéticos Avanzados. Descargado de <http://www.udes.edu.co/programas-de-maestria/sistemas-energeticos-avanzados.html> el 5 de marzo de 2014.
- Vergara, W., C. Alatorre, L. Alves, 2013. Rethinking our energy future. Inter-American Development Bank, IDB-DP-292. Descargado de <http://www.iadb.org/es/publicaciones> el 19 de noviembre de 2013.
- Veziroglu, T., S. Sumer, 2008. 21st century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Convers. Manage.*, 49, 1820-1831.
- Yépez, R., T. Johnson, 2011. Meeting the balance of electricity supply and demand in Latin America and the Caribbean. The World Bank, Washington. Descargado de <http://esmap.org/sites/esmap.org/files/REPORTLACElectricityChallenge.pdf> el 5 de diciembre de 2013.
- Yilancy, A., I. Dincer, H. Ozturk, 2009. A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications. *Prog. Energ. Combust.*, 35, 231-244.
- Yumurtaci, G., E. Bilgen, 2004. Hydrogen production from excess power in small hydroelectric installations. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 29, 687-693.
- Wang, F., Ch. Peng, 2014. The development of an exchangeable PEMFC power module for electric vehicles. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 39, 3855-3867.
- Wang, M., Z. Wang, X. Gong, Z. Guo, 2014. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production - A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 29, 573-588.
- Winter, C., 2009. Hydrogen energy-Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 34, 1-52