

## Estimación del Potencial de Producción de Hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica en Ecuador

F.R. Posso<sup>1</sup> J. P. Sánchez<sup>2</sup> J. Siguencia<sup>2</sup>

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

E-mail: fausto.posso@ucuenca.edu.ec

<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería Química. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador

E-mail: jhoanna.sanchez@ucuenca.edu.ec; jorge.siguencia.@ucuenca.edu.ec

### Resumen

Se hace una evaluación preliminar del Hidrógeno electrolítico que se obtendría del aprovechamiento del recurso solar fotovoltaico en Ecuador. La información base es la energía eléctrica fotovoltaica anual generada en las provincias del territorio continental calculada por filtrado de la información del Atlas Solar del Ecuador. Se obtiene que la provincia del Guayas es la de mayor potencial generado,  $8,73 \times 10^8$  kWh/año, y de  $H_2$  producido,  $1,58 \times 10^7$  kg  $H_2$ /año. Mientras que la provincia de Loja es la de mayor densidad de producción, 1,15 ton  $H_2$ /año  $km^2$ . La producción total anual de  $H_2$  del Ecuador es de  $2,55 \times 10^8$  kg  $H_2$ /año, con una densidad de producción de 1,03 ton  $H_2$ /año  $km^2$ , energéticamente equivalente a  $9,85 \times 10^8$  litros de gasolina y  $8,5 \times 10^8$  litros de diésel, igual al 43 % y 27 % de sus volúmenes importados por Ecuador en el año 2013 y su potencial uso en vehículos movidos por celdas de combustible evitaría la emisión de  $5,4 \times 10^6$  ton  $CO_2$ /año, contribuyendo a su mitigación en el sector con mayor aporte a las emisiones contaminantes del país. Se concluye que la obtención de  $H_2$  a partir de energía solar fotovoltaica en el Ecuador, es una opción potencialmente atractiva y que amerita estudios más detallados de factibilidad y viabilidad.

**Palabras clave**— energía solar fotovoltaica, producción de hidrógeno, electrólisis, celdas de combustible

### Abstract

A preliminary assessment of electrolytic hydrogen that would be obtained using solar photovoltaic resource is made in Ecuador. The baseline information is the annual PV electricity generated in the mainland provinces and calculated by filtering information from Solar Atlas of Ecuador. It is obtained that Guayas province has the highest potential in generation,  $8,73 \times 10^8$  kWh/year, and potential in production,  $1,58 \times 10^7$  kg  $H_2$ /year. While the province of Loja has the highest density of production, 1,15 ton  $H_2$ /year/ $km^2$ . The total annual production of  $H_2$  for Ecuador is  $2,55 \times 10^8$  kg  $H_2$ /year, with a density production of 1,03 ton  $H_2$ /year/ $km^2$ , equivalent to  $9,85 \times 10^8$  liters of gasoline, and  $8,5 \times 10^8$  of diesel, equal to 43 % and of 27 % of their imported volumes by Ecuador in 2013, and its potential use in fuel cell-powered vehicles would avoid the emission of  $5,4 \times 10^6$  ton  $CO_2$ /year, contributing to its mitigation in the sector with the highest contribution to the country's emissions. It is concluded that  $H_2$  production from PV in Ecuador, is a potentially attractive option and requires more detailed feasibility and viability studies.

**Index terms**— solar photovoltaic energy, hydrogen production, electrolysis, fuel cell

Recibido: 14-12-2014, Aprobado tras revisión: 24-12-2015

Forma sugerida de citación: Posso, F.R.; Sánchez, J. P. y Siguencia, J. (2016). "Estimación del potencial de producción de Hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica en Ecuador". Revista Técnica "energía". N° 12, Pp. 373-378.

ISSN 1390-5074.

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización del  $H_2$  como medio vector energético está siendo considerada cada vez con mayor intensidad como una alternativa idónea a los combustibles fósiles, cuya utilización masiva ha derivado en graves consecuencias ambientales, lo cual, aunado a la certeza del agotamiento de las reservas de petróleo y gas en el mediano plazo, hacen no sustentable al actual sistema energético mundial basado en el aprovechamiento de tales fuentes [1]. Sin embargo, para que el  $H_2$  sea la base de un sistema energético sustentable y distribuido, es imperativo que se obtenga desde fuentes renovables de energía, en el marco del sistema energético Solar-Hidrógeno, SESH. En el caso de que la energía solar directa sea la fuente primaria, la potencia eléctrica fotovoltaica, FV, generada se destina a la producción de  $H_2$  por electrólisis [2].

Una etapa previa clave a la implantación del SESH en un país o región es estimar la cantidad de  $H_2$  que potencialmente se pudiese obtener a partir de las ER con suficientes potenciales que hagan viable técnica y económicamente el desarrollo del SESH. En el caso de la energía solar FV, las estimaciones del potencial de  $H_2$  que se obtendría a partir de ella, se han llevado a cabo en varios países, EE. UU [3], Argentina [4], Venezuela [5], Brasil [6], y constituyen referentes para este estudio que tiene como propósito hacer una evaluación preliminar del potencial de producción de  $H_2$  a partir del aprovechamiento del potencial FV del Ecuador. Esta cuantificación sería el punto de partida de estudios más detallados en aquellos casos donde un suficiente potencial de producción de  $H_2$  de origen FV geográficamente localizado, se conjugue con un posible uso final, configurando un nicho de oportunidad de penetración del  $H_2$  en la matriz energética del país, contribuyendo a su diversificación, basada en la preeminencia de las ER, hacia lo cual se orienta la política energética del Estado ecuatoriano. Además de contribuir a la mitigación de los gases de efecto invernadero, GEI, por la sustitución de fuentes secundarias fósiles

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Estimación de la energía solar aprovechable

La información base para la estimación de la cantidad de  $H_2$  de origen solar FV, es el Atlas Solar del Ecuador, elaborado a partir de registros de la insolación diaria sobre una superficie horizontal

en celdas de aproximadamente  $40 \text{ km}^2$  de superficie, provenientes del Nacional Renewable Energy Laboratory, NREL, de EE. UU. Los datos representan los promedios mensuales y anuales de los valores diarios de insolación directa, difusa y global, expresados en  $\text{Wh/m}^2\text{día}$ , correspondientes a las 472 celdas que cubren el territorio continental ecuatoriano. Luego, mediante un procedimiento de interpolación estadística se refina la resolución hasta obtener celdas de  $1 \text{ km}^2$  con valores para cada tipo de las insolaciones, representadas en mapas mensuales y anuales promedio [7], tal como el que se muestra en la Figura 1.

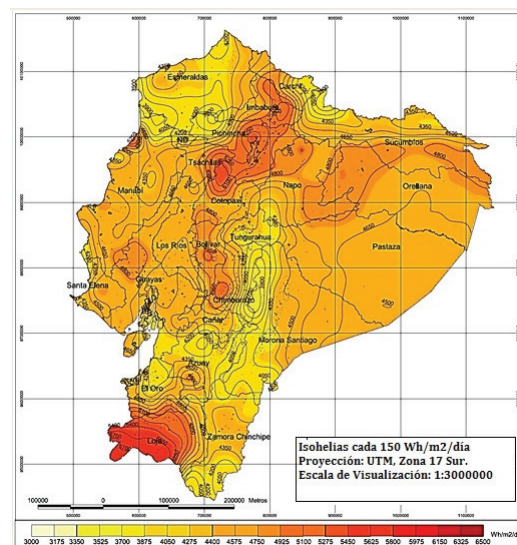


Figura 1: Mapa Insolación global anual promedio del Ecuador

La energía eléctrica que se pudiese generar en módulos FV, a partir de los valores promedio de la insolación global, se obtiene de la especificación de un conjunto de parámetros que intervienen en su cálculo. El primero es el área disponible,  $A_d$ , para la instalación y operación de los parques solares; en este caso, las restricciones tienen que ver con las áreas geográficas protegidas, cuerpos de agua, y especialmente los centros urbanos y poblaciones diseminadas, siendo la densidad de población un indicador importante para asumir un valor de  $A_d$ . Así, para EE. UU. se ha tomado un valor del 3 % [3]; mientras que para Argentina se ha optado por 4,5 % [4]. En este estudio se ha asumido un valor de  $A_d$  del 2 %, considerando que la densidad de población del Ecuador es, aproximadamente, el doble de la de EE. UU. y el triple de la de Argentina [8]. La eficiencia de la conversión FV,  $\eta_{FV}$ , se ha tomado igual al 17 %, valor promedio de la oferta comercial de módulos FV consultada [9]. La expresión para el cálculo de la energía aprovechable de origen solar FV por provincia es:

$$E_{fv} \text{ (kWh/año)} = \frac{I_{PA} \times \eta_{fv} \times A_P \times F_{AP}}{365 \times 10} \quad (1)$$

Donde  $I_{PA}$  es la insolación global anual promedio por provincia, obtenida mediante un proceso de filtrado de la data de la insolación global para todo el territorio continental ecuatoriano, siendo esta cuantificación un aporte de este estudio. Por su parte, el valor numérico ‘10’ es un factor de conversión entre las unidades de las diferentes variables presentes en (1)

El mapa de la distribución provincial de la energía eléctrica FV se muestra en la Figura 2, apreciando, como era de esperar, que las provincias de las regiones Costa y Oriente, poseen los mayores valores de generación eléctrica FV.

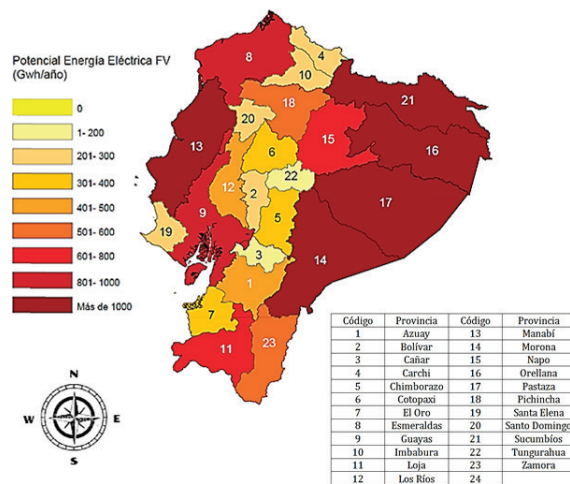


Figura 2: Energía eléctrica fotovoltaica por provincia (Gwh/año)

## 2.2. Producción del H<sub>2</sub> FV

Una vez conocida la disponibilidad de energía eléctrica, la producción de H<sub>2</sub> por electrólisis se lleva a cabo en un electrolizador PEM, con una eficiencia,  $\eta_e$ , del 75 %, con base en el Valor Calorífico Superior del H<sub>2</sub>, que incluye los sistemas de admisión y purificación de los gases, sistemas de control y equipos auxiliares. Finalmente, se asume una disponibilidad de la planta de electrólisis,  $F_D$ , del 95 %. Todas estas especificaciones se han tomado de varios estudios sobre este modo de producción del H<sub>2</sub> [5, 6, 10]. Así, la ecuación que determina la cantidad de H<sub>2</sub> es:

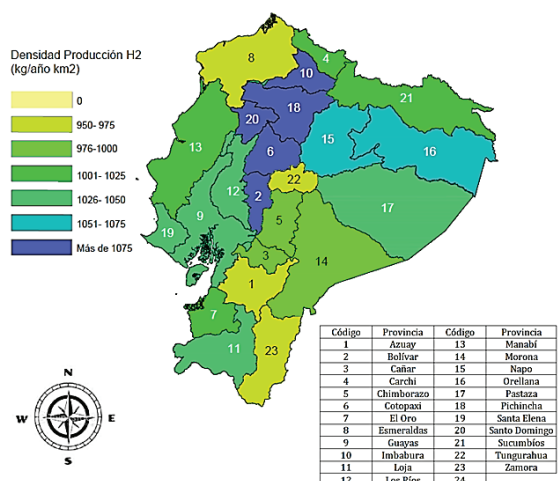
$$P_{H_2} = (E_{fv} \times \eta_e \times F_D) / HHV \quad (2)$$

La producción de H<sub>2</sub> por provincia y total nacional se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Producción de H<sub>2</sub> FV por provincia y total

Provincia	P <sub>H<sub>2</sub></sub> (kg H <sub>2</sub> /año)
Azuay	8,00 × 10 <sup>6</sup>
Bolívar	4,25 × 10 <sup>6</sup>
Cañar	3,14 × 10 <sup>6</sup>
Carchi	3,85 × 10 <sup>6</sup>
Chimborazo	6,46 × 10 <sup>6</sup>
Cotopaxi	6,58 × 10 <sup>6</sup>
El Oro	5,83 × 10 <sup>6</sup>
Esmeraldas	1,50 × 10 <sup>7</sup>
Guayas	1,58 × 10 <sup>7</sup>
Imbabura	4,95 × 10 <sup>6</sup>
Loja	1,27 × 10 <sup>7</sup>
Los Ríos	7,52 × 10 <sup>6</sup>
Manabí	1,82 × 10 <sup>7</sup>
Morona	2,36 × 10 <sup>7</sup>
Napo	1,33 × 10 <sup>7</sup>
Orellana	2,29 × 10 <sup>7</sup>
Pastaza	3,06 × 10 <sup>7</sup>
Pichincha	1,03 × 10 <sup>7</sup>
Santa Elena	3,80 × 10 <sup>6</sup>
Sto. Domingo	4,06 × 10 <sup>6</sup>
Sucumbios	1,85 × 10 <sup>7</sup>
Tungurahua	3,29 × 10 <sup>6</sup>
Zamora	1,02 × 10 <sup>7</sup>
<b>Total</b>	<b>2,55 × 10<sup>8</sup></b>

La correspondiente densidad de producción provincial de H<sub>2</sub> se muestra en la Figura 3, apreciando que las provincias ubicadas en la región Sierra Central: Bolívar, Cotopaxi, Santo Domingo, Pichincha e Imbabura ofrecen los mayores valores de densidad, aunque no son las mayor producción de H<sub>2</sub>.

Figura 3. Densidad de producción de H<sub>2</sub> FV por provincia

### 2.3. Usos Finales del H<sub>2</sub>

Se propone el uso del H<sub>2</sub> en el sector del Transporte, altamente intensivo en consumo de combustibles fósiles y, consecuentemente, en la emisión de gases de efecto invernadero, GEI, tal que representan el 49 % del consumo total y el 43 % del total de emisiones de GEI para el año 2013 [11].

La estimación de la sustitución de la gasolina y diésel por H<sub>2</sub> en vehículos movidos por pilas de combustible, parte de la equivalencia energética entre estos vectores de energía, con base en el Valor Calorífico Inferior de cada uno de ellos [11]; y también del consumo de los primeros en las provincias del territorio continental de Ecuador, asumiendo que es igual al promedio anual del despacho de gasolina y diesel a las provincias [12]. Las equivalencias energéticas y la expresión utilizada para cuantificar el porcentaje de sustitución son entonces:

$$1 \text{ kg H}_2 \text{ (líquido)} = 3,752 \text{ l gasolina} = 3,33 \text{ l diesel} \quad (3)$$

$$\% \text{ sustitución} = (P_{\text{H}_2} / P_{\text{H}_{2\text{eq}}}) \times 100 \quad (1)$$

Los resultados de tal sustitución se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de sustitución del diésel y gasolina por H<sub>2</sub> en las provincias

Provincia	% Sustitución Diésel	% Sustitución Gasolina
Azuay	12	13
Bolívar	42	51
Cañar	12	23
Carchi	31	30
Chimborazo	22	22
Cotopaxi	16	23
El Oro	8	12
Esmeraldas	49	54
Guayas	4	6
Imbabura	12	17
Loja	36	47
Los Ríos	11	19
Manabí	14	22
Morona	211	340
Napo	73	218
Orellana	42	258
Pastaza	400	492
Pichincha	5	4
Santa Elena	12	20
Sto. Domingo	9	13
Sucumbios	16	149
Tungurahua	9	7
Zamora	129	256
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>24</b>

De estos resultados puede estimarse un porcentaje de sustitución promedio nacional del 88 % para la gasolina y del 50 % para el diésel; sin embargo, este promedio no es homogéneo sino con amplias diferencias, ya que en el caso del diésel existen 3 provincias con porcentajes muy por encima del 100 %, mientras que para la gasolina hay 6 provincias en la misma condición. También debe mencionarse que en las dos provincias del país con mayor consumo (Guayas y Pichincha) el nivel de sustitución es mínimo.

Un indicador más adecuado para evaluar el efecto favorable de la incorporación del H<sub>2</sub> FV en la oferta energética del país, considera la sustitución de volúmenes importados de la gasolina y diésel. En este caso, la producción de H<sub>2</sub> equivale energéticamente a  $9,6 \times 10^8$  l de gasolina, que a su vez asciende al 43 % de su importación en el año 2013

[11], mientras que en el caso del diésel, el H<sub>2</sub> FV es equivalente a 8,5×10<sup>8</sup> l del mismo, representando el 24 % de su importación. En ambos casos, la utilización del H<sub>2</sub> implicaría un ahorro significativo de divisas para el país, tomando en cuenta además que ambos combustibles se expenden a una tarifa subsidiada al usuario final [13].

Otra dimensión a considerar en el uso final propuesto para el H<sub>2</sub> es la ambiental, ya que las cantidades de gasolina y diésel a reemplazar implica evitar la emisión de GEI, en un volumen total de 5,4 × 10<sup>6</sup> ton CO<sub>2</sub> equivalentes, el cual a su vez representa alrededor del 12 % del total de las emisiones de GEI del Ecuador atribuibles a la actividad energética [11].

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha estimado el potencial de producción de H<sub>2</sub> electrolítico en Ecuador con la electricidad necesaria proveniente del aprovechamiento del recurso solar directo de tipo FV. La estimación del H<sub>2</sub> a producir en cada provincia del territorio continental muestra una amplia variabilidad, lo cual está a tono con la naturaleza distribuida de la insolación solar. La utilización del H<sub>2</sub> en el sector del Transporte, sustituyendo la gasolina o diésel, indica la presencia de varias provincias del territorio continental en los cuales se satisface toda la demanda de energía para movilidad e incluso con importantes volúmenes de H<sub>2</sub> remanente que podrían ser destinado a otros fines energéticos y no energéticos, configurando nichos de oportunidad de penetración del H<sub>2</sub> como fuente secundaria de energía en la matriz energética del Ecuador. Los beneficios económicos y ambientales que aporta esta potencial sustitución ameritan estudios de viabilidad técnica y factibilidad económica en las provincias referidas, que serán objeto de un próximo estudio

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera especial al Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador por su patrocinio a este trabajo

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Cipriani, V. Di Dio, F. Genduso, D. La Cascia, R. Liga, R. Miceli, G. Ricco “Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications”. *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol 39, pp. 8482-8494, 2014.
- [2] M. Šingliar “Solar energy using for hydrogen production”, *Petroleum&Coal*, Vol 49, pp. 40-47, 2007.
- [3] M. Melaina, M. Penev, and D. Heimiller, “Resource Assessment for Hydrogen Production”. National Renewable Energy Laboratory, Golden CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-5400-55626, Sep. 2013
- [4] A. Sigal, E. Leiva, C. Rodríguez, “Assessment of the potential for hydrogen production from renewable resources in Argentina”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol 39, pp. 8204-8214, 2014.
- [5] F. Posso, J. Zambrano, “Estimation of electrolytic hydrogen production potential in Venezuela from renewable energies”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol 39, pp. 11846-11853, 2014.
- [6] E. Da Silva, A. Marin Neto, P. Ferreira, J. Camargo, F. Apolinario, C. Pinto, “Analysis of hydrogen production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil”, *Solar Energy* Vol 78, pp. 670–677, 2005
- [7] (2008) “Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica”. Consultado Marzo 2015. Disponible en [http://www.conelec.gob.ec/archivos\\_articulo/Atlas.pdf](http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf)
- [8] Web site: [http://www.inec.gob.ec/cpv/descargables/fasciculo\\_nacional\\_final.pdf](http://www.inec.gob.ec/cpv/descargables/fasciculo_nacional_final.pdf). (2014) Consultado Junio 2015.
- [9] Web site: <http://www.wholesalesolar.com> Consultado Junio 2015
- [10] K. Richa, D. Buddhi, R.L. Sawhney. “Comparison of environmental and economic

aspects of various hydrogen production methods”, *Ren. and Sust. Energy Rev.* Vol 12, pp. 553–563, 2008

- [11] F. Posso, J. L. Espinoza, J. Sánchez, J. Zalamea, “Hydrogen from hydropower in Ecuador: Use and impacts in the transport sector” *Int. J. Hydrogen Energy.* Vol 40, pp. 15443-15447, 2015

- [12] “Balance Energético Nacional 2014”. Web site: [www.sectoresestrategicos.gob.ec](http://www.sectoresestrategicos.gob.ec) Consultado Junio 2015

- [13] Banco Central de Ecuador. Ingresos y egresos: comercialización interna de derivados importados. Web site: <http://www.bce.fin.ec/index.php/informacion-estadistica> Consultado Junio 2015



**Jorge Marcelo Sigüencia.-** Ingeniero Químico de la Universidad de Cuenca. Magister en Planificación y Gestión Energéticas de la Universidad de Cuenca. Doctorando en Ingeniería Química y del Medio Ambiente, Universidad de Zaragoza. Investigador de la Universidad de Cuenca.



**Fausto Rene Posso. –** Ingeniero Químico por la Universidad de Los Andes de Venezuela. Doctor Ingeniero Industrial por la UNED, España. Investigador Prometeo en la Universidad de Cuenca. Líneas de investigación: sistemas energéticos renovables.

El hidrógeno como vector de energía. Modelado y simulación de procesos.



**Johanna Patricia Sánchez.-** Ingeniero Químico de la Universidad de Cuenca. Magister en Planificación y Gestión Energéticas de la Universidad de Cuenca. Doctorando en Ingeniería Química y del Medio

Ambiente, Universidad de Zaragoza, España. Catedrática e investigadora de la Universidad de Cuenca. Contraparte Universitaria del Proyecto Prometeo. Coordinadora Nacional de la Red de Investigación de Hidrógeno y Celdas Combustibles del Ecuador. Líneas de Investigación: Biomasa, Hidrógeno, Planificación y Gestión Energética.