

**ESTIMACIÓN DEL HIDRÓGENO PRODUCIDO POR UN ELECTROLIZADOR PEM A PARTIR DE LA RADIACIÓN SOLAR EN ZACATECAS.**

S. M. Durón-Torres<sup>1</sup>, L.E. Villagrana-Múñoz<sup>1</sup>, V.M. García-Saldivar<sup>1</sup>, L.G. Arriaga-Hurtado<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Universitario Siglo XXI, Edif. 6, Km. 6 Carretera Zacatecas-Guadalajara, Ejido la Escondida, 98160, Zacatecas.

<sup>2</sup>Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Parque Tecnológico Querétaro, Sanfandila, Pedro Escobedo, Qro. C.P. 76703.

Tel: (492) 9256690 ext. 6202, E-mail: [durosm@prodigy.net.mx](mailto:durosm@prodigy.net.mx)

**RESUMEN**

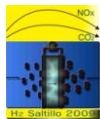
En este trabajo se presenta el cálculo de la cantidad de hidrógeno que se obtendría, empleando un electrolizador de membrana de intercambio de protones tipo, tomando como base las medidas realizadas en la Estación Solarimétrica del Campus Siglo XXI en la Universidad Autónoma de Zacatecas. El análisis de la radiación solar se realizó en el periodo de Noviembre de 2007 a Abril de 2008 correspondiendo a la época de menor radiación solar. La cantidad de irradiación promedio medida fue de 6.6 kW-h/ m<sup>2</sup>. La evaluación del Sistema solar-hidrógeno se realizó mediante regresiones lineales del comportamiento del Flujo de Hidrógeno en LN/min contra la Irradiancia Solar en W/m<sup>2</sup> para un electrolizador tipo PEM. Los resultados obtenidos indican que se tiene una máxima producción de hidrógeno para el mes de abril con un valor de producción de hidrógeno de 9 LN /min, a una intensidad de radiación cercana a 900 W/m<sup>2</sup> y un mínimo de 6 LN/min para una radiación cercana a 600 W/m<sup>2</sup> en el mes de diciembre. Con base a estos resultados, podemos prever una cantidad de hidrógeno entre 6 y 9 LN/min generados en el estado de Zacatecas, como valores mínimos a generar durante todo el año, ya que los meses evaluados son los de menor radiación solar. Las mediciones realizadas en la Estación Siglo XXI demuestran que el potencial medido de radiación solar es superior a la media nacional y mundial, lo que hace de Zacatecas un estado estratégico para la utilización de esta energía renovable. Las cantidades calculadas de hidrógeno producido indicarían que es factible el establecimiento en esta región de sistemas solar-hidrógeno para la obtención de este vector energético empleando electrolizadores tipo PEM.

### 1.- Introducción

En la actualidad, los requerimientos energéticos globales siguen dependiendo casi en su totalidad de los combustibles fósiles. El empleo desmedido de estos combustibles ha generado muchos de los problemas actuales de contaminación ambiental y contribuido de manera principal al controvertido cambio climático. Con la finalidad de disminuir el consumo de combustibles fósiles y su nocivo impacto ambiental, ha sido sugerido el empleo del hidrógeno como vector energético, que además de su alto contenido energético por unidad de masa, presenta una alta eficiencia de conversión energética, gran reciclabilidad y compatibilidad con las fuentes alternas de energía. Desde la década de 1980, el concepto de Energía del Hidrógeno ha sido manejado como una alternativa plausible hacia la generación limpia de energía, al ser este gas un combustible que no genera  $\text{CO}_2$  ni otros subproductos tóxicos que contribuyen al efecto invernadero y a la polución. El concepto de uso del hidrógeno como una alternativa energética ambientalmente amigable, se complementa con su producción a partir de fuentes de energía renovables como la solar, eólica, hidráulica y biomasa.<sup>1-3</sup> De las diferentes formas de producción de hidrógeno, la electrólisis parece ser la que mayores ventajas presenta al ser acoplable a sistemas de paneles solares o aerogeneradores para la obtención de la electricidad necesaria para la escisión de la molécula de agua, además de estar relacionada a una forma distribuida de producción del gas que evitaría en principio algunos de sus problemas de transporte.<sup>4-7</sup> El agua puede posteriormente ser regenerada empleando el hidrógeno en celdas de combustible, completado así el ciclo del hidrógeno-agua. El costo estimado de obtención del  $\text{H}_2$  a partir de energía solar sigue siendo alto para ser competitivo con los combustibles fósiles actualmente empleados, pero se considera que en un futuro próximo con el desarrollo continuo de la tecnología y un incremento en el uso de las fuentes alternas, los costos de producción pueden ser abatidos hasta ser equivalentes a los de producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos.<sup>8</sup>

Un sistema Solar-Hidrógeno (SH) usualmente consiste en suministrar energía eléctrica a un electrolizador generador de hidrógeno por un arreglo de paneles solares (Sistema Fotovoltaico SFV). El acoplamiento de este tipo de sistemas debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Debe suministrar un voltaje mínimo, para llevar a cabo la disociación del agua (generación de hidrógeno y oxígeno), teóricamente 1.23 V vs ENH.
- Debe contener un mínimo de sistemas auxiliares, tal que la eficiencia global no se vea afectada (minimizar el acondicionamiento de potencia y otros dispositivos).
- Cada subsistema debe trabajar en sus puntos de máxima potencia (electrolizador y sistema fotovoltaico), con el fin de alcanzar la máxima eficiencia<sup>6</sup>.



Comúnmente los sistemas SH usan baterías y convertidores electrónicos de potencia CD-CD (sistemas auxiliares), para modular y ajustar el voltaje suministrado al electrolizador<sup>9-16</sup>.

México al ser un país que presenta altos índices de radiación solar, representa un espacio adecuado para el desarrollo de sistemas SH. El estado de Zacatecas en particular, está situado en una franja de máximos de energía solar y como una medida de impulsar el empleo de las energías alternativas, se han estado realizando en los últimos años, una serie de mediciones locales de irradiancia con el fin de tener medidas solares puntuales para implementar sistemas específicos de aprovechamiento de la energía solar. En este trabajo, se presenta la evaluación del volumen teórico de hidrógeno que puede ser obtenido, tomando como base un sistema SH previamente caracterizado en el IIE y las mediciones de irradiancia realizadas en la Estación Solarimétrica del Campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Se concluye que con la irradiancia medida podrían ser obtenidas cantidades importantes del vector energético al emplear un sistema SH similar al usado para el cálculo.

### 2.- Condiciones experimentales

Las mediciones solares fueron realizadas en la estación solarimétrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas está ubicada en el Campus Siglo XXI, en el km 6 de la carretera Zacatecas – Guadalajara, en Zacatecas, Zacatecas. En dicha estación, se mide y registra la radiación solar global y directa, la temperatura y la precipitación pluvial.

La estación solarimétrica cuenta con dos piranómetros CMP 22 (Kipp & Zonen) con sensor de temperatura. La ubicación de los piranómetros es: 22°46'350" Latitud Norte para ambos, y 102°38'615" Longitud Oeste para el piranómetro que mide la radiación global, y 102°38'619" Longitud Oeste para el piranómetro con aro de sombreado M 121 (Kipp & Zonen) para medir la radiación difusa, según se muestra en las figuras 1a y 1b. Ambos piranómetros están ubicados a una altura sobre el nivel del mar de 2,325 m, libre de obstáculos que impidan la incidencia de radiación solar. Adicionalmente la estación cuenta con un pluviómetro TE525 de Campbell Scientific. El sistema de adquisición (lectura y almacenamiento) de datos se realizó mediante un "DataLogger" CR1000 de Campbell Scientific, mismo que fue alimentado por un sistema fotovoltaico autónomo, a través de una fuente de alimentación y un regulador de corriente. Los datos fueron almacenados en un módulo de memoria flash CFM100 de Campbell Scientific.

El sistema de adquisición de datos hace mediciones cada 10 s, promediando y registrando los valores de las variables medidas cada minuto. Se cuenta con una base de datos e información a partir del 18 de octubre de 2007. En este trabajo fueron empleadas las mediciones de energía solar realizadas a lo largo de un semestre,



**Figura 1.** a). Piránometro para radiación Global, b). Piranómetro con aro de sombreado para radiación difusa.

de noviembre de 2007 a abril de 2008, considerados los meses de menor irradiancia.

El sistema SH empleado para la estimación de la cantidad de hidrógeno, es un sistema fotovoltaico (SFV) que se encuentra ubicado físicamente en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), localizado en Cuernavaca, Morelos, que consta de 30 módulos fotovoltaicos marca Siemens SP75 y 6 módulos fotovoltaicos marca Shell SP75 de silicio monocristalino, tiene una inclinación de  $18.8^\circ$  de acuerdo con la latitud del lugar, orientados hacia el sur para optimizar la captación de energía, ambas marcas manejan las mismas dimensiones en sus módulos y mismas características. El SFV tiene una capacidad de 2.7 kWp STC (a condiciones estándar de prueba) con un rango de variación de  $\pm 10\%$  especificado por el fabricante. Sin embargo opera alrededor de 1.2 a 1.3 kW, debido a las bajas eficiencias de este tipo de sistemas y a las condiciones de presión y temperatura de la región.

Las dimensiones de cada modulo fotovoltaico son: ancho: 0.5 m y largo: 1.2 m. Proporcionando un área efectiva de  $0.6 \text{ m}^2$ . Con esto el SFV de 36 módulos fotovoltaicos tiene un área efectiva total de  $21.6 \text{ m}^2$ . Si se considera una radiación solar promedio de  $686.5 \text{ W/m}^2$  medida de acuerdo a los datos obtenidos, se cuenta con eficiencias de los módulos fotovoltaicos de aproximadamente: 7.72 %.

El generador de hidrógeno Hogen ® 40, es un equipo comercial fabricado por Proton Energy Systems. Genera hidrógeno seco de 99.999% de pureza desechando el oxígeno húmedo a la atmósfera, pudiendo generar hasta  $1 \text{ N m}^3/\text{hr}$ . La parte encargada de llevar a cabo esta generación de hidrógeno es el stack de celdas electrolíticas de tecnología tipo ESP (Electrolito Sólido Polimérico). Este sistema trabaja automáticamente mediante sensores de presión, flujo, y temperatura, así como suministro de agua (entrada y recirculación),

fuentes de energía eléctrica y un controlador. El voltaje nominal del electrolizador es de 50 V distribuido en 25 celdas electrolíticas conectadas en serie, y sólo una en paralelo para mantener a cada celda con la misma corriente. A las condiciones reales de operación, el sistema SH trabaja con aproximadamente 42.7 volts repartido en las 25 celdas electrolíticas, con este voltaje es suficiente para que opere el sistema. La presión a la que puede trabajar el electrolizador a la salida del lado del hidrógeno es de hasta 200 psi (13.78 bar), en el sistema solar - hidrógeno se le suministra agua a una presión de 40 psi (2.75 bar) por la bomba, además que opera a presión atmosférica a la salida de los gases.

## 3.- Resultados y discusión

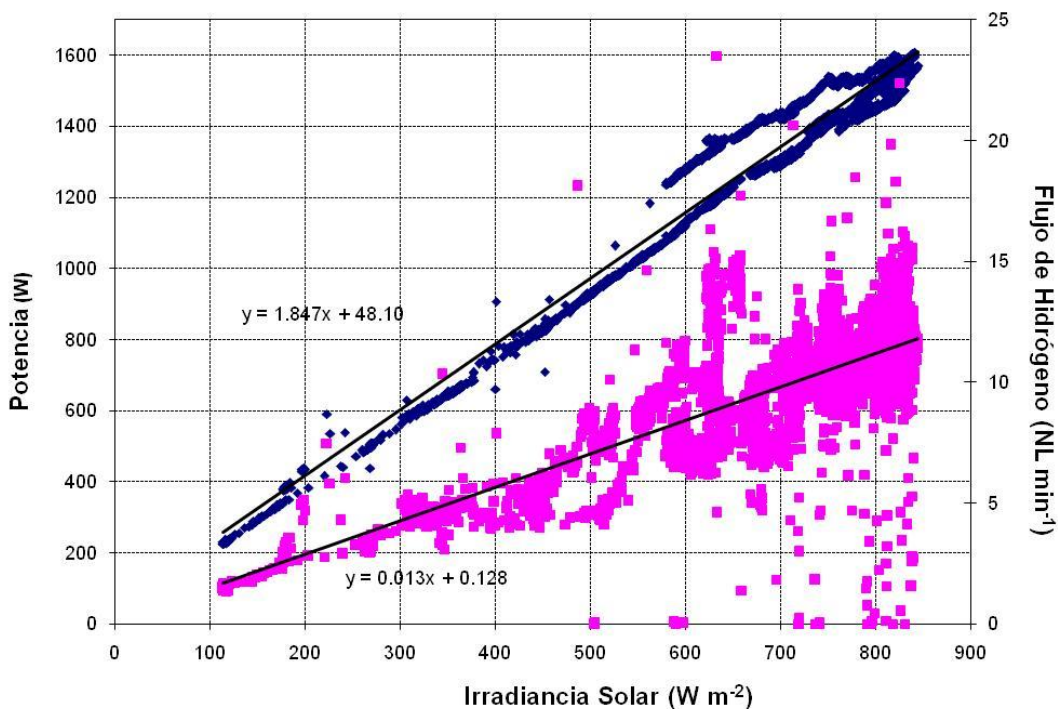
La caracterización del sistema SH empleado para la estimación aquí presentada, ya ha sido previamente publicada <sup>17</sup>. De manera breve sus características principales se muestran en la Tabla 1 y un diagrama típico de la relación de irradiancia respecto a la cantidad de hidrógeno generado en el sistema se muestra en la Figura2. A partir de varias mediciones y realizando un análisis estadístico ponderado se obtuvo por regresión lineal la siguiente ecuación que representa la cantidad de hidrógeno obtenida respecto a la irradiancia:

$$Q_H = bG + a \quad (1)$$

donde  $Q_H$  es el flujo de hidrógeno en  $\text{NL min}^{-1}$  y  $G$  la irradiancia en  $\text{W m}^{-2}$ . Siendo los valores de los parámetros de regresión:  $b = 0.01384 \pm 0.00039$  y  $a = 0.13 \pm 0.28$ .

**Tabla I.** Valores experimentales promedio por día del sistema Solar-Hidrógeno

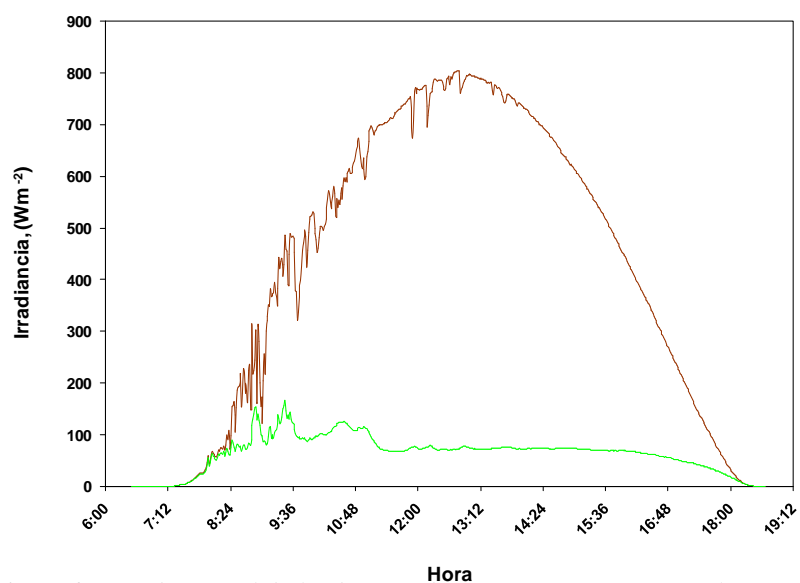
	Unidades	Promedio
Irradiancia (G)	$\text{W/m}^2$	688.33
Potencia (P)	W	1316.18
Corriente (I)	A	30.64
Votaje (V)	V	42.82
Temperatura del electrolizador (Ts)	°C	43.08
Temperatura Ambiente (Ta)	°C	32.51
Temperatura del panel (Tp)	°C	51.17
Flujo de hidrógeno ( $Q_H$ )	LN/min	9.10
Producción de hidrógeno por día	LN	3691.27
Consumo de Agua	L	2.21



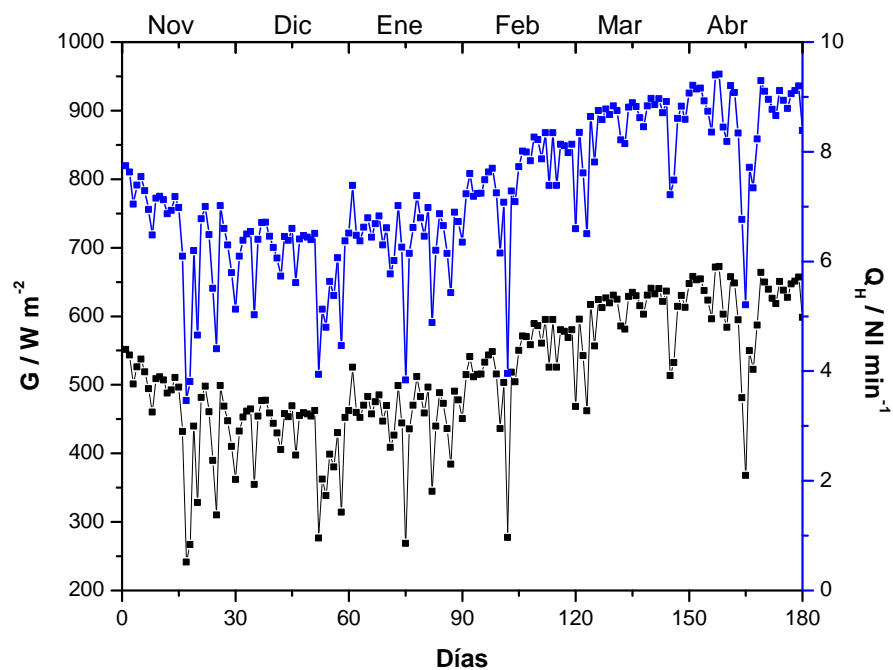
**Figura 2.** Potencia y flujo de hidrógeno obtenidos por el sistema SH en una medición típica.

Para la estimación de la cantidad teórica de hidrógeno, fueron usados los datos medidos de irradiancia durante 180 días en la Estación solarimétrica Siglo XXI de la UAZ<sup>18</sup>. Como ejemplo de las mediciones realizadas, en la Figura 3 se muestran las irradiancias global y difusa de un día del mes de enero de 2008. De esta información es posible calcular el valor promedio de la irradiancia. Así para los datos mostrados en la Figura 3, el valor máximo fue cercano a 800 W/m<sup>2</sup> y para ese día, el valor promedio calculado de irradiancia es de 452 W/m<sup>2</sup> y la irradiación fue de 18.2446 MJ/m<sup>2</sup>.

De manera similar fueron analizados los 180 días de noviembre de 2007 hasta abril de 2008, obteniéndose los promedios diarios de irradiancia. El comportamiento global acumulado se muestra en la Figura 4 (puntos en negro), donde podemos observar una tendencia general de aumento de la irradiancia al pasar de los meses de invierno a los de primavera. La dispersión mostrada en los promedios, es un claro indicador de la variabilidad de la energía solar recibida debido a las condiciones climatológicas y atmosféricas.

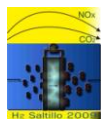


**Figura 3.** Irradiación global y difusa 2 de enero 2008. Campus Siglo XXI UAZ.



**Figura 4.** Irradiancia promedio diaria ( $G$ , en negro) medida en la estación Solarimétrica Siglo XXI y flujo de hidrógeno calculado ( $Q_H$ , en azul).





En la misma figura se muestra la cantidad de hidrógeno estimada correspondiente a las irradiancias promedio, calculada como el flujo normal de hidrógeno a partir de la ecuación de regresión (1). La tendencia del flujo estimado del gas obtenido por electrólisis sigue un comportamiento similar al de la irradiancia, como era de esperarse debido a la linealidad de la ecuación de simulación. De acuerdo a estos cálculos, podemos esperar flujos de hidrógeno, sin tomar en cuenta los extremos mínimos, de entre 6 a 9 LN min<sup>-1</sup>, si fuese empleado un sistema SH similar al caracterizado. Estos flujos de hidrógeno podrían ser obtenidos, de acuerdo a la caracterización del sistema SH<sup>17</sup>, a partir de 1.5 y 2.2 litros de agua respectivamente.

#### 4.- Conclusiones

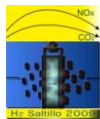
Los datos obtenidos en la Estación Solarimétrica de la UAZ nos ha permitido la accesibilidad a información confiable para la evaluación del recurso renovable solar expresado como hidrógeno. El potencial medido de radiación solar es superior a la media nacional y mundial, lo que hace de Zacatecas un estado estratégico para la utilización de esta energía renovable. Por otra parte, aún y cuando las mediciones son realizadas en el Campus Universitario Siglo XXI, un lugar cercano a la Cd. de Zacatecas, las mediciones realizadas son fácilmente extrapolables a otras regiones del estado, sobre todo a la zona norte y noreste del estado. Para efectos de comparación de acuerdo a los datos del Instituto Nacional de Medio Ambiente de España, en la provincia de Almería, sede y centro de desarrollo en la aplicación y aprovechamiento del recurso solar, la irradiación media es de 351.135 MJ/m<sup>2</sup> (3.06 kWh/m<sup>2</sup>d) para el mes de enero del 2005, para un promedio diario de 8.5 hr de radiación solar<sup>19</sup>. Por otra parte, la radiación que se recibe en el Campus Siglo XXI de la UAZ, es superior, haciendo una comparación para el mismo mes del año 2008, durante el cual la irradiación mensual total fue de 684 MJ/m<sup>2</sup> (6.33 kWh/m<sup>2</sup>d) un valor que es casi el doble con respecto al valor de Almería en España.

Las cantidades de flujo de hidrógeno producido, entre 6 y 9 LN min<sup>-1</sup> indicarían que es factible el establecimiento en esta región de sistemas Solar-Hidrógeno para la obtención de este vector energético empleando electrolizadores tipo PEM.

#### 5.- Agradecimientos

Los autores externan su gratitud al Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Zacatecas proyectos 16112 y 16821 y al Proyecto P/PIFI 2007-33-07 por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de este trabajo.





## 6.- Referencias

- <sup>1</sup>D. Dasa and T. N. Veziroglu, *Int J Hydrogen Energy* 26 (2001) 13.
- <sup>2</sup>V. A. Goltsova and T. N. Veziroglu, *Int J Hydrogen Energy* 26 (2001) 909.
- <sup>3</sup>M. Momirlana and T.N.Veziroglu, *Int J Hydrogen Energy* 30 (2005) 795.
- <sup>4</sup>G. Doucet, C. Etiévant, C. Puyenchet, S. Grigoriev and P. Millet, *Int J Hydrogen Energy* 34 (2009) 4983.
- <sup>5</sup>R.E. Clarke, S. Giddey, F.T. Ciacchi, S.P.S. Badwal, B. Paul and J. Andrews, *Int Hydrogen Energy* 34(2009) 2531.
- <sup>6</sup>L.G. Arriaga, W. Martinez, U. Cano and H. Blud, *Int J Hydrogen Energy* 32 (2007)2247.
- <sup>7</sup>P. Kruger, *Int J Hydrogen Energy*, 33 (2008) 5881.
- <sup>8</sup>J. O'M. Bockris and T. N. Veziroglu, *Int J Hydrogen Energy*, 32 (2007) 1605.
- <sup>9</sup>R.E. Clarke, S. Giddey, F.T. Ciacchi, S.P.S. Badwal and B. Paul, J. Andrews, *Int J Hydrogen Energy* 34 (2009) 2531.
- <sup>10</sup>P.Hollmuller, J. M.Joubert, B.Lachard and K. Yuan, *Int Journal of Hydrogen Energy* 25 (2000) 97.
- <sup>11</sup>A. Szyszka and W. Neuburg, *Int Journal of Hydrogen Energy* 19(1994) 823.
- <sup>12</sup>J.P. Vanhanen, P.D. Lund and J.S. Tolonen, *Int Journal of Hydrogen Energy* 23(1998) 267.
- <sup>13</sup>S. Galli, and M. Stefanoni, *Int Journal of Hydrogen Energy* 22 (1997) 453.
- <sup>14</sup>P. A. Lehmann, C. E.Chamberlin and G. Pauletto, *Int Journal of Hydrogen Energy* 22 (1997) 465.
- <sup>15</sup>A.Szyska, *Int Journal of Hydrogen Energy* 23(1998) 849.
- <sup>16</sup>H.Barthels, W. A.Brocke, K.Bonhoff, H. G.Groehn, G.Heuts, M.Lennartz, H. Mai, J.Mergel, L.Schmid and Ritzenhoff, *Int Journal of Hydrogen Energy* 23(1998) 295.
- <sup>17</sup>M.L. Gutiérrez-Sánchez, *Estudio y Simulación del comportamiento de un sistema Solar-Hidrógeno*, Tesis de Licenciatura, Universidad de Quintana Roo (2005).
- <sup>18</sup>L.E. Villagrana-Muñoz, *Cuantificación de Radiación Solar en Zacatecas (latitud 22° 46' n, longitud 102° 38' w) a partir de mediciones de radiación global y difusa (noviembre 2007-abril 2008)*, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Zacatecas (2008).
- <sup>19</sup>Irradiación Media en España. Instituto Nacional de Medio Ambiente. [www.aemet.es](http://www.aemet.es) (2008).