

## **DISEÑO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN Y USO DE HIDRÓGENO USANDO ENERGÍAS RENOVABLES**

I. Zeferino González<sup>1</sup>, B. Escobar Morales<sup>1</sup>, L. Torres Rivero<sup>1</sup>, M. A. Smit<sup>2</sup>, Y. Verde Gómez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Cancún, Av. Kabah Km. 3, Cancún, Q. R., México, 77500.

<sup>2</sup> Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 No. 130, Chuburná de Hidalgo, Mérida, Yucatán, México.

La posibilidad más eficiente y más respetuosa con el medio ambiente es la integración de las energías renovables con la tecnología del hidrógeno, que permite su producción, almacenamiento y posterior uso para la generación de electricidad. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema autónomo de generación de hidrógeno basado en energía solar-eólico y su uso en una celda de combustible, que permita demostrar la factibilidad técnica en el suministro de energía eléctrica en el estado de Quintana Roo. En el diseño del sistema híbrido hidrógeno-solar-eólico se incluyen los siguientes parámetros: capacidad del aerogenerador de acuerdo al potencial eólico de la región, determinación de paneles solares acordes al clima de la zona, requerimiento energético del electrolizador, selección de un sistema de almacenamiento del hidrógeno con la posibilidad de comprimir el gas, dimensionamiento de la celda de combustible tipo PEM, selección del acondicionador de potencia eléctrica de las fuentes de energía primaria y el consumo eléctrico diario de la carga que se desee alimentar, entre otros. La potencia estimada que debe entregar el sistema híbrido propuesto es de aproximadamente 1 kW. Se discutirán las consideraciones importantes para la selección de los componentes del sistema de acuerdo a las tecnologías disponibles en el mercado y se analizará la topología para la integración de cada elemento del sistema híbrido.

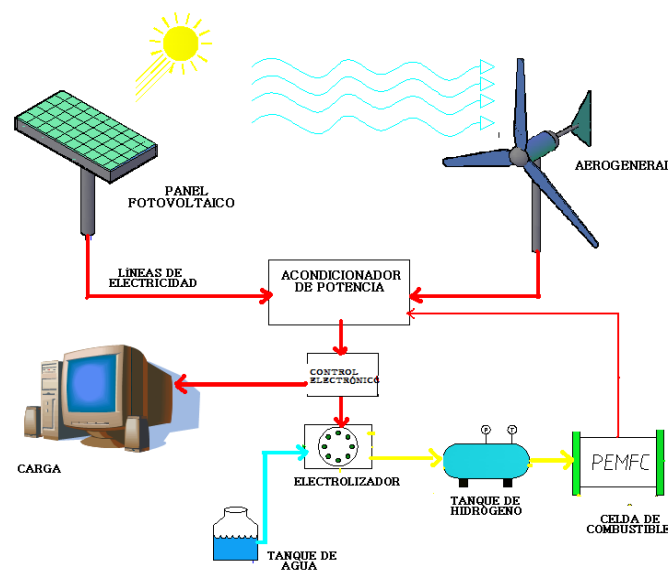
Palabras clave: sistema híbrido, hidrógeno, celdas de combustible, energía renovable.

## 1.- Introducción

Las fuentes de energía renovables son vistas como una alternativa de generación de energía. Esto no es sólo debido a la disminución de los combustibles fósiles, sino a los efectos que estos producen como contaminación del medio ambiente y el calentamiento global [1]. En el país se han identificado diferentes zonas con alto potencial energético renovable. El litoral del estado de Quintana Roo es considerado como una zona de gran potencial eólico, dada su franca exposición a los vientos alisios de primavera y verano, que a su vez son potenciados por la brisa marina. El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL) ha realizado mapas eólicos de la península de Yucatán y, de acuerdo a sus estimaciones gran parte de las costas del estado presenta características de viento catalogadas, de buenas a muy buenas, con velocidades medias entre 5.6 y 6.7 m/s a una altura de 30 m [2]. Por otro lado, México recibe una irradiación solar promedio de aproximadamente 5 kWh/m<sup>2</sup> [3], lo cual provee a la península de Yucatán de un considerable potencial solar-eólico para la generación de energía eléctrica. La ventaja fundamental de sistemas híbridos solar-eólico es el hecho de que la integración de diversas fuentes renovables, por lo general da lugar a una producción estable de energía a través del tiempo [4]. Sin embargo, uno de los inconvenientes de las energías renovables es su naturaleza intermitente, es decir, solo pueden ser aprovechadas durante el tiempo que el recurso esté presente, por tal motivo se recurre al empleo de algún sistema de acumulación. El almacenamiento de energía en forma de hidrógeno se perfila como la solución más probable al almacenamiento energético, capaz de producir un balance limpio en procesos sustentables [5]. Diferentes estudios de costos, dimensionado e instalación se han desarrollado recientemente. Khan et al, realizó un estudio de pre-factibilidad con el objetivo de usar sistemas híbridos de energía con hidrógeno como portador energético en Terranova, Canadá. Del análisis resultó que un sistema híbrido eólico-diesel-batería fue la solución más conveniente. Sin embargo, con una reducción del precio de la celda de combustible del 15% de su valor, un sistema eólico con almacenamiento de hidrógeno sería la opción más viable [6]. Levene et al, indicó que existen amplios recursos eólicos y solar para producir el combustible para el transporte; sin embargo, el precio de la producción del hidrógeno es elevado [7]. Yang et al, realizó un estudio de un sistema de energía eólica con almacenamiento de hidrógeno, cuando la demanda de carga eléctrica es menor que la salida de generación, el exceso es enviado al electrolizador para producir hidrógeno y ser utilizada en una celda de combustible [8]. Ganguly et al, realizó un estudio de modelación y análisis del sistema híbrido integrado a una casa, que consiste de paneles

fotovoltaicos, electrolizador y celda de combustible. El estudio muestra que la integración del sistema proporciona una opción viable para que la casa pueda auto-abastecerse de electricidad [9]. En México se han realizado estudios de simulación de sistemas híbridos solar-hidrógeno-celda de combustible en cuatro ciudades (La Paz, Monterrey, Temixco y Campeche). Estos sistemas consisten de paneles fotovoltaicos acoplados a un electrolizador para producir hidrógeno que alimenta a una celda de combustible. La simulación realizada se basó en modelos para los componentes eléctricos y los datos variables de insolación dependiendo de la zona. Se obtuvieron resultados positivos de las zonas estudiadas ya que cuentan con buen potencial solar [10].

Este trabajo consiste en el diseño de un sistema híbrido hidrógeno-solar-eólico que aprovecha los recursos renovables para generar energía eléctrica y suministrarla de forma constante a la carga. Por las condiciones de la zona, la mayor cantidad de energía se produce durante el día y es cuando hay posibilidad de que exista una cantidad de energía excedente, la cual se almacena en forma de hidrógeno y se aprovecha después en una celda de combustible para generar electricidad. Los componentes principales del sistema híbrido hidrógeno-solar-eólico propuesto son: aerogenerador, paneles fotovoltaicos, acondicionador de potencia eléctrica, inversor de corriente, electrolizador para la generación de hidrógeno, tanques de almacenamiento y un sistema de celdas de combustible. En la figura 1 se muestra el diseño general con los componentes principales del sistema híbrido.



*Figura 1. Esquema general del sistema híbrido*

## 2. Descripción del sistema

El sistema está integrado por el aerogenerador, paneles fotovoltaicos, electrolizador, celda de combustible, los sensores, válvulas para controlar el caudal de los gases y un acondicionador de señal eléctrica que cubrirá los requisitos del sistema. La energía eléctrica proporcionada por el aerogenerador y el sistema fotovoltaico se regula con el acondicionador de potencia eléctrica para mantener el voltaje constante y la corriente que demande la carga. Estos dos componentes suministran corriente directa (cd), por lo que un inversor a corriente alterna (ca) es requerido. El sistema electrónico de potencia también administra la energía eléctrica entre la energía producida por el sistema híbrido y la energía demandada por la carga, de esta manera determina si existe superávit (energía producida > energía demandada) o déficit (energía producida < energía demandada). Cuando existe un superávit, el sistema híbrido abastece el excedente de energía al electrolizador para la producción de hidrógeno y oxígeno, el momento óptimo para realizar dicha transformación es durante la noche. Estos gases se almacenan por separado en tanques de depósito a la misma presión del electrolizador. Cuando existe un déficit, la energía eléctrica faltante es compensada por el sistema de celdas de combustible.

El control electrónico es una parte fundamental en el sistema híbrido, recibe las señales que deben ser controladas. Las principales son: temperatura ambiente, presión de los gases en los tanques de almacenamiento, nivel de agua en el electrolizador, flujo de combustible, temperatura y presión en el sistema de celdas de combustible. También monitorea las magnitudes eléctricas (tensiones, corrientes) de las fuentes de energía (paneles fotovoltaicos-aerogenerador-celda de combustible) y las variables externas como radiación solar y velocidad del viento, útiles para la optimización y la eficiencia de la planta [11]. La implementación de un sistema de protección de alerta capaz de prevenir las condiciones de falla es indispensable. Todos estos parámetros se monitorean en el sistema de control y se simplifican en el diagrama de la figura 2.

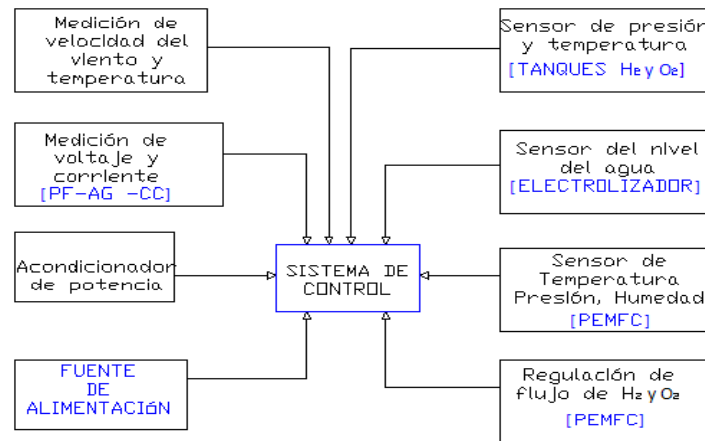


Figura 2. Sistema de control del sistema híbrido

### 3. Sistema híbrido propuesto

A continuación se describen los principales componentes del sistema híbrido.

- *El aerogenerador.* Para aprovechar los recursos eólicos que se disponen en la zona, es necesario emplear aerogeneradores que estén optimizados para trabajar a bajas velocidades de viento. El aerogenerador seleccionado es de la marca Whisper 200 de 1000 W-hr a 11.3 m/s, de acuerdo a la curva característica proporcionada por el fabricante. El equipo puede producir una potencia de 400 W a 24 V cd, con una velocidad de 6.8 m/s. que es la velocidad media que se dispone en el estado de Quintana Roo [2].

- *Sistema fotovoltaico.* Se trata de módulos de la marca Kyocera de 210 W/p, 24 V cd. Para cubrir la potencia del sistema se utilizan 3 módulos, que proporcionan un total de 630 W/p. En lugar de utilizar la potencia pico del módulo, se utilizará la potencia del módulo corregido, debido al efecto del incremento de temperatura, que produce una reducción en la potencia proporcionada por el panel. Diversos estudios han mostrado, que la potencia proporcionada por los paneles en condiciones de campo suele encontrarse entre un 5 y 20% por debajo de la indicada por los fabricantes en sus catálogos, que corresponden a ensayos de laboratorio en condiciones estándar. Teniendo en cuenta estas consideraciones, es prudente tomar como valor de potencia del sistema fotovoltaico, alrededor del 80% de la potencia pico [12].

$$P_m = P_{pico} \times 0.8 \quad (1)$$

Donde,

$P_m$  es la potencia del modulo corregido expresado en W

$P_{pico}$  es la potencia pico del modulo expresado en W/p

Utilizando la Ecuación 1 se calcula la potencia del modulo corregido con la que se obtiene el siguiente resultado:

$$P_m = 630 \times 0.8 = 504 \text{ W}$$

La suma total de estas dos fuentes de energía es mostrada en la ecuación 2:

$$P_T = P_{PF} + P_{AG} \quad (2)$$

$$P_T = 504 \text{ W} + 400 \text{ W} = 904 \text{ W} \quad (3)$$

donde,

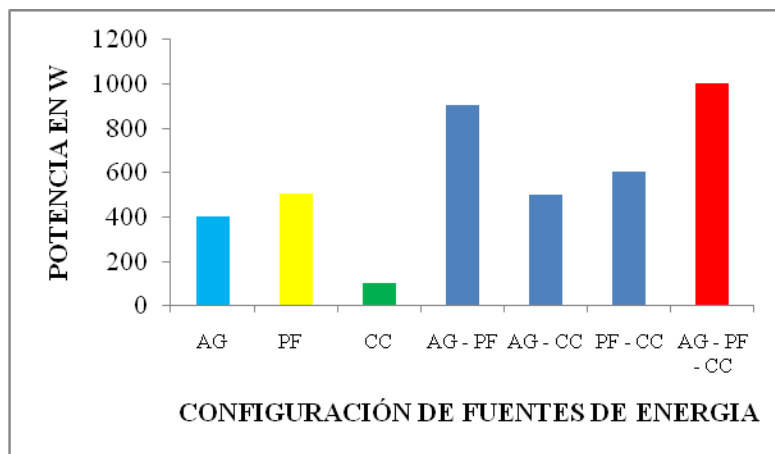
$P_T$  es la potencia total del sistema solar-eólico en W

$P_{PF}$  es la potencia total de los paneles fotovoltaicos en W

$P_{AG}$  es la potencia del aerogenerador en W

Esta es la potencia estimada que puede entregar el sistema híbrido solar-eólico cuando el viento sopla en condiciones normales y existe una irradiación del sol constante. Como bien sabemos, estas energías son intermitentes así que en un momento dado solo operará un solo equipo o incluso, ninguno.

- *La celda de combustible* seleccionada para este proyecto es de 100 W y tiene las siguientes características: área activa  $700 \text{ cm}^2$  ( $50 \text{ cm}^2 \times 14 \text{ MEA's}$ ), la celda consume 72 l/h del gas hidrógeno. El voltaje nominal de salida es aproximadamente 9.1 V. A la entrada de la celda se instala un regulador de presión para mantener una presión estable de 2 psi y una válvula reguladora de caudal a 1.2 l/min. La celda de combustible suministra un voltaje de 9 V cd, por lo tanto se debe elevar el voltaje a 24 V cd con un transformador cd-cd, antes de conectar al acondicionador de potencia general del sistema. Esto con el propósito de tener el mismo voltaje de salida, 24 V cd. La suma total de estas tres fuentes proporcionan una potencia total de 1004 W.



AG: Aerogenerador, PF: Panel fotovoltaico, CC: Celda de combustible

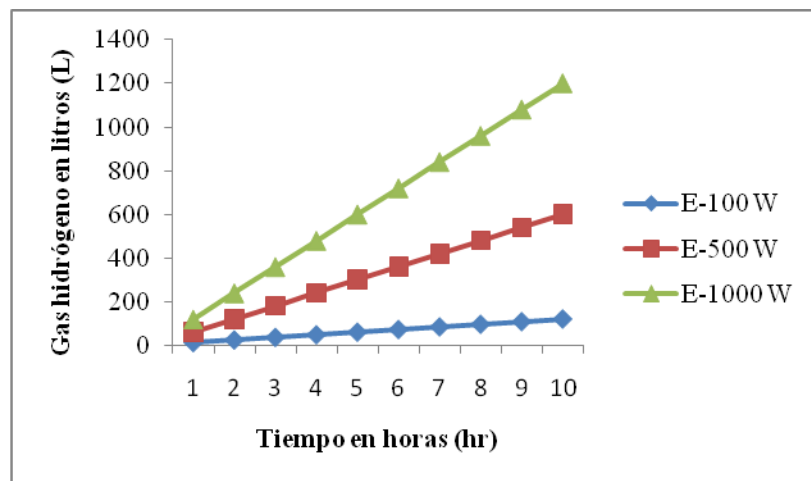
*Figura 3. Configuración de las fuentes de energía.*

La figura 3 muestra las diferentes configuraciones que se pueden presentar en el sistema, de acuerdo a los diferentes escenarios ambientales y/o de demanda que se presenten. El sistema fotovoltaico suministra energía eléctrica solo durante el día, y las horas óptimas de generación es de cinco horas por día ( $5000 \text{ W-h/m}^2 / 1000 \text{ W/m}^2$ ).

El aerogenerador suministra la mayor cantidad de energía porque opera durante el día y la noche con condiciones favorables de viento. La carga máxima no debe superar 1 kW de potencia, sin embargo pueden existir periodos en que la velocidad del viento sea alto y el aerogenerador alcance su potencia nominal, aumentando la potencia. En la gráfica se observa que la potencia máxima obtenida de la combinación del aerogenerador y el sistema fotovoltaico es de 900 W y en combinación con la celda de combustible el sistema puede alcanzar hasta 1kW.

- *El electrolizador.* En la configuración de este trabajo se necesita un electrolizador que sea capaz de trabajar con fuentes de potencia variable. En el acople entre un sistema generador renovable intermitente y un electrolizador, es necesario tener en cuenta que durante los periodos de bajos niveles de potencia, se impide el buen funcionamiento del electrolizador, provocando la desconexión del mismo. Si se sobredimensiona el sistema generador respecto del equipo de electrólisis, aumentan la potencia media generada y el tiempo operativo de uso del electrolizador. Conociendo la potencia nominal que puede entregar el sistema híbrido solar-eólico se seleccionaron los equipos disponible en el mercado. La figura 4 muestra tres electrolizadores con diferentes capacidades de producción de hidrógeno, de 100 W, 500 W y

1000 W. Tomando en consideración que la celda de combustible consume 72 l/h de hidrógeno, se observa que la producción del electrolizador de 100 W no satisface este consumo de gas y el electrolizador de 1000 W, está sobredimensionado para la aplicación propuesta. El electrolizador de 500 W genera 60 l/h de hidrógeno, suficiente para mantener en operación durante 50 minutos a la celda de combustible de 100 W; sin embargo el sistema de electrolizador –celda de combustible se puede operar continuamente usando un sistema de almacenamiento de gases.



E = Electrolizador

*Figura 4. Producción de hidrógeno usando Electrolizadores de diferentes capacidades.*

El electrolizador 500 W seleccionado tiene una presión de salida de 0,02-0,4 MPa (salida bajo presión estable) y puede ser alimentado con cd ó ca. Tiene una capacidad de producción de 60 l/h, un consumo de agua de 50 ml/h, un tanque de agua con capacidad de almacenamiento de 3.2 litros.

#### **4.- Resultados y discusión**

El probable excedente de energía que el sistema híbrido solar-eólico proporcione se presenta en dos escenarios:

a) el panel fotovoltaico puede trabajar durante cinco horas diarias en combinación con el aerogenerador, entonces el electrolizador puede operar durante cinco horas continuas obteniéndose 300 litros de hidrógeno;



b) en la noche, periodo de tiempo durante el cual solo el aerogenerador va producir electricidad, suponiendo seis horas de condiciones de viento favorables, se dispondría de 360 litros de hidrógeno.

Por lo tanto en un día completo (24 horas) se dispondría de 660 litros de combustible. Se obtendría esta producción si se destinara completamente la electricidad producida del sistema solar-eólico a la electrólisis del agua. El hidrógeno se almacena en un tanque de depósito convencional con una capacidad de 45 litros, con una presión de 0,4 MPa es posible almacenar 180 litros. Por lo tanto, tres cilindros son suficientes para almacenar el hidrógeno producido durante un día, teniendo en cuenta que el  $H_2$  también será consumido durante el tiempo que celda de combustible este en operación. Se contempla a futuro la posibilidad de comprimir el hidrógeno con un compresor y almacenar en envases de hidruros metalicos. Finalmente, el diseño del sistema híbrido hidrógeno-solar-eólico queda establecido como se muestra en la Figura 5.

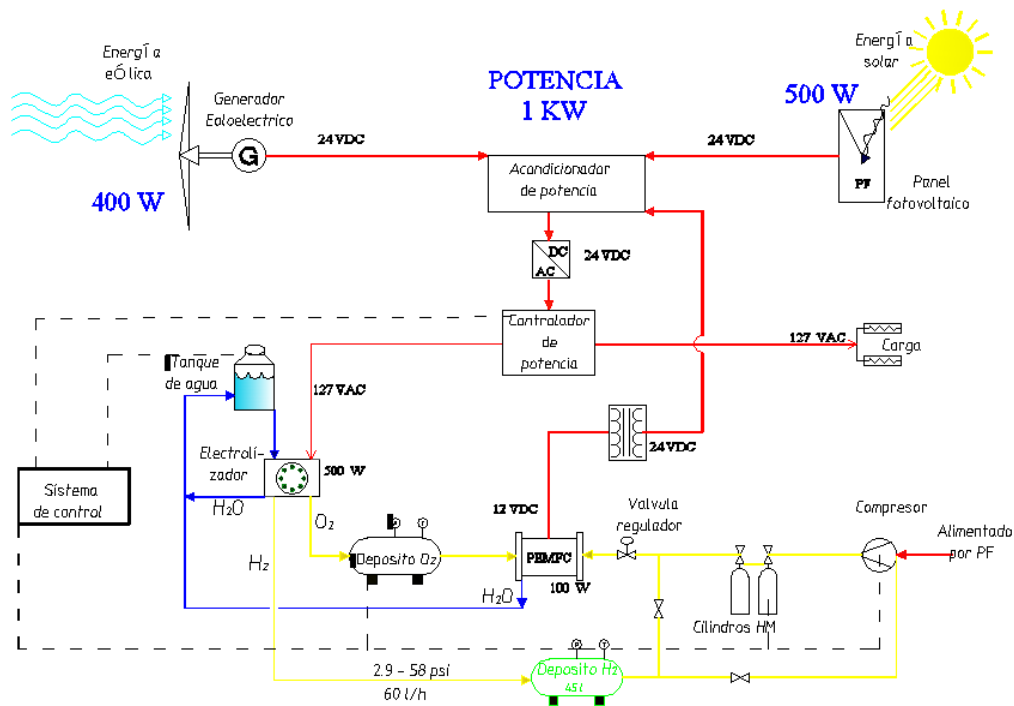


Figura 5. Diseño del sistema híbrido hidrógeno-solar-eólico

Para tener un estimad del costo de inversión del sistema propuesto, se realizó un estudio de los productos que se encuentran disponible en el mercado, en el rango de potencia requerido para cada uno de los componentes (Tabla 1).

*Tabla 1. Costos de los equipos principales del sistema híbrido*

Cant.	Descripción	Especificaciones	\$ Unitario, USD	Importe, USD
1	Aerogenerador Whisper 200	1 kW-hr a 11.3 m/s, 24 V cd	\$3,405.00	\$3,405.00
1	Kit para torre de 30ft p	Para generadores Whisper 200	\$859.00	\$859.00
1	Anclas galvanizadas de 48"	Para torre de 30ft	\$242.00	\$242.00
3	Fotocelda Kyocera	210 watts 24 V dc	\$870.00	\$2,610.00
1	Inversor SAMLEX	24 VDC 120 VAC 2000 watts	\$911.54	\$911.54
1	Tanque normal H <sub>2</sub>	45 litros	\$462.00	\$462.00
1	Generador de hidrógeno *	500 W-hr	\$9,895.00	\$9,895.00
1	Celda de combustible PEM *	100 W-hr	10,650.00	\$10,650.00

<b>Total \$</b>	<b>\$29,034.54</b>
-----------------	--------------------

Nota: \* Precio del equipo en el extranjero, no se incluye gastos de importación.

Es claro que se requiere mucha energía para producir hidrógeno en comparación con la generación de energía que puede proporcionar la celda de combustible, pero como la energía necesaria para producirlo proviene de fuentes renovables, esto hace que el proceso sea sustentable. Por lo tanto, en tecnología se necesitan electrolizadores altamente eficientes a fin de disminuir los costos de producción de hidrógeno. La generación de hidrógeno implica una pérdida de energía de gran tamaño tal como lo han demostrado diversas investigaciones [13]. El costo de la electricidad es un factor importante en los costos de producción de hidrógeno. A pesar de que la electrólisis ofrece una forma más pura de hidrógeno, sólo un pequeño porcentaje de la producción mundial se obtiene de esta manera, debido a que es más costosa que la reforma del gas natural, que es tres veces más barato [14]. Del estudio económico se concluyó que aunque la implementación del sistema híbrido hidrógeno-solar-eólico requiere de una fuerte inversión inicial, es tecnológicamente factible su uso como fuente de energía eléctrica amigable con el medio ambiente. Otro aspecto importante del sistema de energía híbrido hidrógeno-solar-eólico será el diseño y la simulación del sistema de control, el cual deberá de estar validado al implementar físicamente el sistema [15].

## 5.- Conclusiones

En este documento se ha presentado el diseño un sistema de producción de hidrógeno por medio de la electrólisis del agua usando la energía obtenida de un sistema de paneles fotovoltaicos y un aerogenerador. Se realizó un estudio bibliográfico actualizado del potencial solar y eólico disponible en la zona, seleccionando en el mercado los equipos disponibles para

integrarlos en el sistema híbrido hidrógeno-solar-eólico. La interconexión de las distintas partes es fundamental, en el sistema se debe tener presente: el control del flujo de hidrógeno estático y dinámico, la relación de la electricidad producida y consumida y las variables de monitoreo y control de cada parte. Los costos de los equipos que integran el sistema híbrido son muy altos, se espera que a través del tiempo los costos bajen; esto solo se podrá lograr, no solo con un impulso en la investigación y el desarrollo tecnológico, sino también promoviendo la implementación de estos sistemas en nuestro país. Finalmente muchos aspectos del sistema híbrido tienen que ser investigados cuando se encuentre en funcionamiento, como por ejemplo: la eficiencia, confiabilidad y respuesta dinámica del electrolizador, el control de variables en celda de combustible y los componentes para hacer eficiente el almacenamiento de hidrógeno.

## **6.- Agradecimientos**

Los autores agradecen al FORDECYT - CONACYT por el apoyo brindado a este trabajo con el proyecto No. 116157.

## **7.- Referencias**

- [1] Th.F. El-Shatter, M.N. Eskandar, M.T. El-Hagry. *Renewable energy*, 27, 479, (2001).
- [2] National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Mexico – Campeche, Quintana Roo and Yucatan Wind Resource Map*. U. S Department of Energy (2000).
- [3] I. Galindo, S. Castro and M. Valdes. *Atmosphere*, 4, 189 (1991).
- [4] Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Augustin, Franklin Mendoza. *Energy policy*, 37, 3082, (2009).
- [5] Dolfo Gielen, Giorgio Simbolotti. *Prospects for hydrogen and fuel cells*. p. 33, OECD/IEA, France (2005)
- [6] M.J. Khan and M.T. Iqbal. *Renewable energy*, 30, 835, (2005).
- [7] Johanna Ivy Levene, Margaret K. Mann, Robert M. Margolis and Anelia Milbrandt. *Solar Energy*, 81, 773, (2007).
- [8] Wen-Jei Yang and Orhan Aydin. *International journal of energy research*, 25, 449, (2001).
- [9] A. Ganguly, D. Misra, S. Ghosh. *Energy and buildings*. In Press, (2010).

- [10] L. A. Torres, F.J. Rodríguez, P.J. Sebastian. *Int. J. hydrogen Energy*, 23, 1005, (1998).
- [11] Sonia Leva, Dario Zaninelli. *Electric power systems research*, 79, 316, (2009).
- [12] A. Francisco García, R. Illanes Muñoz, J. L. Torres Escribano y M. Castillo Dora. *Energías Renovables para el desarrollo*. Cooperación Internacional. Pág. 125. Thomson Paraninfo. España (2003).
- [13] Reuel Shinnar. *Technology in Society* 25, 455, (2003).
- [14] Lymberopoulos N. *Hydrogen production from renewables*. P. 87. Project Technical Assistant Framework Contract. (2005).
- [15] M.T. Iqbal. *Renewable energy*, 28, 511 (2002).