

# Producción de Hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica

R. García-Valverde

Dpto. Electrónica, Tecnología de Computadores y Proyectos (DETCP)

Universidad Politécnica de Cartagena

Plaza del Hospital, 1, 30202 Cartagena (Murcia)

Teléfono: 968 32 6514 Fax: 968 32 7031

E-mail: rafael.gvalverde@upct.es

**Resumen.** *El acoplamiento de un generador fotovoltaico (FV) y de un electrolizador es una de las opciones más prometedoras para obtener hidrógeno desde una fuente de energía renovable. Ambas son tecnologías bien conocidas, sin embargo debido a la variabilidad de la radiación solar, un acoplamiento eficiente todavía supone un reto. El acoplamiento directo y a través de convertidor CC/CC son las opciones utilizadas en aplicaciones aisladas. En este trabajo, se presentan modelos de comportamiento para el generador FV, el electrolizador y el convertidor CC/CC. Los modelos han sido implementados y simulados en Matlab/Simulink. También se propone un algoritmo de control específico para el acoplamiento generador FV-electrolizador a través de convertidor CC/CC. Las simulaciones realizadas demuestran que el algoritmo propuesto permite una mayor adaptabilidad a la variación de radiación solar que otras opciones de acoplamiento y flexibiliza el diseño independiente del generador FV y del electrolizador.*

## 1 Introducción

En los últimos años se ha hablado mucho del uso energético del hidrógeno, como combustible limpio alternativo a los combustibles fósiles. Además su uso en pilas de combustible, se asocia a sistemas de generación energética de alta eficiencia. Sin embargo, el hidrógeno prácticamente no existe de manera libre en su forma molecular ( $H_2$ ) en la Tierra, sino que aparece asociado a moléculas mayores ( $H_2O$ , hidrocarburos, etc.). Por tanto, el  $H_2$  será limpio y renovable si en el proceso utilizado para su obtención se evita, o al menos se minimiza, la emisión de gases de efecto invernadero.

Una de las maneras más prometedoras de obtener hidrógeno desde una fuente de energía renovable es la electrólisis del agua a partir de electricidad solar fotovoltaica [1-6]. Este sistema consiste en el acoplamiento de un generador FV a un electrolizador de agua, dispositivo electroquímico donde se produce la separación del  $H_2O$  en  $H_2$  y  $O_2$ .

Tanto la fotovoltaica (FV) como los electrolizadores son tecnologías bien conocidas. Sin embargo su acoplamiento óptimo presenta todavía algunos retos importantes [7]. La salida de potencia de un generador FV depende de la radiación solar, por lo que está caracterizada por intermitencia y alta variabilidad. Potencias de operación muy bajas con respecto a la nominal (5-25%) pueden provocar situaciones peligrosas dentro del electrolizador y los fabricantes imponen una potencia de alimentación mínima para una operación segura [8,9]. Este problema es especialmente importante en aplicaciones donde el electrolizador no es alimentado desde otras fuentes (Ej: la red eléctrica o un banco de baterías).

Por otra parte, el acoplamiento FV- $H_2$  debe de maximizar la potencia de salida desde el generador FV, haciendo que éste trabaje siempre que sea posible en el punto de máxima potencia (MPP) para cada condición de radiación solar y temperatura.

Algunos autores han defendido el acoplamiento directo [14-16]. El generador FV es una fuente de corriente continua y el electrolizador se comporta como una carga de corriente continua. Ambos sistemas son muy modulares y un dimensionado óptimo permite el acoplamiento directo. Sin embargo el acoplamiento directo reduce la flexibilidad de dimensionado y para electrolizadores de elevada potencia implica utilizar generadores FV con salida de corriente muy elevada, lo que supone aumentar la sección de los cables de interconexión, aumentando las pérdidas por transmisión. Además de no asegurar que el generador FV funcione siempre en el MPP.

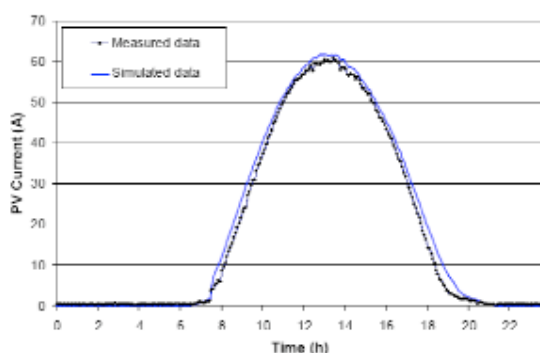
Otros autores [17-19] han demostrado o sugerido eficiencias más altas del sistema FV- $H_2$  utilizando un acoplamiento a través de un convertidor CC/CC que implemente un seguimiento del MPP. Esta opción ofrece también una mayor flexibilidad de diseño, sin embargo el seguimiento del MPP puede llevar al electrolizador a trabajar en condiciones de operación no seguras.

El objetivo de este trabajo es proponer un algoritmo de seguimiento del MPP para el acoplamiento FV- $H_2$  a través de CC/CC, que a su vez asegure la operación segura del electrolizador. Para su validación se han implementado en Matlab/Simulink un modelo de generador FV, de Electrolizador tipo PEM, de convertidor CC/CC y del controlador que implementa el algoritmo.

## 2 Modelización

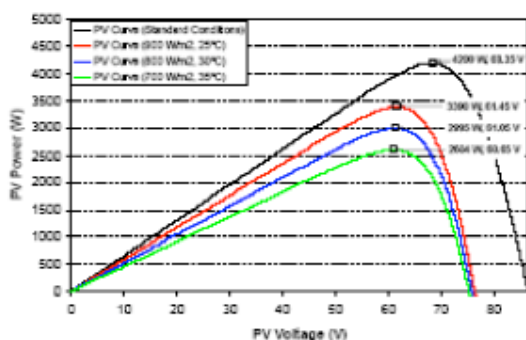
### 2.1 Generador FV

El modelo de generador FV está basado en el propuesto por Lorenzo et al. [20]. Este modelo asume determinadas condiciones que permiten extraer los parámetros característicos del modelo equivalente de un diodo para una célula FV general, a partir de los datos técnicos que ofrecen los fabricantes en las hojas de características de los módulos FV comerciales.



**Fig. 1** Corriente de salida del generador FV de la UMU para un día soleado. Medida cada 5min y simulada con el modelo propuesto.

El modelo permite extender estos parámetros a un generador FV equivalente y calcular la curva I-V y el punto de funcionamiento para unas condiciones de operación dadas.



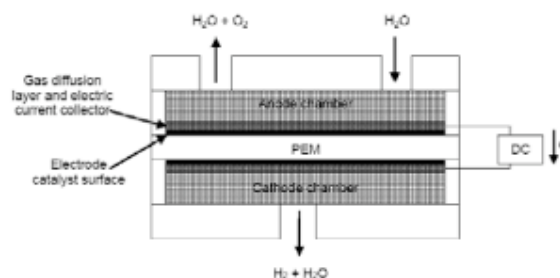
**Fig. 2** Curvas P-V para un generador FV de 4.2kWp

El modelo de generador FV ha sido simulado y comparado con datos experimentales obtenidos de la instalación FV aislada de la Universidad de Murcia [21]. La Fig. 1 muestra la validación del modelo. La Fig. 2 representa diferentes curvas potencia-voltaje para un generador FV de 4.2kWp, en ella se puede observar como el MPP varía con las condiciones temperatura y radiación solar.

### 2.2 Electrolizador PEM

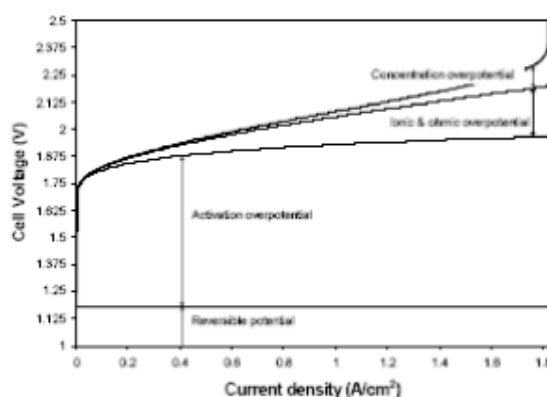
La electrolisis del agua es la disociación de su molécula en  $H_2$  y  $O_2$ . Un electrolizador es el

dispositivo electroquímico en el que se lleva a cabo dicha reacción. Los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM), se caracterizan por la membrana de intercambio protónico situada entre los dos electrodos de cada celda electrolítica. Esta membrana sirve como electrolito para el intercambio iónico (es un medio ácido que hidratado conduce protones) y como separador de las cámara anódica y catódica (es impermeable al paso de electrones y de gases).



**Fig. 3** Esquema de una celda electrolítica tipo PEM

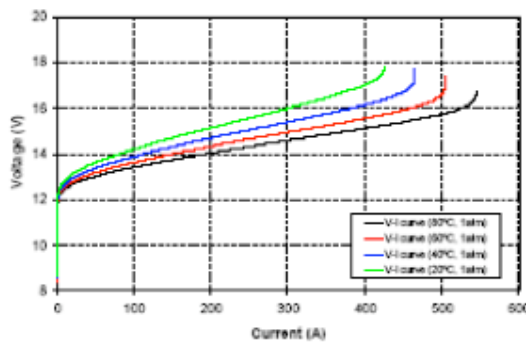
Como en toda reacción electroquímica, entre los electrodos existe un potencial reversible o potencial de Nernst, potencial mínimo para que la reacción comience, y que depende de la temperatura y de la presión a la que se lleve a cabo la reacción. No obstante, para que la reacción comience se debe aplicar una corriente continua entre los electrodos. Al circular corriente aparecen limitaciones asociadas a la no idealidad de los electrodos (limitaciones de transferencia de carga y de transporte) y del electrolito (resistencia óhmica e iónica). Estas limitaciones se traducen en la práctica en un aumento del voltaje entre electrodos conforme se inyecta más corriente a la celda electrolítica. La Fig. 4 muestra la curva voltaje frente a densidad de corriente (V-i) para una celda electrolítica. En ella se puede observar el efecto de las limitaciones de transferencia de carga (sobrepotencial de activación), de transporte (sobrepotencial de concentración) y de los efectos resistivos (sobrepotencial iónico y óhmico).



**Fig. 4** Curva i-V (curva superior) simulada para una celda electrolítica PEM a una presión de 1

### atm y 80°C y el efecto parcial sobre la curva de cada sobrepotencial.

Las celdas electrolíticas se asocian en serie para obtener voltajes de operación mayores, y el diseño de celdas con áreas mayores lleva a corrientes de operación más elevadas. La producción de hidrógeno es proporcional a la corriente que circula por cada celda (ley de Faraday), por lo que cuanto mayor sea la corriente, mayor será la velocidad de producción de hidrógeno, aunque la reacción será menos eficiente debido al mayor sobrepotencial. La temperatura y la presión a la que se produce la reacción electrolítica afecta tanto al potencial reversible de partida como a los diferentes sobrepotenciales (Fig. 5). El modelo completo debe incluir el comportamiento electroquímico y el termodinámico. El desarrollo completo del modelo de electrolizador está descrito en [22].



**Fig. 5** Curvas V-I simuladas para un electrolizador de 7 celdas en serie de 300cm<sup>2</sup> de área cada una

En la práctica se debe asegurar que el electrolizador funcione dentro del rango lineal de la curva i-V, para evitar el trabajo por debajo de una potencia mínima y por encima de la potencia máxima.

### 2.3 Convertidor de CC/CC

Los convertidores CC/CC son dispositivos de electrónica de potencia utilizados en aquellas aplicaciones en las que se necesita un voltaje o una corriente de salida menor o mayor que el voltaje o la corriente de entrada. Esto se logra controlando el tiempo de conmutación de los interruptores internos. En FV son habitualmente utilizados para hacer trabajar al generador siempre lo más cerca posible de su MPP. De entre las diferentes topologías de convertidores CC/CC (reductor, elevador, etc. [23]), en este trabajo se ha elegido el reductor-elevador, por cubrir todo el espectro de resistencias de entrada, aunque en la práctica en la mayoría de sistemas FV-H<sub>2</sub> se necesitará únicamente el comportamiento reductor.

El modelo de convertidor de CC/CC utilizado es un modelo simplificado en el que se asume su funcionamiento en modo continuo en todo momento y las componentes de frecuencia son totalmente filtradas a la salida. Así el modelo está basado en la relación entre la resistencia de entrada y la carga de salida, relacionadas por la relación de conmutación ( $\delta$ ) y la eficiencia del convertidor ( $\eta$ ):

$$V_{in} = \frac{V_{out}}{\eta} \frac{1-\delta}{\delta} \quad (1)$$

$$I_{out} = I_{in} \eta \frac{1-\delta}{\delta} \quad (2)$$

### 3. Controlador Propuesto

El convertidor CC/CC actúa como interfaz de potencia entre la fuente de corriente (el generador FV) y la carga a alimentar (el electrolizador), adaptando el voltaje de trabajo del generador FV lo más cercano posible a su MPP y manteniendo la corriente de entrada al electrolizador dentro de los límites de seguridad, es decir dentro de su zona lineal.

Para ello, el algoritmo propuesto a partir de los valores de voltaje y corriente de entrada y salida al convertidor, realiza la búsqueda de un punto de trabajo que cumpla dos condiciones: 1) La derivada segunda de la potencia de entrada al electrolizador sea 0, manteniéndolo así dentro de su zona lineal de trabajo y 2) la derivada primera de la potencia de salida del generador FV esté lo más cercana posible a 0 (punto de máxima potencia).

En la simulación el controlador es un bloque de Simulink sobre el que se ha programado el algoritmo propuesto (Fig. 6). Sin embargo el algoritmo no requiere cálculos complicados y puede ser implementado de manera sencilla en cualquier microcontrolador con puertos A/D y capaz de implementar salidas PWM.



Fig. 6 Diagrama de flujo del algoritmo de control propuesto

### 4. Resultados de la Simulación y Discusión

Los modelos anteriores junto con el controlador propuesto han sido implementados en Simulink/Matlab. El diagrama de bloques del sistema final es mostrado en la Fig. 7.

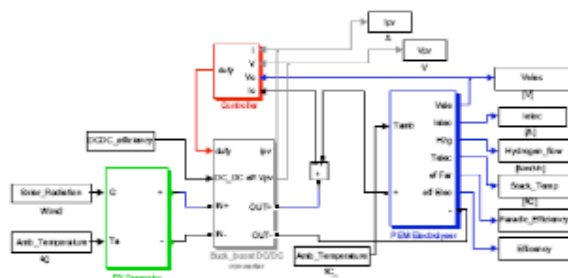


Fig. 7 Diagrama de bloques en Simulink/Matlab del sistema FV-H<sub>2</sub> propuesto

En la Fig. 8 se muestra una comparación estática (punto de operación para unas condiciones ambientales y de reacción electroquímica determinadas) entre: a) acoplamiento directo, b) acoplamiento con un CC/CC que implementa sólo la búsqueda del MPP; y c) acoplamiento con un CC/CC que implementa el algoritmo propuesto. Se puede observar que el acoplamiento directo se podría mejorar buscando una combinación de módulos FV que adaptara el rango de voltajes de operación del generador al del electrolizador, aunque incrementaría la corriente por los cables y las pérdidas por transmisión. En el caso del convertidor CC/CC que implementa sólo la búsqueda del MPP, vemos que el punto de operación puede llevar al electrolizador a trabajar en una zona no segura.

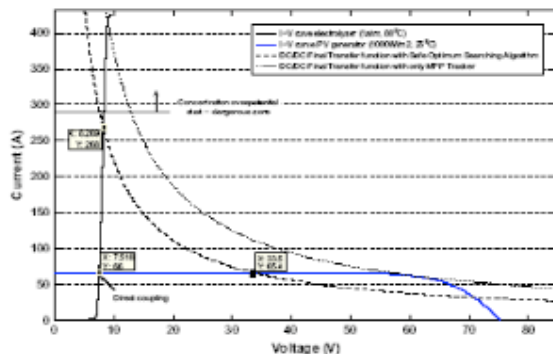


Fig. 8 Punto de operación de un sistema FV-H<sub>2</sub> con acoplamiento directo y mediante convertidor CC/CC implementado sólo la búsqueda del MPP y con el algoritmo propuesto.

Para comprobar el comportamiento dinámico (cambios de las condiciones ambientales) se han simulado dos configuraciones de electrolizador: 1) un electrolizador con 7 celdas en serie y 300cm<sup>2</sup> de celda elegido para mejorar el control térmico de la reacción electrolítica (Opción 1); y 2) un electrolizador con 30 celdas en serie de 70cm<sup>2</sup>, especialmente elegido para optimizar el acoplamiento directo con el generador FV (Opción 2). Estas dos configuraciones son alimentadas desde un generador FV de 4.2kWp (2 líneas en serie de 20 módulos en paralelo de 106 Wp cada uno). Los dos sistemas FV-H<sub>2</sub> han sido simulados utilizando acoplamiento directo y a través de convertidor CC/CC con el algoritmo propuesto. Las cuatro combinaciones han sido sometidas a una misma secuencia de variación de la radiación solar cada 10 segundos. La Fig. 9 muestra la salida de hidrógeno del electrolizador en las cuatro combinaciones.

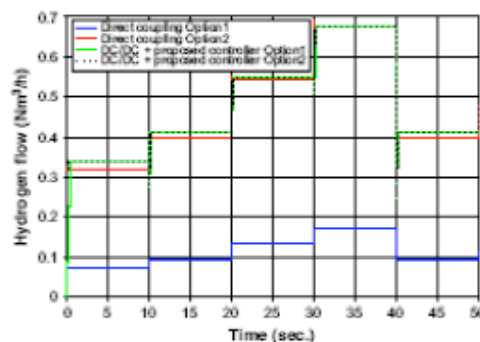


Fig. 9 Flujo de H<sub>2</sub> de salida para dos sistemas FV-H<sub>2</sub>, sin convertidor CC/CC y con convertidor CC/CC controlado por el algoritmo propuesto.

Se puede comprobar que utilizando el controlador propuesto la producción de hidrógeno se maximiza, al hacer trabajar siempre al generador FV cercano a su MPP y además esa mejora es independiente de la relación de diseño elegida para el electrolizador o para el generador FV. Esto último flexibiliza el diseño relativo entre el generador FV y el electrolizador, hecho que en sistemas de elevada

potencia puede suponer una importante reducción en las pérdidas por transmisión en el cableado y facilitar el control térmico y de presión en el electrolizador.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha introducido la problemática del acoplamiento entre un generador fotovoltaico y electrolizador de agua para la producción de hidrógeno "limpio y renovable". Se han presentado e implementado en Matlab/Simulink modelos de comportamiento para el generador FV, el electrolizador tipo PEM y el convertidor CC/CC. Se ha propuesto un algoritmo específico de control para el acoplamiento generador FV-electrolizador a través de convertidor CC/CC. El sistema total ha sido simulado utilizando Matlab/Simulink. Los resultados de las diferentes simulaciones demuestran que el algoritmo propuesto permite una mejora en la eficiencia de la producción de hidrógeno sin llevar al electrolizador a puntos de operación no seguros y además permite independizar el diseño del generador FV del electrolizador.

## Agradecimientos

Agradecemos la financiación de esta trabajo al proyecto HOPE. CSD2007-00007 (Consolider-Ingenio 2010) y a la beca FPU AP2005-2271.

## Referencias

- [1] Chaparro AM, Soler J, Escudero MJ, de Ceballos EML, Wittstadt U, and Daza L. Data results and operational experience with a solar hydrogen system. *Journal of Power Sources*, 144(1):165-169, 2005.
- [2] Bilgen E. Domestic hydrogen production using renewable energy. *Solar Energy*, 77(1):47-55, 2004.
- [3] Vidueira JM, Contreras A, and Veziroglu TN. PV autonomous installation to produce hydrogen via electrolysis and its use in FC buses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(9):927-937, September 2003.
- [4] Bilgen E. Solar hydrogen from photovoltaic-electrolyzer systems. *Energy Conversion and Management*, 42(9):1047-1057, 2001.
- [5] Meurer C, Barthels H, Brocke WA, Emonts B, and Groehn HG. PHOEBUS—an autonomous supply system with renewable energy: six years of operational experience and advanced concepts. *Solar Energy*, 67(1-3):131-138, 1999.
- [6] Galli S and Stefanoni M. Development of a solar-hydrogen cycle in Italy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(5):453-458, 1997.
- [7] Barbir F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy* 2005;78(5):661-9.
- [12] Electrolysers N.H: [www.hydroelectrolysers.com](http://www.hydroelectrolysers.com)
- [13] Hydrogenics Corporation: [www.hydrogenics.com](http://www.hydrogenics.com)
- [14] Arriaga I.G, et al. Direct coupling of a solar-hydrogen system in Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy* 2007; 32(13):2247-52.
- [15] Shapiro D, Duffy J, Kimble M, Pien M. Solar-powered regenerative PEM electrolyzer/fuel cell system. *Solar Energy* 2005;79(5):544-50.
- [16] Bidyut P, Andrews J. Optimal coupling of PV arrays to PEM electrolyzers in solar-hydrogen systems for remote area power supply. *International Journal of Hydrogen Energy* 2008;33(2):490-8.
- [17] Ahmad GE, El Shenawy ET. Optimized photovoltaic system for hydrogen production. *Renewable Energy* 2006;31(7):1043-54.
- [18] Solmecke H, Just O, Hackstein D. Comparison of solar hydrogen storage systems with and without power electronic DC/DC converters. *Renewable Energy* 2000;19 (1-2):333-8.
- [19] Contreras A, Guirado R, Veziroglu TN. Design and simulation of the power control system of a plant for the generation of hydrogen via electrolysis, using photovoltaic solar energy. *International Journal of Hydrogen Energy* 2007;32 (18):4635-40.
- [20] Lorenzo E, et al. Solar electricity-engineering of photovoltaic systems. Seville (Spain): PROGNSA; 1994.
- [21] Instalación FV de la UMU: <http://sustainable-tech.inf.um.es>
- [22] García-Valverde R., et al. Optimized photovoltaic generator-water electrolyser coupling through a controlled DC/DC converter *International Journal of Hydrogen Energy* 2008; 33 : 5352-5362
- [23] Rashid MH. Power electronics circuits, devices and applications. 2nd ed. Prentice Hall; 1993.