

Strategy for Hydrogen Generation from a Photovoltaic System Using a Boost Converter

G. Cervantes- Mejia * M. Cervantes-Bobadilla **
G. V. Guerrero-Ramírez *** A. E. Mares-Gardea ***
M. Adam-Medina *** J. García-Morales ***

* *Posgrado del Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México.*

** *Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp-IICBA)/UAEM, Av. Universidad 1001, Chamilpa, 62209 Cuernavaca, Morelos, México.*

*** *Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México.*

Resumen: This research presents two schemes for hydrogen generation by alkaline water electrolysis using a photovoltaic system and a boost converter as a power source. The first scheme aims to extract the maximum power from the photovoltaic system using the P&O algorithm and use this energy to generate hydrogen. Thus, obtaining the maximum efficiency of the photovoltaic-electrolytic cell system. The second scheme aims to generate hydrogen on demand, eliminating the need for storage and reducing the associated costs and risks. Nevertheless, this approach does not fully maximize the power available in the PV system, resulting in lower overall efficiency. Finally, it concludes with the proposal of an approach that combines on-demand hydrogen generation and maximum energy extraction from solar panels. Any unused energy from the electrolytic reactor is stored in a battery bank through a bidirectional converter. However, the simulation and implementation of this third scheme are proposed as future work.

Keywords: Nonlinear system identification, Nonlinear process control, Power systems, Control of renewable energy resources, Application of power electronics.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cambio climático es una preocupación global, lo que impulsa la búsqueda de fuentes de energía más limpias que no emitan CO₂ como los combustibles fósiles Tashie-Lewis and Nnabuife (2021). Desde 1970, se ha considerado el hidrógeno como un sustituto en diversos sectores Brandon and Kurban (2017). El hidrógeno verde podría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sin embargo, su uso masivo se ve limitado por costos y riesgos de almacenamiento. El hidrógeno, aunque abundante, requiere un proceso para separarlo de otros elementos Gámez (2010). La extracción principal es mediante combustibles fósiles, pero las políticas actuales promueven la electrólisis con energía renovable, como la solar o eólica Guilbert et al. (2017). Para acoplar el arreglo fotovoltaico y el reactor electrolítico es necesario de un convertidor de potencia, entre estos las topologías Buck, Boost y Buck-Boost destacan en sistemas de electrólisis Chauhan et al.

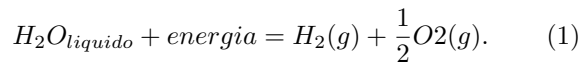
(2021). Entre los aspectos más importantes a evaluar en estas topologías se encuentran: la eficiencia energética, la ondulación en la corriente de salida, la relación de voltaje, la fiabilidad y el costo Guilbert et al. (2017). Este trabajo se centra en la generación de hidrógeno a través de electrólisis alcalina utilizando paneles solares y un convertidor de potencia tipo Boost como fuente de energía. Se presentan tres esquemas de generación de hidrógeno. El primer esquema utiliza el seguimiento del punto de máxima potencia en los paneles solares, lo cual permite obtener la máxima generación de hidrógeno. Sin embargo, persiste el problema del almacenamiento de dicho gas. El segundo esquema muestra una generación de hidrógeno bajo demanda, con el objetivo de eliminar la necesidad de almacenamiento. Sin embargo, este enfoque presenta una baja eficiencia en la recolección de energía. El tercer esquema propone una posible solución para lograr una generación de hidrógeno bajo demanda, manteniendo una eficiencia de recolección de energía alta.

Aunque se menciona este enfoque, su desarrollo no se presenta, dejando abierta la puerta a futuros trabajos de investigación en esta misma línea.

2. METODOLOGÍA

2.1 Electrólisis alcalina

La electrólisis alcalina permite descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. El agua con un pH neutro tiene una baja conductividad, por lo que se agregan sustancias como KOH o NaOH para aumentar el pH y obtener agua alcalina. La electrólisis se lleva a cabo aplicando una corriente eléctrica a través del agua mediante una celda electrolítica. Durante la electrólisis del agua, los iones de hidrógeno se desplazan hacia el cátodo, mientras que los iones de hidróxido se mueven hacia el ánodo. La Ecuación (1) representa este proceso.



Para que esta reacción ocurra se debe aplicar un voltaje mínimo a los electrodos determinado por medio de la energía libre de Gibbs. Este voltaje teórico es de 1.229 V a 25° C, sin embargo, de forma pragmática no se observa ninguna reacción hasta llegar a los 1.65 – 1.7 V, a nivel industrial el voltaje estándar para este sistema es de 1.8 a 2.6.

La celda electrolítica es un dispositivo que posibilita una reacción química no espontánea mediante el uso de corriente eléctrica, es fundamental que los electrodos de la celda sean resistentes a la corrosión generada por el electrolito, además de mantener un área superficial amplia para asegurar la ocurrencia de la reacción deseada. Asimismo, deben poseer propiedades electro catalíticas que permitan una velocidad de reacción elevada, y su conductividad también debe ser alta. En la práctica, es común emplear acero inoxidable y níquel como materiales para los electrodos.

2.2 Panel solar

Las celdas solares se construyen mediante la unión de dos semiconductores p-n en una oblea delgada de silicio, aprovechando el efecto fotoeléctrico para convertir la radiación solar en energía eléctrica de corriente directa. Estas celdas se pueden representar mediante un circuito electrónico básico que consta de una fuente de corriente alimentada por la radiación solar, un diodo, una resistencia en paralelo y una resistencia en serie. La Fig. 1 ilustra este esquema. Cada celda solar produce un voltaje que generalmente oscila entre 0.5 y 0.8 voltios. Los paneles solares están compuestos por una serie de estas celdas conectadas en serie y en paralelo. Normalmente, se utilizan arreglos que constan de 36 a 72 celdas E E Granda-Gutiérrez et al. (2013).

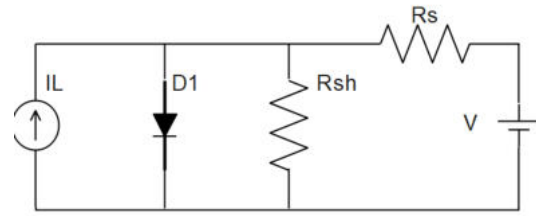


Figura 1. Circuito equivalente de una celda fotovoltaica.

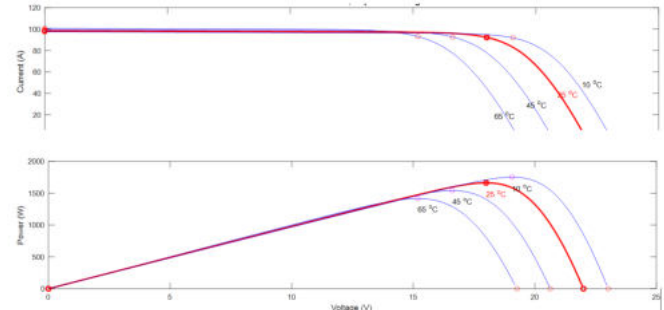


Figura 2. a) Curvas Voltaje-Corriente. b) Curvas Voltaje-Potencia.

2.3 Seguimiento del punto de máxima potencia

Durante el transcurso del día, la radiación solar experimenta cambios dinámicos, lo que, combinado con el sombreado parcial en los paneles solares, resulta en una eficiencia reducida, que generalmente se sitúa entre el 14% y el 16%. Los paneles solares presentan dos curvas características: la curva de Voltaje-Corriente y la curva de Voltaje-Potencia, representadas en la Fig. 2(a) y Fig. 2(b) respectivamente. Estas curvas permiten identificar el punto de máxima potencia, el cual varía según la irradiancia y la temperatura del panel. Para maximizar la cantidad de energía obtenida de los paneles solares, se requiere la implementación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Existen numerosos algoritmos de este tipo, como Voltaje constante (CV), Perturbar y Observar (P&O), Control de lógica difusa (FLC), Redes Neuronales Artificiales (ANN), Optimización de Enjambres de Partículas (PSO) R. B. Bollopo (2020) Islam et al. (2020).

El algoritmo P&O es considerado como uno de los más sencillos computacionalmente y puede ser implementado fácilmente en microcontroladores o plataformas de simulación como Matlab o Simulink además de tener una eficiencia que ronda entre el 90 al 98%. Este algoritmo calcula la potencia obtenida en dos puntos de la curva de Voltaje-Potencia y compara sus posiciones de voltaje para determinar la dirección en la cual la potencia es mayor, posteriormente se ajusta la posición del voltaje con el objetivo de rastrear el punto de máxima potencia. Este algoritmo tiene 2 problemas principalmente: Las oscilaciones continuas alrededor del MPP y la posibilidad

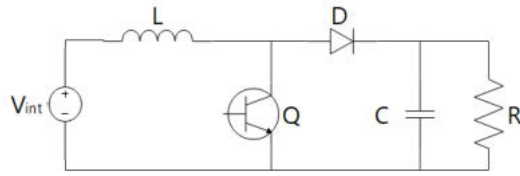


Figura 3. Convertidor de potencia “Boost”.

de perder la dirección a causa de un cambio brusco en la irradiancia solar provocado por sombreados parciales

2.4 Convertidor de potencia

Para asegurar una correcta alimentación de energía a una carga a través de un sistema fotovoltaico, se requiere la utilización de un convertidor de potencia que también incorpore el algoritmo del MPPT. Existen diversas topologías de convertidores que pueden ser empleadas en sistemas fotovoltaicos, tales como Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, Sepic y Zeta. Entre estas opciones, el convertidor Boost es ampliamente utilizado debido a su alta eficiencia y la simplicidad de su circuito. Zaions et al. (2017) Patil and Anantwar (2017). Debido a estas características se utiliza esta topología, sin embargo, en trabajos futuros e implementación será necesario evaluar y seleccionar la topología más adecuada para esta aplicación. En Fig. 3 se muestra el diagrama eléctrico de este convertidor.

3. CASO DE ESTUDIO

Para diseñar un convertidor de potencia adecuado es necesario conocer el comportamiento del reactor electrolítico y para simular es fundamental tener un modelo del reactor. La generación de hidrógeno es dependiente de muchos factores, tanto mecánicos como el área superficial, forma y separación de los electrodos; eléctricos tales como el voltaje, la corriente y la impedancia; ambientales como la temperatura y presión. Pequeñas variaciones en la configuración del reactor puede modificar drásticamente el comportamiento del mismo debido a su naturaleza no lineal, por lo que es fundamental identificar el modelo antes de comenzar con la elección de paneles solares y del convertidor de potencia.

3.1 Modelado de la celda electrolítica

En este estudio se empleó un reactor electrolítico de celda seca compuesto por 12 celdas de acero inoxidable 316, con una superficie de contacto en los electrodos de 270 cm^2 . Se utilizó una solución de hidróxido de potasio (KOH) como electrolito, con una concentración del 30%. Debido a la naturaleza no lineal del sistema de electrólisis, para el modelado se empleó identificación de Hammerstein. Para ello se obtuvieron datos experimentales del sistema, aplicando como entrada señales tipo escalón de corriente igualmente espaciados y con una duración que asegure llegar al estado estacionario. La corriente suministrada al

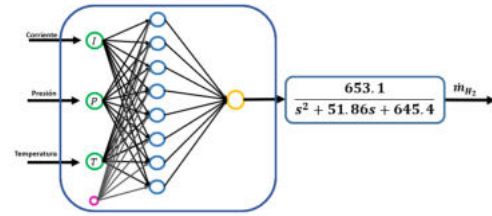


Figura 4. Modelo Hammerstein del reactor electrolítico.

electrolizador tiene un límite mínimo de 0 A y máximo 69 A. La identificación se llevó a cabo en dos etapas: primero se identificó la no linealidad estática, seguida del modelo de dinámica lineal. Para la identificación de la primera etapa, se empleó una red neuronal feed-forward, compuesta por tres capas. La capa de entrada tiene tres neuronas (temperatura, presión y corriente eléctrica), la capa oculta cuenta con 8 neuronas y utiliza la función tangente hiperbólica como función de activación, finalmente la capa de salida (flujo de hidrógeno) tiene una neurona y utiliza una función lineal. El modelo RNA propuesto se presenta en la Ecuación (2).

$$mh2 = \sum_{s=1}^s \left[W_{0(1,s)} \left(\frac{2}{1 + \exp(-2(\text{Sum}))} - 1 \right) \right] + b_{o(l)} \quad (2)$$

$$\text{Sum} = \sum_{k=1}^k (W_{i(sk)} In(k)) + b_{i(s)}$$

La dinámica lineal se obtuvo utilizando una estructura ARX, en este caso se espera obtener una función de transferencia de ganancia unitaria, para esto se utilizó una secuencia binaria pseudoaleatoria para obtener el comportamiento transitorio del sistema. La función de transferencia obtenida, se muestra en la Ecuación (3).

$$\frac{653,1}{S^2 + 51,86s + 645,4} \quad (3)$$

El modelo Hammerstein para el reactor electrolítico se muestra en Fig. 4.

El sistema completo se validó empleando el método de validación cruzada con el modelo obtenido y el reactor electrolítico, los resultados mostrados en Fig. 5 tienen un FIT del 89.22%, RMSE = 0.0586, SD = 0.0057.

3.2 Sistema fotovoltaico

Para los modelos de generación presentados en este trabajo se utilizó un arreglo de 13 paneles solares de EPCOM POWERLINE modelo PRO10012, las características de estos paneles se muestran en la tabla 1.

De acuerdo con las necesidades de alimentación del reactor electrolítico, se determinó que se requiere de un arreglo

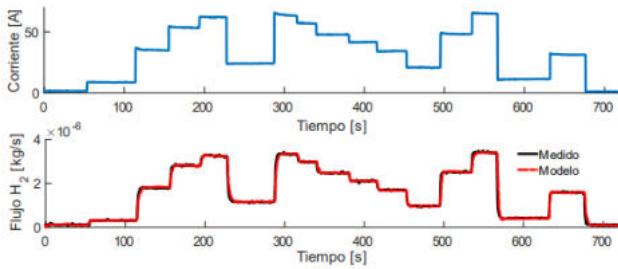


Figura 5. a) Señal de entrada aplicada al modelo y al sistema b) Respuesta del modelo y del sistema.

de 13 paneles solares conectados en paralelo, con el cual se puede obtener una salida máxima de 18 V y 92.3 A cuando la irradiancia alcanza su valor máximo de 1000 W/m² y la temperatura es de 25 °C.

El reactor electrolítico utiliza un voltaje de entrada de 24 V, lo que hace necesario el uso de un convertidor DC/DC para conectar el arreglo fotovoltaico y la celda. Además, este convertidor también incorpora los algoritmos de control necesarios. Los parámetros específicos del convertidor Boost se detallan en la tabla 2.

4. RESULTADOS

4.1 Generación de hidrógeno empleando el algoritmo MPPT

El primer esquema de generación de hidrógeno se basa en la utilización de un sistema fotovoltaico junto con el algoritmo P&O en el convertidor de potencia. Este esquema aprovecha el voltaje y la corriente suministrados por los paneles solares como datos de entrada para el algoritmo, el cual ajusta el ciclo de trabajo del convertidor de potencia para encontrar el punto de máxima potencia (MPP). El objetivo de este esquema es generar la mayor cantidad de hidrógeno posible. La conexión básica de este sistema se puede observar en Fig. 6, mientras que el esquema de simulación desarrollado en Simulink se

Tabla 1. Características del panel solar PRO10012

Pico de potencia	125 W
Voltaje máximo (Vmp)	18 V
Corriente máxima (Imp)	7.1 A
Voltaje en circuito abierto (Voc)	22 V
Corriente de corto circuito (Isc)	7.57 A

Tabla 2. Parámetros del convertidor Boost

Frecuencia de trabajo	100 kHz
Voltaje de entrada	18 V
Voltaje de salida	24 V
Potencia del convertidor	1661.4 W
Inductor	16.25 uH
Capacitor	865 uF

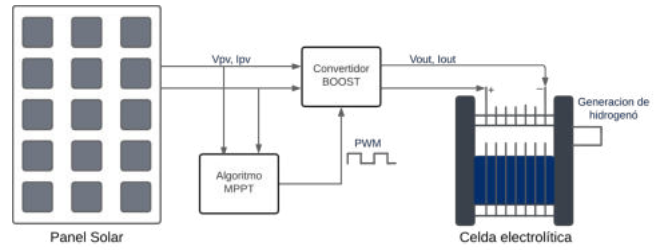


Figura 6. Esquema de conexión entre el sistema fotovoltaico y el reactor electrolítico.

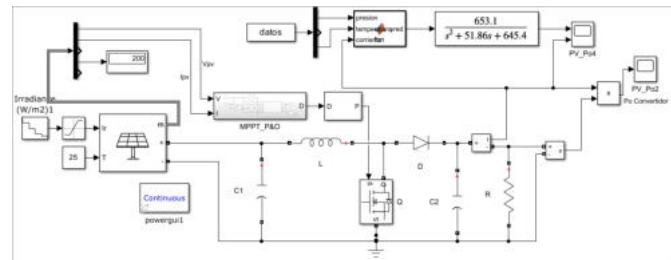


Figura 7. Modelado del sistema utilizando el algoritmo P&O en Simulink.

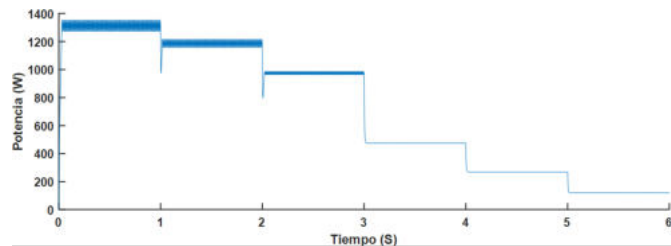


Figura 8. Seguimiento del punto de máxima potencia.

presenta en Fig. 7. La simulación se realizó utilizando el método Dormand-Price a un tamaño de paso fijo de 1E-7.

Durante las simulaciones, se mantuvo la temperatura del sistema fotovoltaico constante a 25 °C, mientras que la irradiancia varió desde 1000 W/m² hasta 200 W/m². El algoritmo P&O se encargó de extraer la máxima potencia de los paneles solares, la cual fue utilizada en su totalidad por el reactor electrolítico. En la figura 8 se muestra la simulación del seguimiento del punto de máxima potencia en el sistema fotovoltaico durante un período de 6 segundos.

La generación de hidrógeno está influenciada por la temperatura y la presión, las cuales se tienen en cuenta en la simulación. Sin embargo, el factor predominante es la corriente eléctrica suministrada por el convertidor de potencia. La Fig. 9.a muestra la cantidad de hidrógeno generado en función de la corriente eléctrica suministrada, que se muestra en Fig. 9.b. Estas gráficas representan la relación directa entre la corriente eléctrica y la generación de hidrógeno en el sistema simulado.

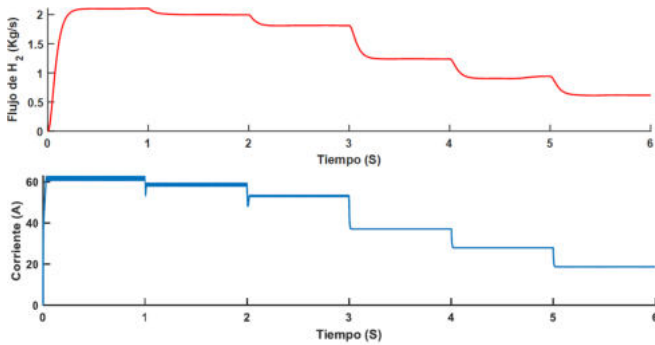


Figura 9. a) Generación de hidrogeno. b) Corriente eléctrica suministrada.

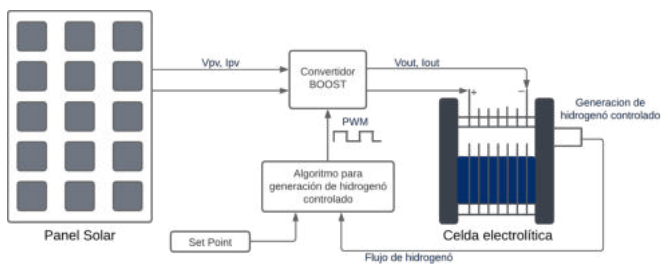


Figura 10. Esquema de conexión entre el sistema fotovoltaico y el reactor electrolítico para generación sobre demanda.

Este esquema, aunque es el más simple de todos, tiene diversas aplicaciones prácticas, tales como:

- Almacenamiento de energía renovable a gran escala.
- Combustible para vehículos de células de combustible.
- Sustitución de combustibles fósiles en procesos industriales.
- Generación de electricidad en plantas de energía.
- Suministro de sistemas de calefacción y refrigeración en entornos residenciales y comerciales.

En estas aplicaciones, el hidrógeno es generado mediante sistemas fotovoltaicos, almacenado en tanques especiales y transportado al lugar donde se utilizará según la necesidad específica.

4.2 Generación de hidrógeno sobre demanda

El objetivo de este esquema es generar hidrógeno de manera controlada utilizando un sistema fotovoltaico. Para lograr esto, se implementa un controlador PID que regula el ciclo de trabajo del convertidor de potencia, ajustando la corriente suministrada para mantener una generación controlada de hidrógeno. Este enfoque permite producir hidrógeno según sea necesario, eliminando la necesidad de almacenamiento, que puede ser costoso e inseguro. El esquema de este sistema se ilustra en Fig. 10, mientras que en Fig. 11, se presenta el esquema de simulación desarrollado en Simulink.

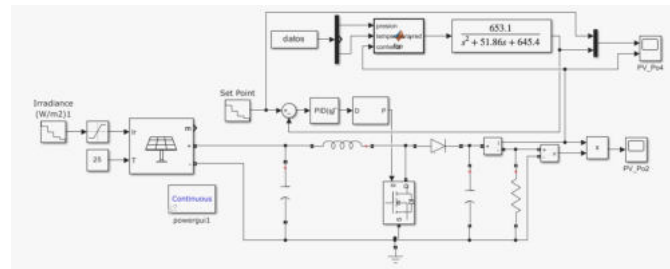


Figura 11. Modelado del sistema utilizando un controlador PID en Simulink

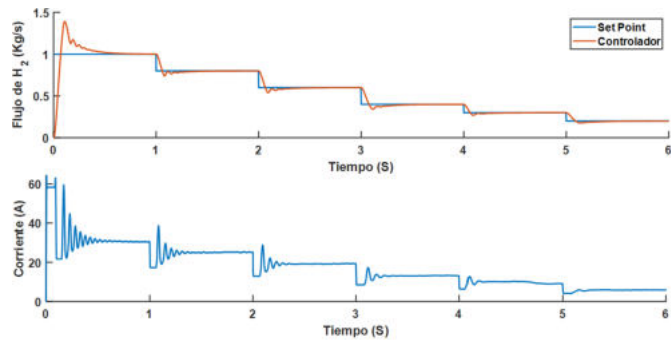


Figura 12. a) Señales de Set Point y generación de Hidrogeno obtenida. b) Corriente eléctrica suministrada al reactor electrolítico.

Durante la simulación de este esquema, se mantuvieron constantes los parámetros del sistema fotovoltaico en comparación al esquema anterior, la temperatura a 25° C y se varió la irradiancia entre 1000 W/m² y 200 W/m². El Set Point de generación de hidrógeno fue ajustado de forma variable y siempre se mantuvo por debajo de la generación máxima posible del sistema. Se utilizó el algoritmo PID para extraer la potencia necesaria de los paneles solares, a fin de mantener la generación de hidrógeno requerida por el sistema a través del convertidor de potencia. En Fig. 12.a muestra la generación de hidrógeno y el Set Point, mientras que Fig. 12.b representa la corriente eléctrica suministrada a la celda electrolítica. En estas gráficas, se puede apreciar tanto la estrecha relación entre la corriente de entrada y la generación de hidrógeno, como la acción de control ejercida por el PID sobre el convertidor de potencia.

En aplicaciones donde el hidrógeno generado pueda ser utilizado al mismo tiempo, la generación sobre demanda es una solución viable que evita la necesidad de tanques voluminosos y costosos, al mismo tiempo que proporciona un uso más seguro del gas. Estas aplicaciones incluyen sistemas industriales que utilizan hidrógeno como sustituto de combustibles fósiles y la industria metalúrgica, donde se utiliza en la refinación de metales.

Aunque este sistema ayuda a reducir costos de almacenamiento y aumenta la seguridad, su eficiencia energética es limitada en comparación con el sistema presentado anteriormente. A pesar de que los niveles de irradiancia solar

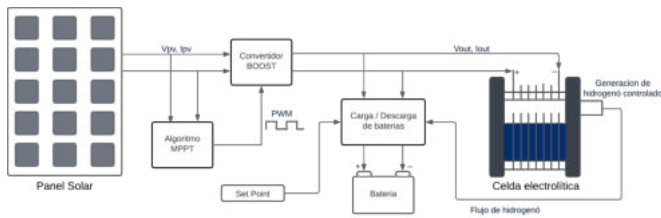


Figura 13. Esquema de conexión entre el sistema fotovoltaico y el reactor electrolítico para generación sobre demanda implementando la carga y descarga de un banco de baterías.

sean los mismos, al utilizar un sistema para mantener una generación controlada, no se aprovecha al máximo la potencia que los paneles solares podrían proporcionar. Cuanto más alejado esté el Set Point de la generación máxima que los paneles pueden ofrecer, menor será la eficiencia del sistema.

4.3 Generación de hidrógeno sobre demanda con sistema de almacenamiento en baterías

El objetivo de este esquema es generar hidrógeno de manera controlada de forma similar al modelo anterior, agregando un sistema de carga y descarga de baterías que permita no solo generar el hidrógeno sobre demanda, sino también utilizar el resto de energía extraído de paneles solares para cargar un banco de baterías, este enfoque es una mejora considerable al modelo anterior, sin embargo, como se puede apreciar en Fig. 13 el esquema es más complicado y requiere de 2 convertidores de potencia, lo que también implica un mayor número de componentes. Para su implementación es necesario reevaluar la topología para la extracción de energía de los paneles solares, así como el algoritmo a implementar, para el segundo convertidor se deberá poner énfasis en la carga y descarga de la batería.

Este esquema representa una solución más completa que requiere un estudio más exhaustivo del sistema. Si bien este trabajo no incluye la simulación o una explicación más detallada de este sistema, se presenta como una introducción al diseño e implementación del mismo, lo cual será abordado en trabajos futuros.

5. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un análisis de diferentes esquemas de generación de hidrógeno en conjunto con un sistema fotovoltaico. En primer lugar, se utilizó el algoritmo P&O para encontrar el punto de máxima potencia en el sistema fotovoltaico y generar la mayor cantidad de hidrógeno posible. También se exploró un esquema de generación controlada a través de un PID que resultó en una subutilización de la energía disponible.

Sin embargo, se encontró que, en este caso de estudio, no se aprovecha al máximo la potencia que los paneles solares proporcionan, principalmente en el caso de demandas

bajas de hidrógeno. Por este motivo se propone como trabajo futuro el conjuntar un sistema de producción de hidrógeno con un sistema de almacenamiento de baterías de la energía sobrante de los paneles solares.

REFERENCIAS

- Brandon, N.P. and Kurban, Z. (2017). Clean energy and the hydrogen economy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2098), 20160400. doi: 10.1098/rsta.2016.0400.
- Chauhan, S.S., Ansari, M.A., and Singh, O. (2021). A comparative analysis of DC - DC boost converter topologies for renewable electrolysis. In *2021 8th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. IEEE. doi: 10.1109/spin52536.2021.9566103.
- E E Granda-Gutiérrez, O A Orta, J C Díaz-Guillén, M A Jimenez, M Osorio, and M A González (2013). Modelado y simulación de celdas y paneles solares. doi: 10.13140/2.1.4192.8968.
- Gámez, D. (2010). El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas. *INS La Ferrería, España*.
- Guilbert, D., Collura, S.M., and Scipioni, A. (2017). DC/DC converter topologies for electrolyzers: State-of-the-art and remaining key issues. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 23966–23985. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.174.
- Islam, O.K., Ahmed, M.S., Rahman, K., and Tahsin, T. (2020). A comprehensive comparison between boost and buck-boost converters in solar MPPT with ANN. In *2020 Emerging Technology in Computing, Communication and Electronics (ETCCE)*. IEEE. doi: 10.1109/etcce51779.2020.9350867.
- Patil, R. and Anantwar, H. (2017). Comparative analysis of fuzzy based MPPT for buck and boost converter topologies for PV application. In *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*. IEEE. doi: 10.1109/smarttechcon.2017.8358610.
- R. B. Bollipo, S.M.y.P.K.B. (2020). Hybrid, optimization, intelligent and classical PV MPPT techniques: Review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. doi: 10.17775/cseejpes.2019.02720.
- Tashie-Lewis, B.C. and Nnabuife, S.G. (2021). Hydrogen production, distribution, storage and power conversion in a hydrogen economy - a technology review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8, 100172. doi: 10.1016/j.cejadv.2021.100172.
- Zaions, D.F., Balbino, A.J., Baratieri, C.L., and Stankiewicz, A.L. (2017). Comparative analysis of buck and boost converters applied to different maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. In *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*. IEEE. doi:10.1109/cobep.2017.8257383.