

# Diseño Optimizado y Simulación de Circuito de Excitación en la Producción de Hidrógeno Verde Usando Energía Fotovoltaica

## Optimized Design and Simulation of Excitation Circuit in the Production of Green Hydrogen Using Photovoltaic Energy

Juan F. Tisza C., MSc.<sup>1,2</sup>, Paulo R. Quispe C., BSc.<sup>1</sup>, Félix Santos C., BSc.<sup>1</sup>, Mauro B. Montoya A., BSc.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería, <sup>2</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
[jtisza@uni.edu.pe](mailto:jtisza@uni.edu.pe), [paulo.quispe.c@uni.pe](mailto:paulo.quispe.c@uni.pe), [fsantosc@uni.pe](mailto:fsantosc@uni.pe), [mauro.montoya@unmsm.edu.pe](mailto:mauro.montoya@unmsm.edu.pe)

**Abstract:** *The work presents the optimized design and simulation of an excitation circuit that is applied to the electrolyzing unit of the green hydrogen production process using photovoltaic energy as primary source, the optimized design considers the efficient use of the primary energy required, for which is implemented in the control unit of a boost type DC-DC electronic power converter, the evaluations and tests, at simulation level, are performed through three control algorithms with the objective of working at the maximum power point of the photovoltaic panel, the test is evaluated through maximum power point tracking (MPPT) algorithms [1], [2], [3] and the one with the best operating characteristics in relation to the specific application considered in this study is selected. The optimization also contemplates the considerations of maximum efficiency in hydrogen production, considering the electrical equivalent circuit of the electrolyzer (EEC) for the developed design [7], proposals for possible improvements in efficiency proposed in previous studies are evaluated (Aguilar-Jaramillo and Aguinaga) [7]. The proposed circuit is tested under different operating conditions, which support the conclusions and recommendations of the research whose results are shown in this work. MATLAB and SIMULINK are used in the tests and simulations presented in this work.*

**Keywords**—Green Hydrogen, Electrolyzer, Maximum Power Points (MPPT), Boost Power Electronic Converter.

**Resumen:** *El trabajo presenta el diseño optimizado y la simulación de un circuito de excitación que se aplica a la unidad de electrolización del proceso de producción de hidrógeno verde utilizando energía fotovoltaica como fuente primaria, el diseño optimizado considera el uso eficiente de la energía primaria requerida, para lo cual se implementa en la unidad de control de un convertidor electrónico de potencia DC-DC elevador de tensión de tipo boost, las evaluaciones y pruebas, a nivel de simulación, son efectuadas a través de tres algoritmos de control con el objetivo de trabajar en el punto de máxima potencia del panel fotovoltaico, el ensayo se evalúa a través de algoritmos de rastreo de los puntos de*

*máxima potencia (MPPT)[1],[2],[3] y se selecciona el que tiene las mejores características operativas en relación con la aplicación específica que se considera en este estudio. La optimización también contempla las consideraciones de máxima eficiencia en producción de hidrógeno, considerando el circuito equivalente eléctrico del electrolizador (EEC) para el diseño desarrollado [7], se evalúan propuestas de posibles mejoras en la eficiencia propuestas en estudios previos (Aguilar-Jaramillo y Aguinaga) [7]. Se prueba el circuito propuesto en diversas condiciones de operación, las que fundamentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación cuyos resultados son mostrados en este trabajo. Se utiliza MATLAB y SIMULINK en los ensayos y simulaciones que se presentan en el presente trabajo.*

**Palabras clave**—Hidrógeno verde, Electrolizador, Puntos de máxima potencia (MPPT), Convertidor electrónico de potencia boost.

### I. INTRODUCCIÓN

La reducción de gases contaminantes como el dióxido de carbono y monóxido de carbono, así como también en otros gases que contribuyen al efecto invernadero, son preocupaciones importantes de la humanidad, estos compromisos están establecidos por naciones del planeta, a fin de preservar el medio ambiente, mitigar el cambio climático y combatir el efecto invernadero en el planeta. En el 2015 las Naciones Unidas (UN) presentaron 17 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) los cuales constituyen compromisos a ser cumplidos en el año 2030 y de manera especial los objetivos 7 y 13 que fijan el tener una generación energética asequible y no contaminante, así como tener una acción responsable respecto a los cambios climáticos respectivamente [8] [9].

Cabe mencionar que uno de los más importantes consumidores de energía contaminantes es el parque automotor, por lo que se plantea un sustantivo cambio en la matriz energética de cada país en el futuro cercano.

En general una limitación de la generación energética con energías renovables lo constituye la falta de continuidad del

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.627>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

recurso energético y consecuentemente la falta de confiabilidad en el suministro correspondiente, este aspecto es superado en la medida que se pueda desarrollar sistemas de almacenamiento energético con considerable capacidad y con alta densidad energética. También se debe considerar la energía eléctrica como una de las mejores formas de administrar la energía, en este sentido los sistemas eléctricos presentan ventajas en la generación, transformación, transmisión y distribución de la energía a diferencia de otras formas de manejo de la energía.

Una alternativa que puede ser eficiente y relativamente práctica para el almacenamiento energético es el uso del hidrógeno verde. Entre sus ventajas se tiene que el hidrógeno es un componente abundante y de alta densidad energética, como se muestra en la figura 7 y al tener como excitación la energía fotovoltaica se constituye en un combustible limpio y su producción representa un aporte a la reducción significativa de la contaminación ambiental, es en consecuencia una alternativa ventajosa para el almacenamiento energético tanto fijo como y transportable. Su utilización, por tanto, es importante como almacenamiento de respaldo energético para aplicaciones en diversas áreas como la electromovilidad, en la industria minera, agrícola, y dependiendo de los recursos naturales que dispongan puede convertirse en un producto de exportación, contribuyendo al desarrollo socio económico de un país. Una desventaja que puede atribuirse al hidrógeno verde (H<sub>2</sub>v) es que para su almacenamiento y transporte requiere una unidad de compresión a presiones relativamente altas.

#### Al.-Formas de Producción del Hidrógeno

El Hidrógeno tiene características ventajosas respecto a otros elementos como, materia para el almacenamiento de la energía, también tiene algunas desventajas estos aspectos son sintetizados en las tablas I y II

TABLA I  
PROPIEDADES CUALITATIVAS Y CUANTITATIVAS DEL  
HIDRÓGENO

ALGUNAS PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO	
Poder calorífico inferior (PCI)	120[MJ/Kg]
Emisiones contaminantes	No
Producto de la combustión	H <sub>2</sub> O
Posibilidad de obtención de energía Eléctrica sin máquina térmica	Si
Incoloro	Si
Inodoro	Si
Insípido	Si
Veneno	No
Se combina con oxígeno de aire sin Energía de activación- límites de explosión	4%-75%
Densidad estado gaseoso	0,0899[Kg/Nm <sup>3</sup> ]
Densidad estado líquido	0,0708[Kg/l]

TABLA II  
DENSIDADES ENERGETICAS COMPARADAS CON OTROS  
COMBUSTIBLES

MATERIAL-CONDICIONES	DENSIDAD [KG/M3]	VOLUMEN [KWH/M3]	MASA [KWH/M3]
H <sub>2</sub> líquido (1Bar;-252.8°C)	70,71	2375	33,59
H <sub>2</sub> líquido (300Bar;25°C)	20,55	690	33,59
H <sub>2</sub> líquido (700Bar;-25°C)	47,96	1611	33,59
Gas natural (1Bar;25°C)	0,65	9,1	13,93
Butano líquido (25°C)	550	7000	12,73
Gasolina	750	9270	12,36

Para obtener hidrógeno hay una variedad de formas dependiendo del tipo de energía primaria que utiliza. A continuación, indicamos algunos tipos de producción, en el caso del presente trabajo se utiliza la energía PV y un proceso de electrolisis, donde el agua es descompuesta utilizando la energía eléctrica, entre otros procesos de producción se menciona las siguientes: [12]

- Descomposición de gas natural por arco de plasma (gas natural)
  - Con energía térmica:
- Termólisis
- Termo catálisis
- Proceso termoquímico
  - Energía fotónica:
  - Fotocatálisis (agua)
  - Método fotoelectroquímico (agua)
  - Bio-fotólisis (agua)

Como se mencionó con anterioridad, en el estudio presente trabajo se aplica la electrólisis.

En breves palabras el sistema de generación consta de dos electrodos que están conectados a un flujo de energía eléctrica y sumergidos en una solución (agua), el conectado al polo positivo es conocido como ánodo y el conectado al polo negativo como cátodo, cada electrodo atrae a los iones opuestos, así el ánodo atrae a los iones negativos y es el lugar donde aparece el oxígeno, mientras que en el cátodo se atraen a los positivos haciendo que el hidrógeno se concentre en dicho punto de la celda.

Existen aspectos prácticos que en el proceso de experimentación física se debe tener en cuenta a fin de evitar accidentes, entre ellos podemos citar que se debe cuidar mucho que los dos gases que se obtienen en el proceso de generación del hidrógeno nunca entren en contacto pues al entrar en contacto pueden explotar en razón a que tanto el oxígeno como el hidrógeno resultante se encuentran en proporción estequiometría.

El proceso siempre se realiza con corriente continua. Por otro lado, la característica identificadora del electrolizador es el caudal de flujo de hidrógeno producido.

## A2. Motivación e Importancia del Estudio.

Un aspecto que es determinante en relación al futuro en materia energética es el avance que debe haber en los próximos años en materia de sistemas de almacenamiento energético, esta es una consideración que será determinante para poder realizar los cambios disruptivos en materia de suministros energéticos para los diversas aplicaciones a nivel productivo e industrial en los sistemas que requieren energía para desarrollar las actividades de transporte y productivas que no estén confinadas a posiciones fijas o restringidas.

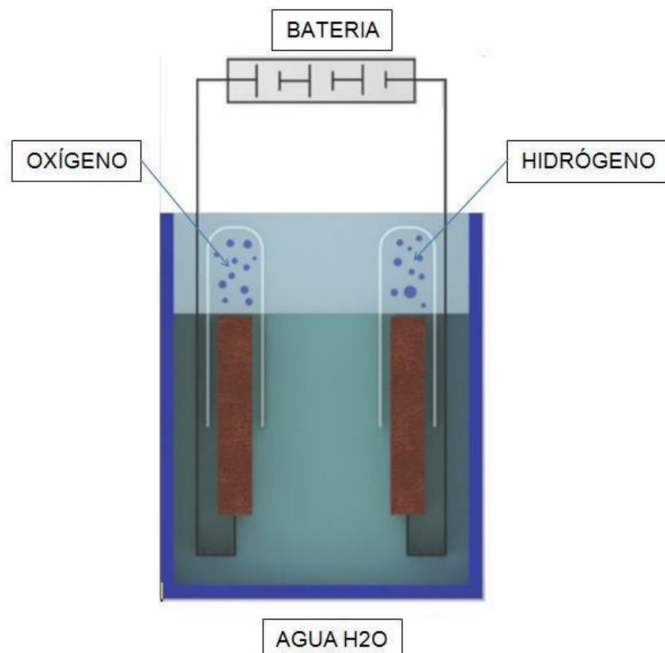


Fig.1 Esquema de funcionamiento del electrolizador [12]

En la figura 7 se puede apreciar la ventajosa posición que tiene el hidrógeno como un material para la cantidad de almacenamiento de energía y para la capacidad de tiempo de suministro que tiene, en comparación con los sistemas actualmente operativos.

En el estudio de “Hidrógeno como Vector Energético” [10] podemos apreciar la prospectiva hacia el 2050, en donde se aprecia para ese año los pronósticos obtenidos en el mencionado estudio nos ilustra que más de la mitad de los vehículos en el mundo serán de tipo eléctrico o alimentados con hidrógeno, lo cual nos muestra la importancia que tiene una investigación relacionada con la producción de hidrógeno verde, pues va a tener significancia y trascendencia en los próximos años. En la figura 2 se puede observar la evolución del uso de combustibles usados en el parque automotor mundial.

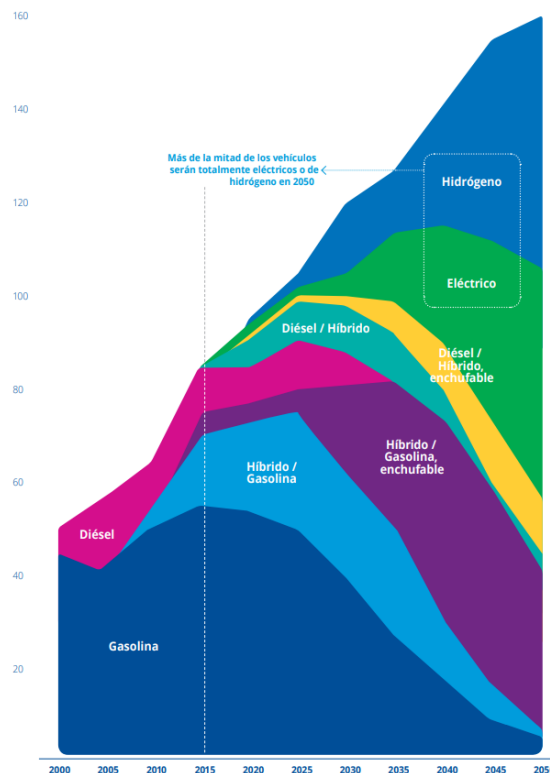


Fig. 2 proyección al 2050 de la utilización de combustibles en el parque automotor [10]

## II. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En relación con las técnicas de MPPT el estudio que realizan: M. E. El Telbany, A. Youssef y A. A. Zekry, en su trabajo denominado “Intelligent Techniques for MPPT Control in Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review,” [1] hace una revisión comparativa de las diferentes técnicas de aplicación de algoritmos MPPT para el rastreo de puntos de máxima potencia en las características Potencia vs voltaje en los paneles fotovoltaicos. El estudio realiza una evaluación de 10 tipos de soluciones del requerimiento de rastrear y trabajar en los puntos de MPP del panel PV, se hace la evaluación teniendo en cuenta el aspecto de la complejidad, la facilidad de aprendizaje, en el consumo de potencia y en cuanto al tiempo de respuesta. En los resultados se aprecia que los métodos que utilizan redes neuronales, algoritmos genéticos son los que mejor performance técnica tienen, pero esto se contrasta con el alto número de parámetros involucrados, lo que los convierte en bastante complejos para los requerimientos que se tiene normalmente en operación y esta característica los hace poco recomendable a menos que sea absolutamente necesario tener niveles de “inteligencia” más exigentes para ciertas aplicaciones especiales.

En cuanto a la aplicación de la excitación al electrolizador, el estudio realizado por Aguilar-Jaramillo E., y Aguinaga A., denominado "Modelamiento y Simulación de la Producción de hidrógeno en un Electrolizador a Partir de Vapor Sobrecalentado de Agua," [7] nos proporciona un circuito equivalente eléctrico del electrolizador y mediante un estudio bastante exhaustivo determina los valores que deben tener los componentes del modelo en forma de circuito eléctrico para tener una adecuada aproximación que permite optimizar el objeto de la investigación, además en la parte final se propone una mejora en el modelamiento que postula que variando la forma de la alimentación eléctrica en el electrolizador se conseguiría incrementar la eficiencia en la producción de hidrógeno.

En relación con el estudio realizado por Soto Alegre O. E., denominado "Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada" [11] se desarrolla toda una metodología de implementación física del electrolizador. El trabajo es desarrollado etapa por etapa y explica la mejor solución que propone para la construcción del electrolizador en pasos claramente definidos, también en el estudio se hace una evaluación comparativa de los detalles constructivos y operativos de electrolizadores diferentes como el tipo PEM (Membrana de intercambio de protones) y el SOE (Electrolizador con Oxido de silicio), en cada caso se recomienda de acuerdo a la aplicación específica seleccionar el que mejor se adapta para una determinada aplicación, sin embargo en términos generales el PEM, es el más recomendado para el caso que se estudia.

### III. MARCO TEÓRICO - METODOLOGÍA

El proceso de producción de hidrógeno verde incorpora la utilización de energía eléctrica a partir de fuentes primarias renovables, en el caso de la investigación presentada se utiliza la generación fotovoltaica, se utiliza la electrolisis para producir hidrógeno. Lo que se produce es la ruptura de la molécula de agua produciendo oxígeno e hidrógeno en forma de gas, para conseguir esto es necesario alimentar al proceso con voltaje eléctrico de tipo DC y también se debe suministrar agua. Una vez separado el hidrógeno tiene que ser almacenado a una presión suficientemente elevada para depositarlos en recipientes este proceso general es presentado en la figura 3.

En el trabajo que se presenta en este artículo se tiene los resultados del diseño e implementación a nivel de simulación de la producción del hidrógeno en el electrolizador, para poder conseguir la mayor eficiencia se hace trabajar al panel fotovoltaico en los puntos de máxima potencia lo que hace que apliquemos tres tipos de algoritmos MPPT, uno de ellos es el clásico Perturbar y Observar, el segundo es utilizando el método de la inductancia incremental y finalmente el tercer método que diseñamos y ensayamos es el que se implementa

aplicando control con lógica difusa. Se realiza toda esta evaluación a fin de conseguir la mayor optimización en el sistema de producción de hidrógeno verde.

Para poder realizar el diseño y las simulaciones es necesario que obtengamos un circuito equivalente del electrolizador y esto lo implementamos empleando la propuesta presentada por Aguilar-Jaramillo y Aguinaga [7] incluyendo el resultado de sus estudios en cuanto a la mejora aplicando una excitación pulsante a la frecuencia de resonancia del circuito equivalente, con lo cual según la propuesta de los autores de dicho estudio se incrementa en más de 8% la producción de hidrógeno.

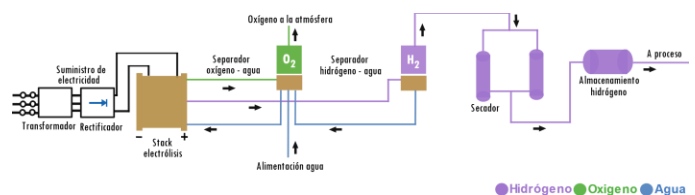


Fig. 3 Proceso completo de generación y almacenamiento de hidrógeno verde [10]

La metodología con que se ha desarrollado la investigación se puede visualizar de alguna forma en el diagrama de bloques que se presenta en la figura 4, donde se tienen 4 bloques que son diseñados con el criterio de optimizar la producción de hidrógeno en el proceso.

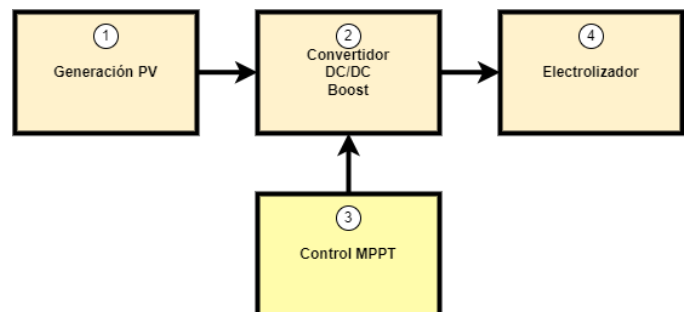


Fig. 4. Diagrama de Bloques del Sistema excitador del Electrolizador

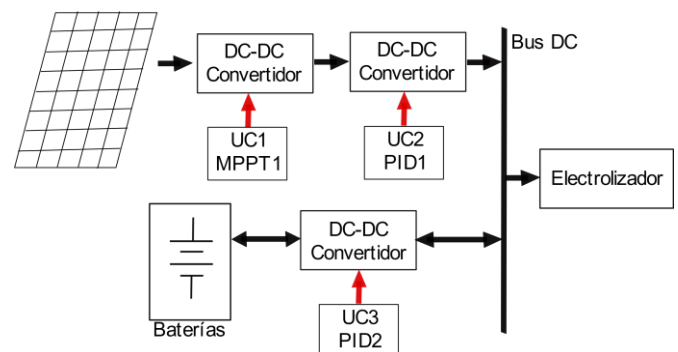


Fig. 5. Microred de excitación del electrolizador.

TABLA III  
DATOS DEL PANEL FOTOVOLTAICO

Potencia (W) (Condiciones de prueba estándar)	5400.86
Potencia (W) (Condiciones de prueba de PVUSA)	-
Bifacial	No
Bifacialidad (%)	-
Tolerancia de potencia inferior (%)	-
Tolerancia de potencia superior (%)	-
Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> ) (Condiciones de prueba estándar)	1000.00
Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> ) (Condiciones de prueba de PVUSA)	-
Eficiencia del módulo (%)	-
Eficiencia de la celda (%)	-
Vmp (V) Tensión en máxima potencia	121,24
Imp (V) Corriente en máxima potencia	44,64
Voc (V) Tensión en circuito abierto	125,50
Icc (V) Corriente en corto circuito	48,04
Tensión máxima del sistema	-
Serie del fusible	-
Diodo bypass	-
Temperatura de la celda en operación nominal (°C)	35,2
Coefficiente de Temperatura de la Voc (% / °C)	-0,362
Coefficiente de Temperatura de la Icc (% / °C)	0,055
Coefficiente de Temperatura de la Pmax (% / °C)	-0,52

En el bloque 1 tenemos la generación de energía que utiliza un panel fotovoltaico cuyas características son presentadas en la TABLA III, las curvas de respuesta del panel fotovoltaico utilizado, que está constituido por un arreglo de 4 módulos en serie y 6 cadenas (strings) en paralelo, se muestran en la figura 6. A partir de la información obtenida se diseña el convertidor de potencia DC-DC de tipo elevador (boost.); el bloque de control actúa sobre el MOSFET del convertidor y es en este

bloque donde se implementan los algoritmos MPPT, que evaluamos en este trabajo, los diagramas de flujo de dos de estos algoritmos son mostrados en las figuras 8 y 9.

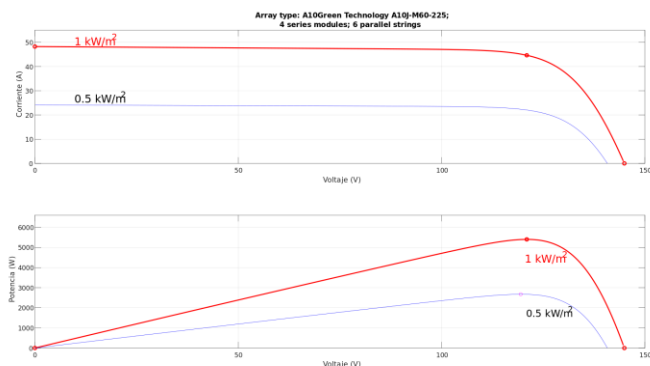


Fig. 6 Curvas de respuesta del panel fotovoltaico [A10 GREEN TECHNOLOGY A10J-M60-225]

El estudio de Aguilar-Jaramillo y Aguinaga [7] muestra que la tensión óptima para conseguir la mejor producción de hidrógeno es de 1.33 V por celda, en la presente investigación se trabaja en alrededor de dicho valor, por cuanto se alimenta 86 celdas en serie, por lo tanto, la alimentación debe ser alrededor 114.38V.

TABLA IV  
VALORES DE LOS COMPONENTES DEL MODELO DEL ELECTROLIZADOR

Lcc (H)	1,06E-04
Rcc (Ω)	10,6
Rcátodo (Ω)	15,9
Ccátodo (F)	9,40E-06
Relectrolito (Ω)	7,2
Celectrolito (F)	9,40E-06
Frecuencia de resonancia (Hz)	6821

Se utiliza un circuito eléctrico como modelo del Electrolizador, considerando la investigación de Aguilar-Jaramillo y Aguinaga [7], los valores de los componentes del modelo son presentados en la TABLA I.

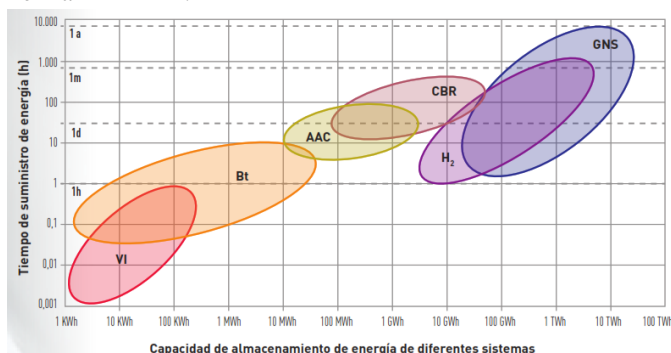


Fig. 7 Comparación entre diversos sistemas de almacenamiento de energía.[10]

#### IV. DISEÑO/SIMULACIONES

El circuito implementado a nivel de simulación se ha desarrollado con los valores de las tablas 3 y 4 y se han usado las ecuaciones (1), (2), (3) y (4).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1-D)} \dots(1)$$

$$I_{LB} = \frac{V_{pv}DT_S}{2L_{IB}} \dots(2)$$

$$\frac{V_{pv}}{I_{pv}} = R_o(1-D)^2 \dots(3)$$

Donde:

$V_{pv}$ : Voltaje de entrada del convertidor boost  $pv$

$I_{pv}$ : Corriente en la entrada del convertidor boost  $pv$

$L_{IB}$ : Inductancia y corriente crítica entre el modo de conducción continua y  $IB$  e  $ILB$  discontinua

$D$ : Duty cycle

$T_s$ : Periodo de conmutación (donde  $T_s=1/f_s$ )

Ecuaciones de lógica difusa:

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \dots(4)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1)$$

A continuación, se presentarán los diagramas de flujo de los algoritmos implementados en cada uno de los métodos de control que se han efectuado.

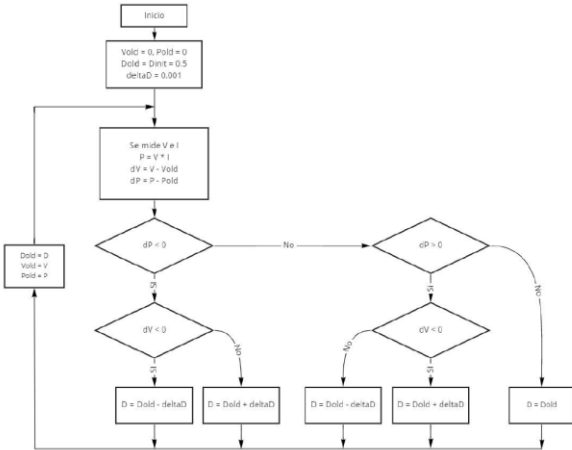


Figura 8: Diagrama de flujo del bloque de MPPT para el algoritmo de Pertubar y Observar.

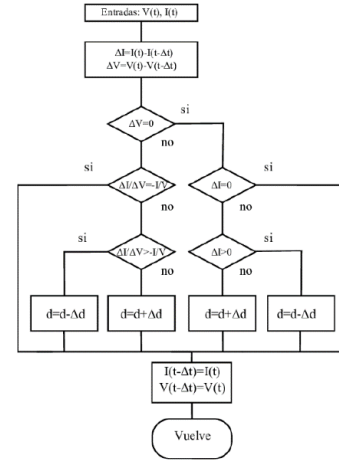


Figura 9: Diagrama de flujo de la conductancia incremental. En las figuras (10), (11) y (12) se muestran los circuitos que son materia del estudio que son probados con el software Simulink.

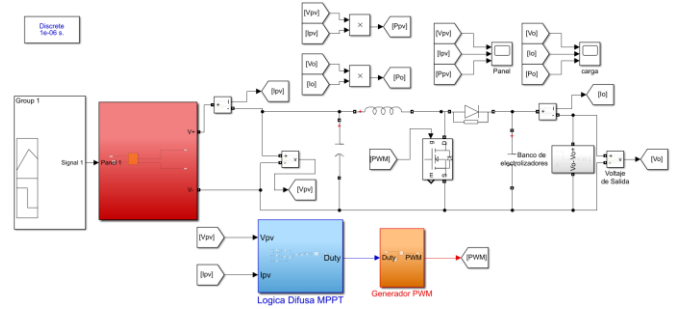


Figura 10: Circuito de implementación del método de control lógica difusa en Simulink.

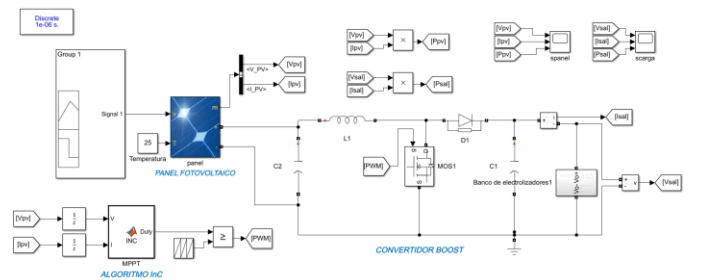


Figura 11: Circuito de implementación del método de control conductancia incremental en Simulink.

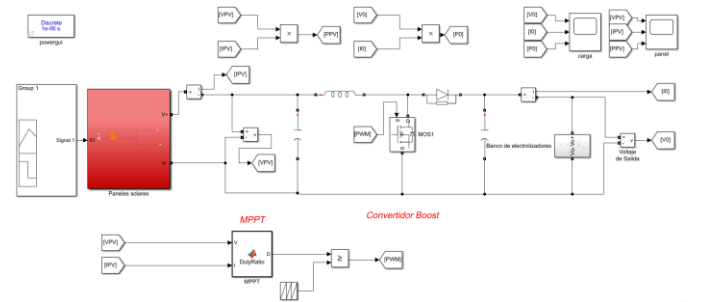


Figura 12: Circuito de implementación del método de control perturba y observa en Simulink.

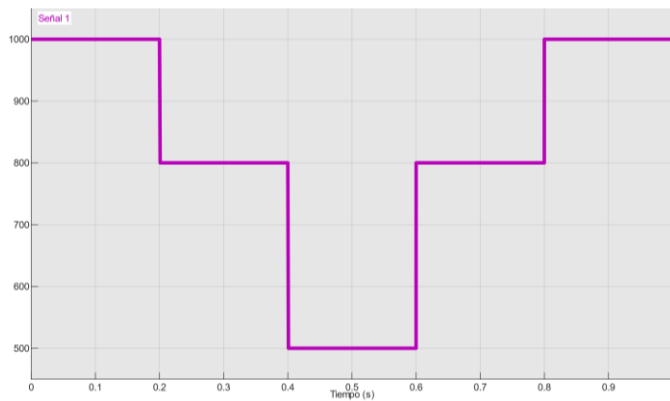


Figura 13: Señal variable de irradiancia.

En las figuras (14) y (15) se muestran los circuitos equivalentes usados para el electrolizador

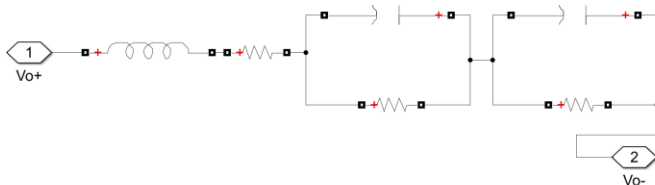


Figura 14: Circuito equivalente del electrolizador.

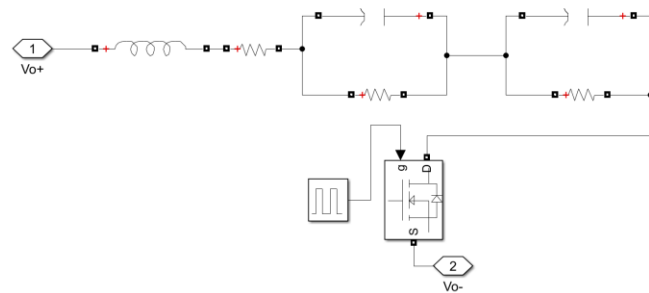


Figura 15: Circuito equivalente del electrolizador con excitación pulsante.

## V. RESULTADOS

Las simulaciones mostradas en el conjunto de figuras desde la 16 hasta la 33 muestran las variaciones la radiación y las dinámicas de respuesta de los experimentos realizados con los 3 algoritmos de MPPT aplicados circuito de excitación. En dichos experimentos se obtienen los resultados mostrados en las figuras correspondientes, donde se aprecia que los algoritmos responden bien antes las variaciones de la irradiancia.

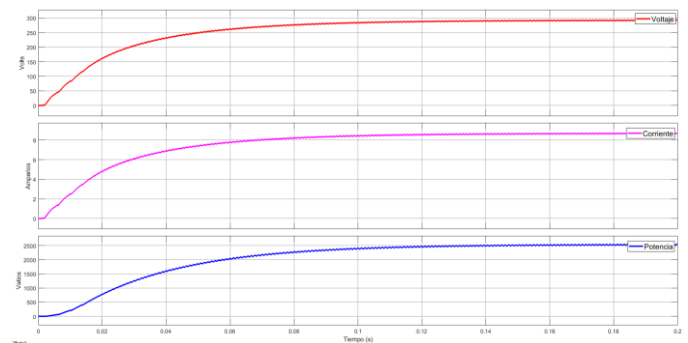


Figura 16: Método perturba y observa con 500 de irradiancia resultados en la carga.

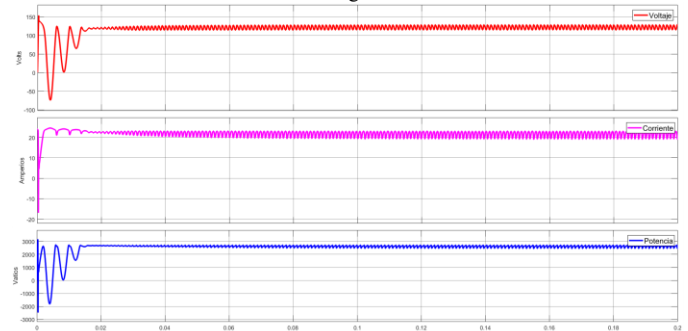


Figura 17: Método perturba y observa con 500 de irradiancia, resultados en el panel.

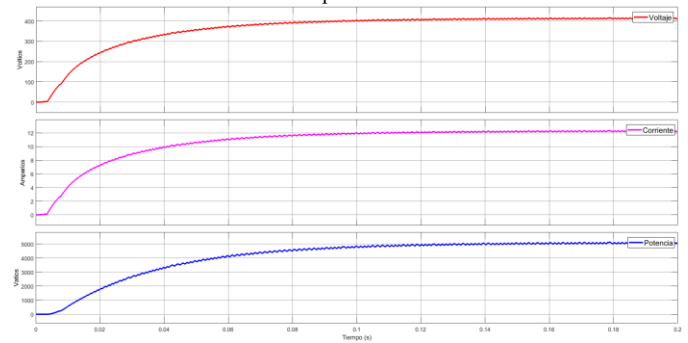


Figura 18: Método perturba y observa con 1000 de irradiancia, resultados en la carga.

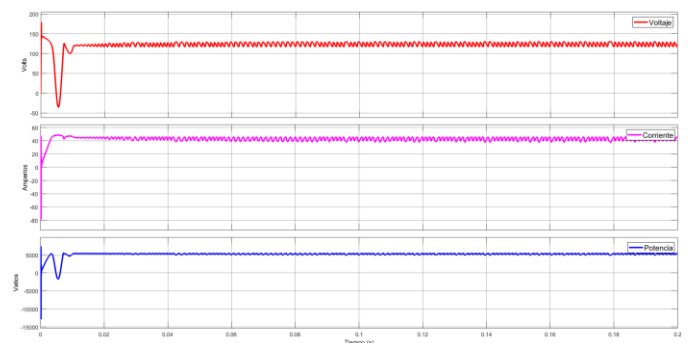


Figura 19: Método perturba y observa con 1000 de irradiancia, resultados en el panel.



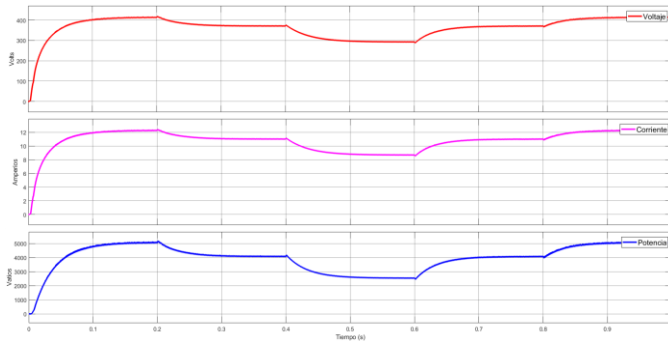


Figura 20: Método perturba y observa con irradiancia variable, resultados en la carga.

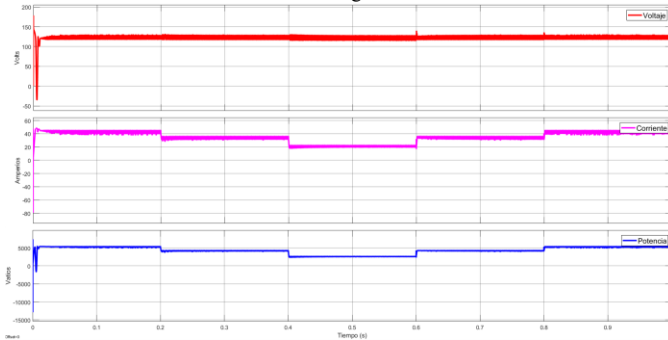


Figura 21: Método perturba y observa, con irradiancia variable resultados en el panel.

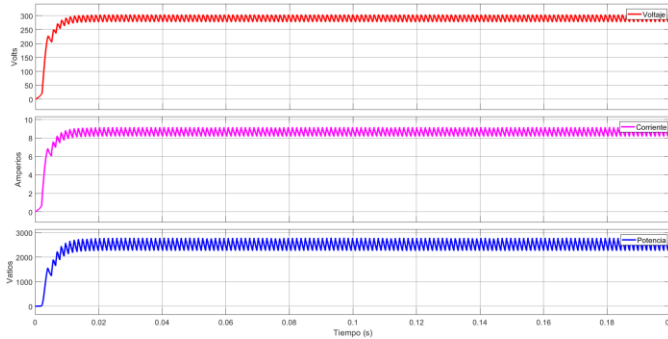


Figura 22: Método de capacitancia incremental con 500 de irradiancia, resultados en la carga.

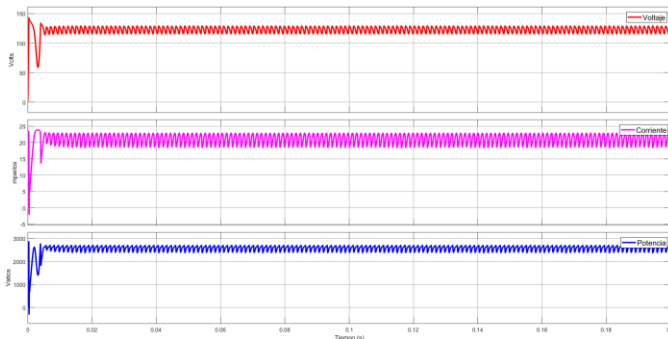


Figura 23: Método de capacitancia incremental con 500 de irradiancia resultados en el panel.

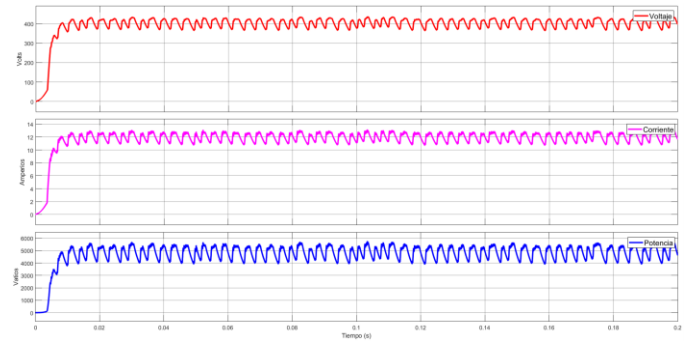


Figura 24: Método de capacitancia incremental con 1000 de irradiancia, resultados en la carga.

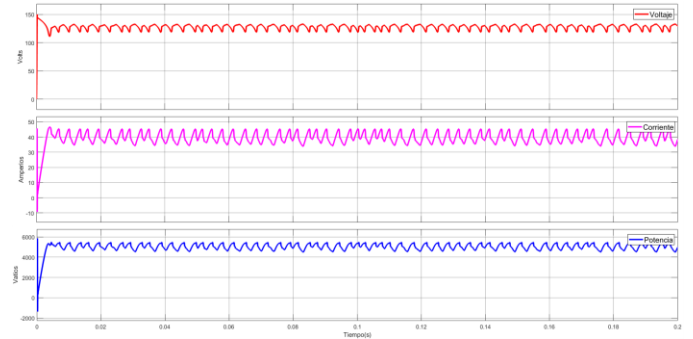


Figura 25: Método de capacitancia incremental con 1000 de irradiancia resultados en el panel.

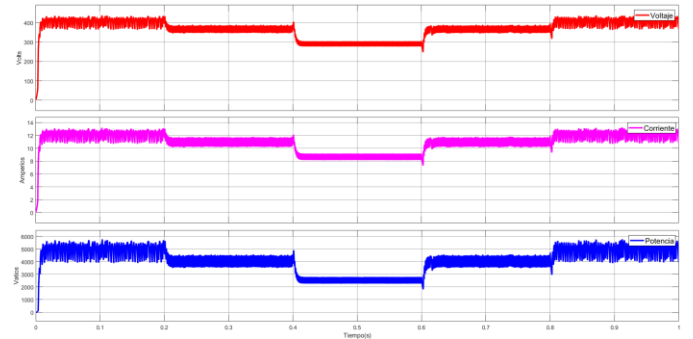


Figura 26: Método de capacitancia incremental con irradiancia variable, resultados en la carga.

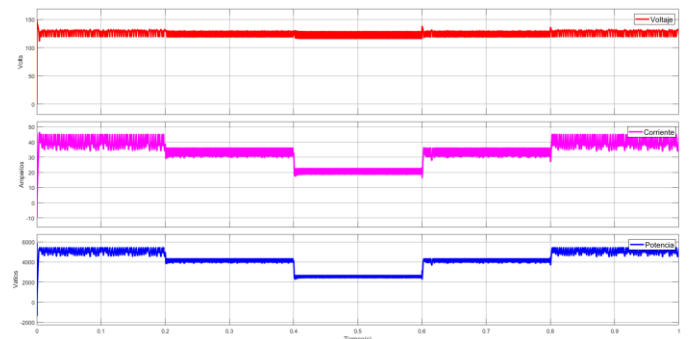


Figura 27: Método de capacitancia incremental con irradiancia variable, resultados en el panel.



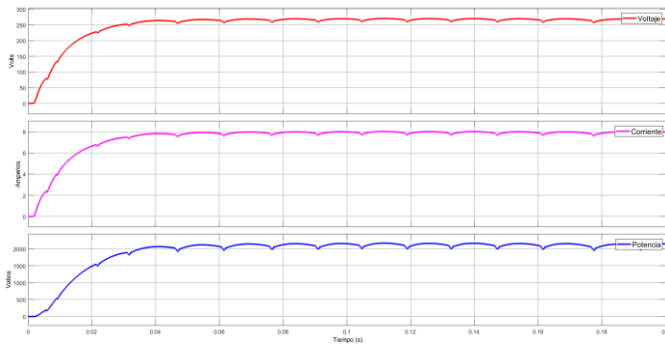


Figura 28: Método lógica difusa con 500 de irradiancia, resultados en la carga.

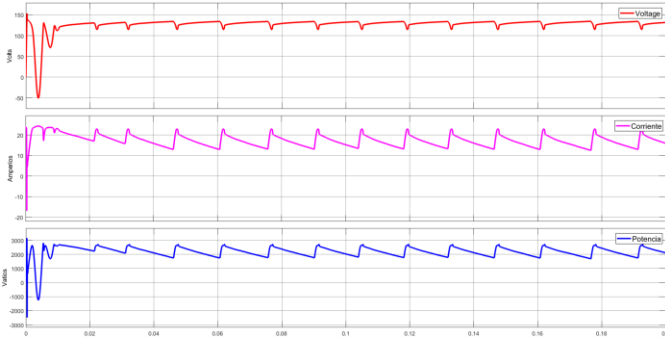


Figura 29: Método lógica difusa con 500 de irradiancia, resultados en el panel.

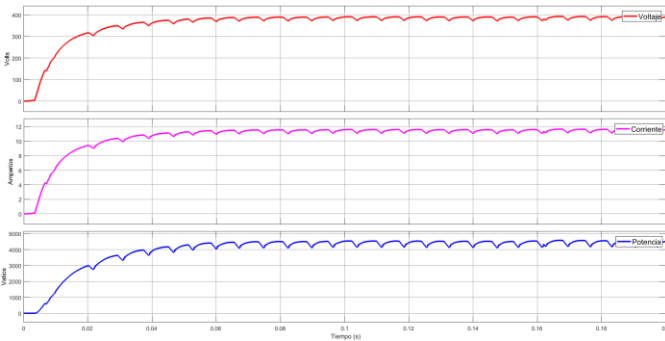


Figura 30: Método lógica difusa con 1000 de irradiancia, resultados en la carga.

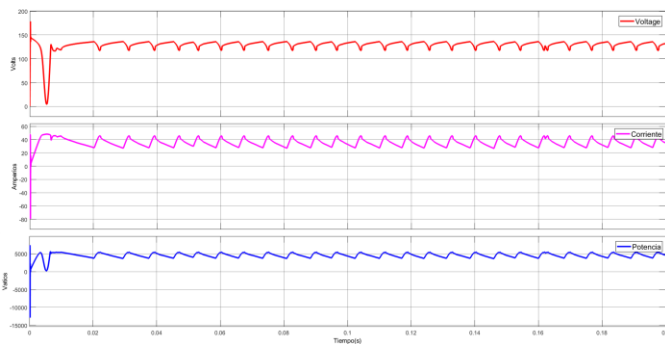


Figura 31: Método lógica difusa con 1000 de irradiancia, resultados en el panel.

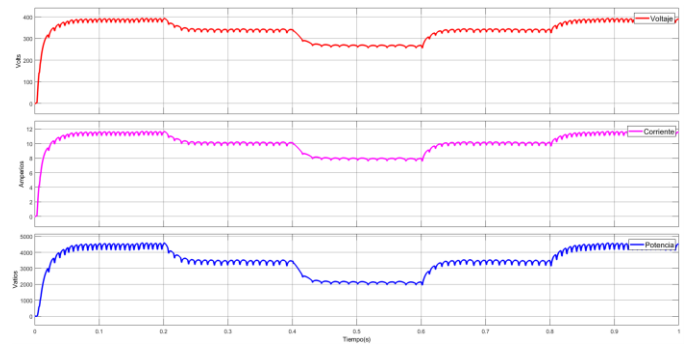


Figura 32: Método lógica difusa con irradiancia variable resultados en la carga.

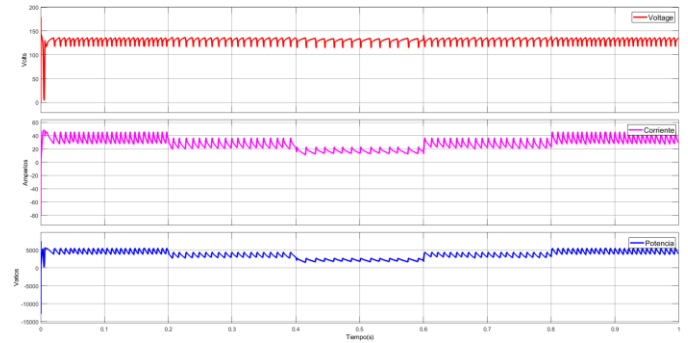


Figura 33: Método lógica difusa con irradiancia variable, resultados en el panel.

### Resultados del circuito a una excitación pulsante:

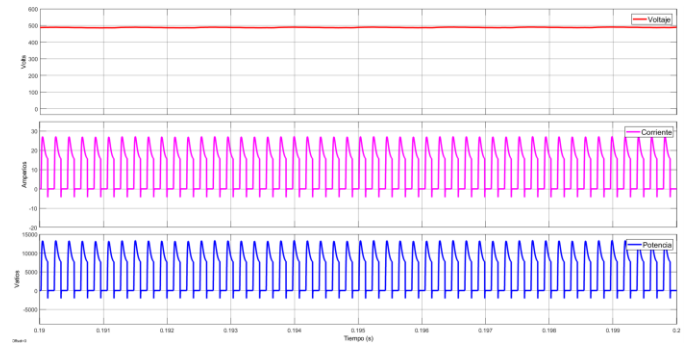


Figura 34: Método perturba y observa con irradiancia 1000 y excitación pulsante resultados en la carga.

De acuerdo con lo propuesto por Aguilar-Jaramillo y Aguinaga [7] que postulan que la producción de hidrógeno mejora en un 8% al aplicarse una excitación pulsante en la experimentación del circuito se encontró que con la excitación pulsante no se consigue mejorar la producción de hidrógeno y la mejor respuesta es obtenida a la frecuencia de resonancia de 4800 Hertz, donde se observa una reducción del 2.4% en la producción de hidrógeno, esto es corroborado por la figura 34.

En las tablas V y VII se presentan en forma comparativa los rendimientos que tienen los algoritmos en el objetivo de trabajar en el punto de máxima potencia correspondientes a unas

irradiancias de 500 W/m<sup>2</sup> y 1000 W/m<sup>2</sup> respectivamente, teniendo como referencia comparativa las curvas y datos característicos del panel utilizado, a su vez se presentan las tablas VI y VIII en las cuales se muestra una comparativa en la eficiencia de la potencia entregada a la carga al aplicar los diferentes algoritmos.

TABLA V  
Comparación de rendimiento de algoritmos a 500 W/m<sup>2</sup>

Algoritmo	Vpanel (Voltaje)	Ipanel (Amperios)	Wpanel (Watts)	Rendimiento
Pert. y Obs.	125.4	39.83	2594	97.04%
Cap. inc.	122.5	20.97	2560	95.77%
Log. difusa	127.4	17.31	2179	81.52%

TABLA VI  
Comparación de eficiencia de potencia entregada a la carga a 500 W/m<sup>2</sup>

Algoritmo	Vcarga (Voltaje)	Icarga (Amperios)	Wcarga (Watts)	Eficiencia entrega pot.
Pert. y Obs.	290.3	8.625	2503	96.49%
Cap. inc.	285.2	8.46	2450	95.70%
Lóg. difusa	251	7.453	1937	88.89%

TABLA VII  
Comparación de rendimiento de algoritmos a 1000 W/m<sup>2</sup>

Algoritmo	Vpanel (Voltaje)	Ipanel (Amperios)	Wpanel (Watts)	Rendimiento
Pert. y Obs.	121.5	42.83	5182	95.96%
Cap. inc.	127.6	39.45	5017	92.91%
Lóg. difusa	129.7	35.45	4558	84.41%

TABLA VIII  
COMPARACIÓN DE EFICIENCIA DE POTENCIA ENTREGADA A LA CARGA A 1000 W/m<sup>2</sup>

Algoritmo	Vcarga (Voltaje)	Icarga (Amperios)	Wcarga (Watts)	Eficiencia entrega pot.
Pert. y Obs.	407.6	12.12	4991	96.31%
Cap. inc.	395.2	11.73	4734	94.36%
Lóg. difusa	360.2	10.63	4000	87.76%

## VI. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

1. Los algoritmos se encuentran funcionando correctamente aun cuando están siendo sometidos a variaciones en la radiación solar.
2. El modelo desarrollado para el electrolizador resulta válido en cuanto a la representación circuital del proceso que es electroquímico.
3. Las pruebas que se realizaron no permiten comprobar la propuesta de mejorar la producción de hidrógeno al alimentar con excitaciones pulsantes habiendo obtenido valores cercanos al funcionamiento sin pulsaciones.

4. Esta investigación es la base para poder desarrollar todo el proceso completo de producción del hidrógeno verde.
5. En esta investigación se ha experimentado con un conjunto de celdas de electrolisis conectadas en serie, considerando que el voltaje en cada celda se encuentre en los rangos adecuados para una eficiente reacción electroquímica. El objetivo de asociarlas de esta forma permite incrementar la producción de hidrógeno.

## 6. REFERENCES

- [1] M. E. El Telbany, A. Youssef and A. A. Zekry, "Intelligent Techniques for MPPT Control in Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review," 2014 4th International Conference on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology, 2014, pp. 17-22, doi: 10.1109/ICAET.2014.13.
- [2] R. B. Bollipo, S. Mikkili and P. K. Bonthagorla, "Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 7, no. 1, pp. 9-33, Jan. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.02720.
- [3] P. Jain, S. N. Joshi, N. Gupta and K. G. Sharma, "Analysis of MPPT Techniques in Grid Connected PV System," 2018 3rd International Conference and Workshops on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICRAIE.2018.8710412.
- [4] S. Zouirech, M. Zerouali, H. Elaissoui, A. E. Ougli and B. Tidhaf, "Application of Various Classical and Intelligent MPPT Tracking Techniques for the Production of Energy through a Photovoltaic System," 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRSEC48032.2019.9078154.
- [5] J. Ruiz, A. Beristáin, S. Ian & H. Hernandez. "Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar," 2010. Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.
- [6] J. Astócondor, "Controlador de seguimiento del punto de máxima potencia en sistema fotovoltaico autónomo con lógica Fuzzy," 2018.
- [7] E. Aguilar-Jaramillo, A. Aguinaga, "Modelamiento y Simulación de la Producción de Hidrógeno en un Electrolizador a Partir de Vapor Sobrecalentado de Agua", Revista Politécnica. (Quito) [online]. 2018, vol.41, n.2, pp.37-52. ISSN 2477-8990.
- [8] Objetivos de desarrollo sostenible. [Online]. Disponible: [www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/](http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/)
- [9] Objetivos de desarrollo sostenible, objetivo 7 y 13. [Online]. Disponible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [10] C. Fúnez, L. Reyes, "El hidrógeno como vector energético," 1st. Ed. 2019, pp. 37-42.
- [11] O. Soto, "Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada", Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería eléctrica, 2020.
- [12] J. Velásquez, J. Quiceno, "Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis", Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica, Pereira, 2013.
- [13] Ibrahim Dincer, "Green Methods for Hydrogen Production". International Journal of Hydrogen Energy, Elsevier, vol. 37, 2012
- [14] Sidk i U yar, T. y Besikci, D. (2017). "Integration of hydrogen energy systems into renewable energy systems for better design of 100% renewable energy communities". International Journal of Hydrogen Energy, 42 (4): 2453-2456. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.086.