



TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Modelado y simulación de un panel fotovoltaico empleando técnicas de inteligencia artificial

Modeling and simulation of a photovoltaic panel using artificial intelligence techniques

Adalberto - Ospino Castro
Carlos - Robles Algarín
Alejandro- Duran Pabón

Recibido: abril de 2014
Aprobado: julio de 2014

Resumen/ Abstract

El trabajo presenta la modelación del comportamiento energético y la determinación de los parámetros del circuito equivalente de un panel fotovoltaico con el empleo de técnicas de inteligencia artificial. Para tal efecto, se desarrolló en Matlab un algoritmo genético que permite obtener los parámetros físicos no brindados por los fabricantes para la implementación de funciones matemáticas que se homologuen al comportamiento dinámico de un panel solar. El algoritmo desarrollado en Matlab permite determinar, además, la eficiencia del algoritmo seguidor del punto de máxima potencia del inversor, el cual es un parámetro de no simple obtención o no determinado en condiciones de campo. Finalmente, el algoritmo se probó satisfactoriamente en un panel solar monocristalino de 50W obteniendo adecuados resultados en comparación con el modelo experimental para diferentes niveles de irradiación solar. Los resultados demuestran que el proceso desarrollado constituye una herramienta que puede ser aplicada a paneles fotovoltaicos en condiciones de campo.

Palabras clave: algoritmo genético, inteligencia artificial, panel solar, punto de máxima potencia, radiación solar.

The paper presents the modeling of the energy behavior and determination of equivalent circuit parameters for a photovoltaic panel using artificial intelligence techniques. For this purpose, it was performed a genetic algorithm in Matlab, which calculates the physical parameters not provided by manufacturers to implement mathematical functions that approve the dynamic behavior of a solar panel. In addition, the algorithm can determine the efficiency of the maximum power point tracking algorithm of the inverter, which is a parameter of not simple obtaining or not determined under field conditions. Finally, the algorithm was successfully tested in a monocrystalline solar 50W panel with excellent results, compared to the experimental model for different levels of solar irradiation. The results demonstrate that the developed process is a tool that can be applied to photovoltaic panels under field conditions.

Key words: genetic algorithm; artificial intelligence; solar panel, maximum power point, solar radiation.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha desarrollado un marcado interés por la aplicación de las fuentes renovables de energía; en particular, la fotovoltaica. Este proceso es acelerado por la reducción de los costos de fabricación de paneles solares, inversores y componentes del sistema, así como por la intensificación de sus aplicaciones ya sea en régimen aislado, conectados a las redes o formando parte de sistemas híbridos en diferentes procesos y localizaciones geográficas[1].

Actualmente, los procesos de modelado y simulación se han convertido en pilares fundamentales en las técnicas de diseño en las diversas áreas de estudio, incluyendo los sistemas eléctricos y la electrónica industrial. Por tal motivo, cuando se desea emprender un proyecto de instalación para la generación de energía solar, es recomendable contar con plataformas de simulación y modelos que describan y permitan cuantificar la cantidad de energía disponible de un panel fotovoltaico para diferentes condiciones de operación [2].

Debido a la importancia de cuantificar la energía solar disponible que puede generar un panel fotovoltaico, diversos estudios se han realizado en este sentido. La mayoría de ellos se basan en principios físicos con parámetros determinados experimentalmente utilizando la ecuación clásica del circuito equivalente de la unión p-n mostrado en la figura 1, [3]. Sin embargo, actualmente se están utilizando técnicas de inteligencia artificial, las cuales son capaces de encontrar correlaciones entre datos diversos y que han mostrado ser útiles en la determinación de parámetros de paneles solares y simulación de sistemas de generación de energía eléctrica a través de fuentes renovables de energía [4-5].

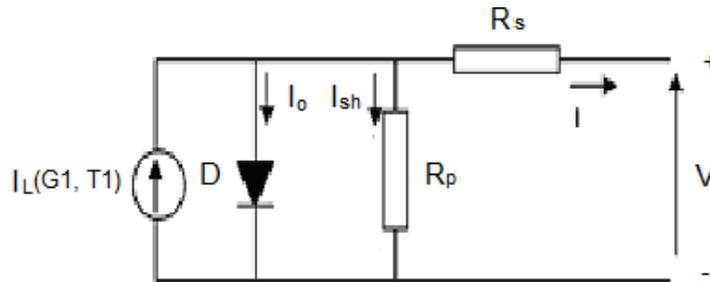


Fig.1. Circuito equivalente de la unión p-n.

Una de las características de las técnicas de inteligencia artificial es que son del tipo caja negra y por lo tanto, no permiten obtener una función explícita de las variables físicas involucradas [6]. El objetivo principal de este trabajo, considerado metodológicamente como un diseño de investigación experimental [7], consiste en obtener los parámetros necesarios para funciones explícitas que permiten un modelamiento alternativo de los fenómenos bajo estudio y poder estimar comportamientos energéticos. Específicamente se presenta la descripción de los parámetros físicos que constituyen la ecuación característica de un panel solar, el modelamiento matemático del sistema y la implementación de un algoritmo genético que permite obtener el vector **P** a partir de la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto del panel solar en estudio.

ECUACIÓN CARACTERÍSTICAS DE UN PANEL SOLAR

La figura 1, muestra el circuito eléctrico equivalente de un panel solar, se observa que está constituido por dos resistencias, una en serie R_s y otra resistencia en paralelo o shunt R_p . La resistencia serie es debida a la resistencia de carga del material semiconductor, a los contactos metálicos y a las interconexiones y resistencias de contacto entre el semiconductor y los contactos metálicos [8]. La resistencia shunt se debe a las no idealidades y a las impurezas cerca de la unión p-n. También se detalla una fuente de corriente I_L , que representa la corriente generada por la radiación solar, y un diodo conectado en paralelo que representa la curva característica Corriente-Voltaje I-V. El comportamiento de la curva I-V de la célula fotovoltaica está descrita por las ecuaciones (1), (2) y (3), [9].

$$I = I_L(G_1, T_1) - N_p I_0 \left[e^{\left(\frac{V + IR_s}{V_t} - 1\right)} \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

$$V_t = m N_s k \frac{(T_1 + 273)}{qe} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right)} - 1} \quad (3)$$

Dónde:

N_s es el número de celdas en serie del panel solar.

N_p es el número de celdas en paralelo.

k es la constante de Boltzman.

q es la carga del electrón.

m es el factor de idealidad del diodo; $1 < m < 2$.

T_1 es la temperatura de trabajo del panel solar en °C.

R_S es la resistencia serie.

R_P es la resistencia en paralelo.

$I_L(G_1, T_1)$ es la corriente fotogenerada y aproximadamente igual a la corriente de cortocircuito $I_{sc}(G_1, T_1)$.

I_0 es la corriente inversa de saturación del diodo.

V_{oc} es la tensión de circuito abierto [10].

MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Para utilizar la ecuación (1), es necesario conocer el valor de las resistencias R_S y R_P , parámetros característicos de cada panel y el factor de idealidad del diodo (m). Estos parámetros están relacionados con el material empleado en su fabricación y en general se determinan de forma experimental ya que el fabricante no provee esta información. Una vez calculados se consideran constantes en todo el rango de operación y para cualquier valor de irradiación y temperatura.

Para aumentar la precisión en los cálculos, en la ecuación (1), se introduce la dependencia de la corriente de cortocircuito y de la tensión de circuito abierto, del valor de la irradiación solar y de la temperatura de operación del panel con relación a las condiciones estándar dadas por el fabricante; $T_{ST} = 25$ °C, $G_{ST} = 1000$ W/m². Estas dependencias son: [3], ecuaciones (4) y (5).

$$I_{SC}(G_1, T_1) = N_P I_{SC} \frac{G_1}{G_{STD}} + \alpha I_{SC} (T_1 - T_{STD}) \quad (4)$$

$$V_{OC}(G_1, T_1) = V_{OC} + V_t \ln \left[\frac{G_1}{G_{STD}} \right] + \beta (T_1 - T_{STD}) \quad (5)$$

En general, conocidas la radiación y la temperatura, para caracterizar totalmente el comportamiento energético de un panel, es necesario identificar todos los elementos que componen el vector $\mathbf{P} = [R_S \ R_P \ m \ \beta \ \alpha]$.

La figura 2, muestra las curvas características de una celda fotovoltaica, se observa, en la curva de potencia, la existencia de un máximo denominado punto de máxima potencia (MPP) al cual le corresponden valores de corriente en el punto de máxima potencia I_{MPP} y de voltaje en el punto de máxima potencia V_{MPP} . Dicho punto es único para cada celda solar y varía conforme cambia la irradiancia solar como se muestra en la figura 3, [11]. Ésta variación plantea la necesidad de realizar un algoritmo capaz de modificar V_{PV} para que la energía aprovechada sea la máxima.

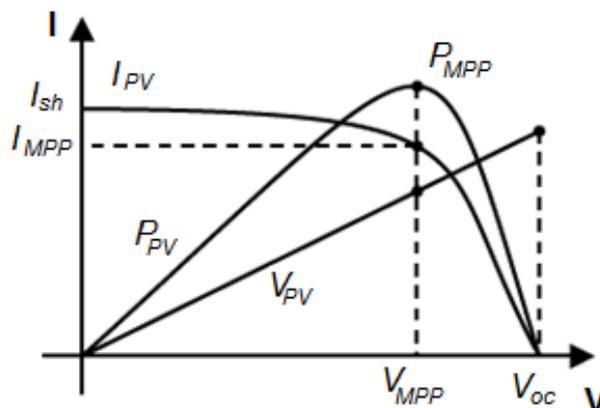


Fig. 2. Curva I-V de una celda fotovoltaica.

Fuente: Ruiz C. Luis J. (2010).

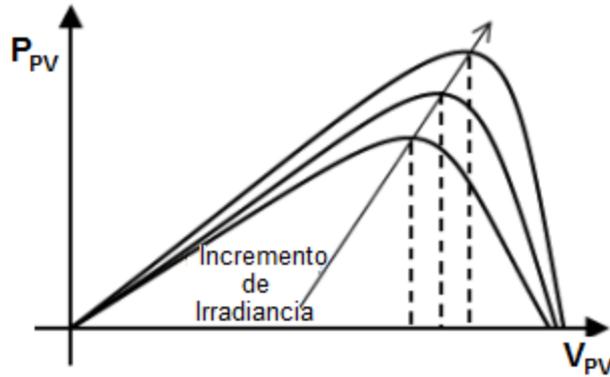


Fig. 3. Curva P-V normalizada de una celda fotovoltaica.
Fuente: Ruiz C. Luis J. (2010).

IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO

En el presente trabajo se emplean los algoritmos genéticos para determinar el vector **P** a partir de conocer los valores de la corriente de cortocircuito: $[0, I_{sc}(G_1, T_1)]$, la tensión de circuito abierto; $[V_{oc}(G_1, T_1), 0]$ y el punto de operación real; (V_x, I_x) , dada las condiciones de radiación y temperatura en que se realiza la medición.

Con el procedimiento es posible, además de conocer el valor y las coordenadas de tensión y corriente del punto de máxima potencia del sistema en condiciones reales, determinar la eficiencia en el seguimiento del punto de máxima potencia del inversor.

Una de las técnicas que permite encontrar los elementos integrantes del vector **P** en condiciones de campo son los algoritmos genéticos. Como se sabe, los algoritmos genéticos se basan en reproducir un proceso evolutivo similar al propuesto para la evolución de las especies, donde una población inicial de individuos, compuesta por un número determinado de soluciones matemáticas de la ecuación (1), y con mayor o menor éxito en aproximarse al valor deseado, evoluciona generación tras generación utilizando mecanismos de selección, cruzamiento y mutación hacia nuevas poblaciones más exitosas en la solución y por tanto más adaptadas al problema que se desea resolver. El procedimiento se repite sucesivamente hasta que finalmente converge en un individuo que cumple con la ecuación y las restricciones impuestas siendo éste el más exitoso, y para el caso, la solución esperada [6].

En la figura 4, se presenta el diagrama de flujo utilizado para la generación del algoritmo genético. Los criterios de parada utilizados en el algoritmo hasta que la nueva población no sea completada son:

- Seleccionar uno o varios individuos en la población aplicando un proceso de selección.
- Ejecutar los operadores genéticos en el o los individuos seleccionados de la población.
- Insertar a los nuevos individuos en la nueva población.

El método de selección usado es por ruleta y para implementar el operador de cruzamiento se siguen los siguientes pasos:

- Seleccionar dos individuos como padres.
- Seleccionar aleatoriamente un sub-árbol o segmento de instrucciones.
- Intercambiar los sub-árboles o segmentos de código entre los dos padres.
- Evitar sustituciones de nodo terminal en el nodo raíz.

A partir de mediciones experimentales, es posible conocer el valor de la tensión, la corriente y por tanto la potencia desarrollada por un panel fotovoltaico, valores de la población inicial. Este punto es el representado en la figura 5. Sin embargo, por un punto del espacio pueden pasar infinitas curvas que satisfacen la ecuación $I = f(V)$.

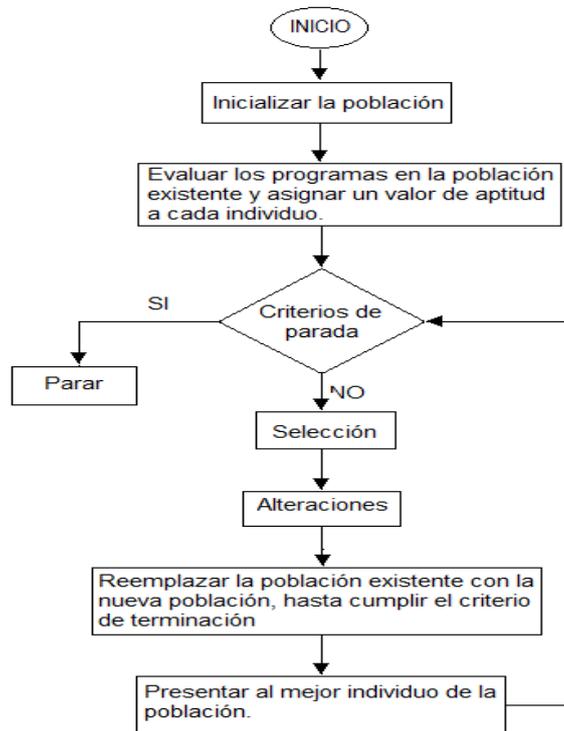


Fig. 4. Diagrama de flujo del algoritmo genético.

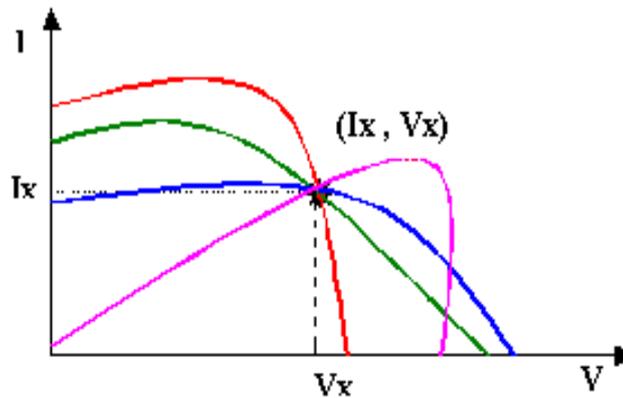


Fig. 5. Diferentes soluciones para un punto de operación.

Para precisar más la característica que se desea reproducir, es necesario que la curva pase por los puntos experimentales $[0, I_{sc}(G_1 T_1)]$ y $[V_{oc}(G_1 T_1), 0]$, determinados en condiciones de operación. Esta condición se muestra en la figura 6.

La tarea del algoritmo genético es entonces minimizar el error entre los valores experimentales y los valores calculados a partir de determinar la corriente, la tensión y la potencia modificando la población de vectores que contienen los parámetros $\mathbf{P} = [R_s \ R_p \ m \ \beta \ \alpha]$ que satisfacen los puntos experimentales correspondientes.

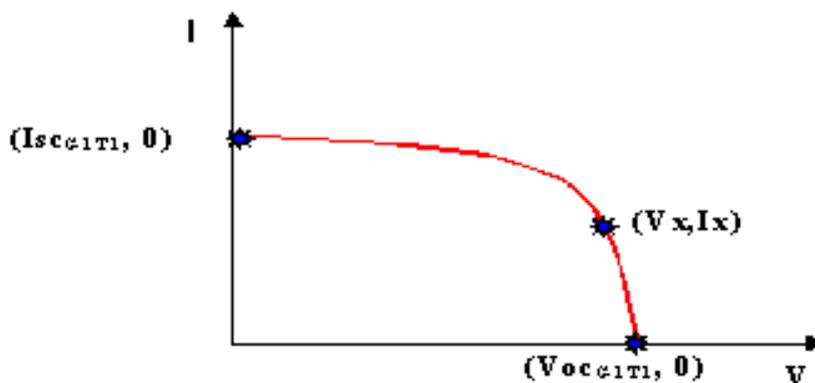


Fig. 6. Puntos disponibles en condiciones de campo.

RESULTADOS

En la tabla 1, que se expone a continuación, se reproducen un grupo de resultados obtenidos por el método desarrollado.

Tabla 1. Resultados obtenidos con el algoritmo genético.			
Parámetro	Fabricante	Experimental	Algoritmo Genético
P_{max} (W)	50	-	41.02
P_{Campo} (W)	-	28.00	28.00
G (W/m^2)	1000	520	520
T ($^{\circ}C$)	25	25	-
V_{oc} (V)	25	21.0	21.0
I_{sc} (A)	2.27	2.5	2.5
N_{spmp}	-	-	0.68
R_s (Ω)	-	-	0.003
R_p (Ω)	-	-	688.11
m	-	-	1.172
α	-	-	-0.008
β	-	-	0.207

Como puede observarse, las características obtenidas reflejan el comportamiento real del panel bajo las condiciones de la experimentación realizada. Adicionalmente se obtiene la información de todos los elementos que integran el vector P, parámetros importantes que no son dados por el fabricante, ni por otras técnicas empleadas.

Para evaluar si los parámetros obtenidos del resultado del algoritmo genético cumplen con el comportamiento real del panel solar en estudio, se implementa en Matlab/Simulink el modelo matemático como se muestra en la figura 7. En la figura 8, se ilustra el subsistema que representa el circuito equivalente del panel solar.

En las figuras siguientes, se representan un grupo de resultados obtenidos en base a los parámetros entregados por el algoritmo genético. Específicamente en la figura 9, se muestra el resultado de la corriente versus tensión (I-V) y el valor correspondiente a la potencia desarrollada (P-V), obtenido en la modelación del panel fotovoltaico en las condiciones de operación. Como se puede observar el bloque fotovoltaico simulado en Matlab/Simulink homologa el comportamiento real del panel fotovoltaico en estudio. Los resultados mostrados en el tabla 1, así lo comprueban.

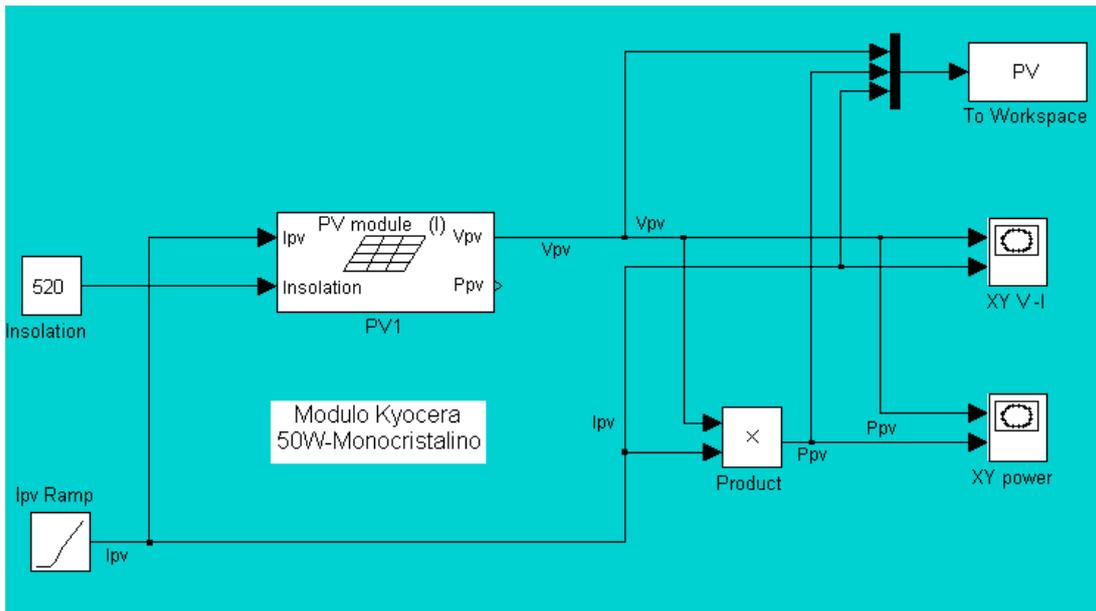


Fig. 7. Sistema del panel fotovoltaico en Matlab/Simulink.

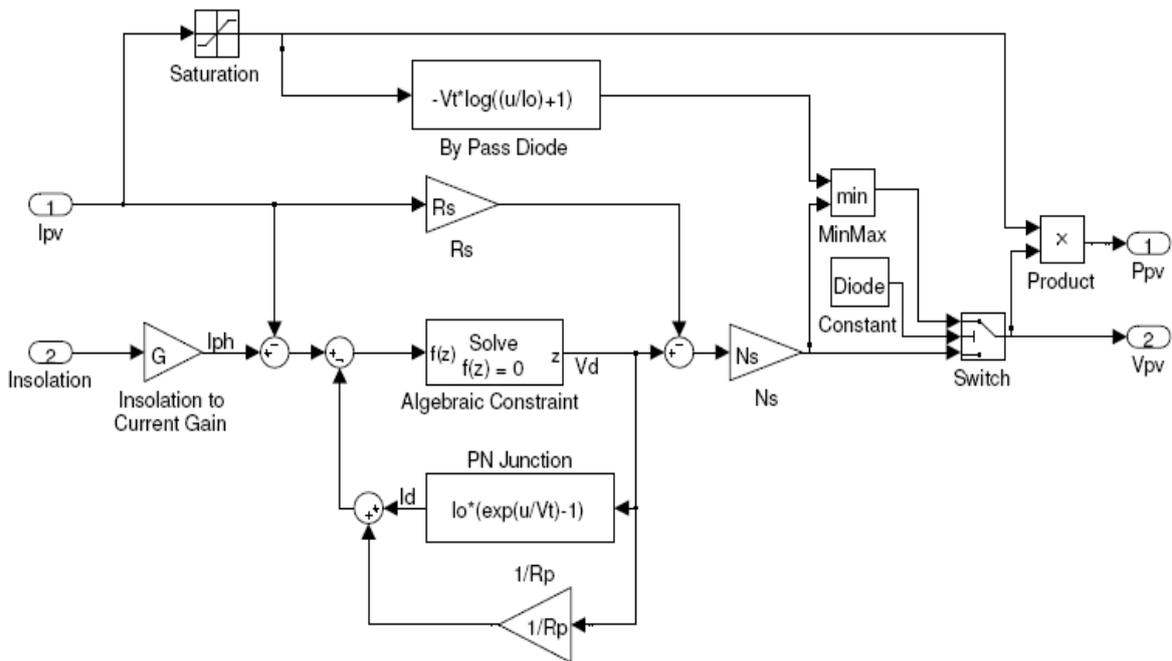


Fig. 8. Subsistema del circuito equivalente del panel fotovoltaico.

En la figura 10, se superponen las curvas I-V para resaltar visualmente la precisión alcanzada por el algoritmo genético y la magnitud del error en cada una de las zonas; en ellas los valores determinados por el algoritmo genético se muestran en color rojo mientras que en verde se destaca el valor experimental.

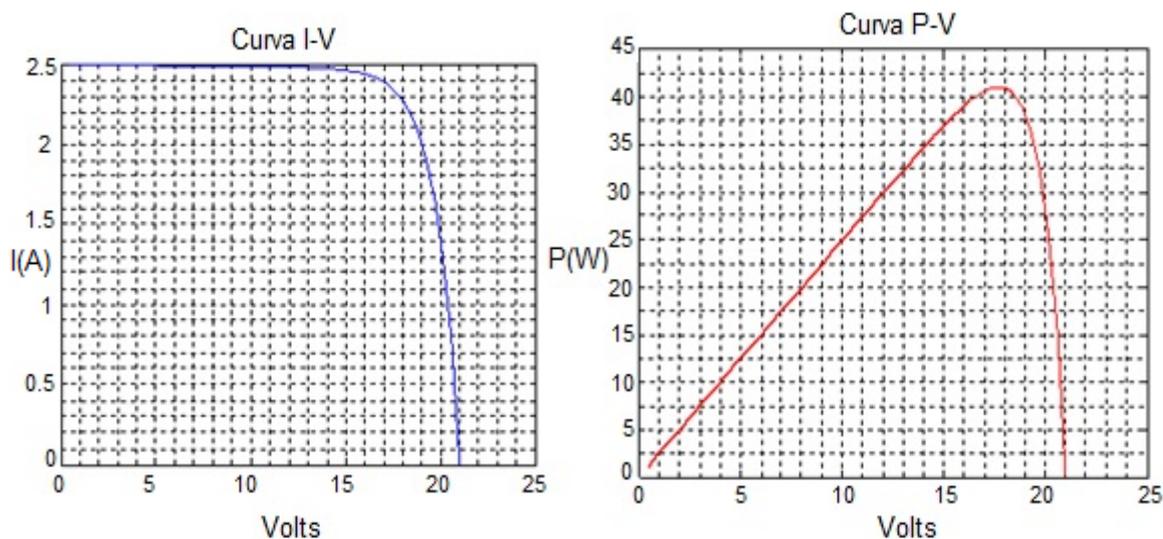


Fig. 9. Característica (I-V) y (P-V) del panel fotovoltaico.

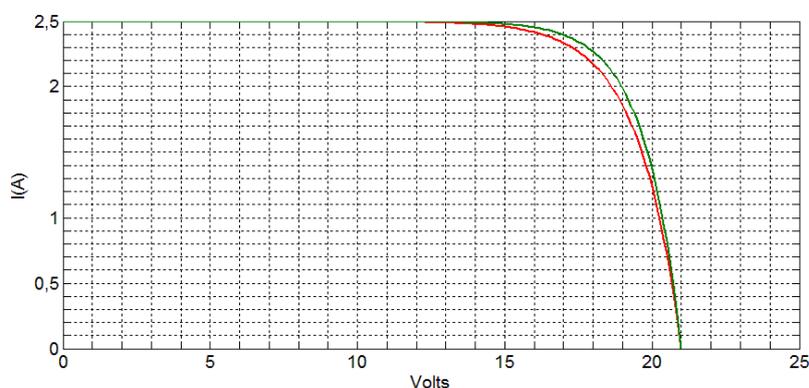


Fig. 10. Característica del panel fotovoltaico.

CONCLUSIONES

- Se realizó un algoritmo genético que permite obtener los parámetros físicos no entregados por ningún fabricante de paneles fotovoltaicos, que hacen parte del circuito eléctrico equivalente, y que permite tener los valores de la ecuación matemática que se homologue al comportamiento en campo o real del panel fotovoltaico en estudio; en base a los resultados entregados del algoritmo, las pruebas realizadas permitieron evaluar el desempeño del panel fotovoltaico para cambios en los niveles de irradiación solar.
- El método presentado permite evaluar las prestaciones energéticas de los sistemas fotovoltaicos con un número reducido de ensayos experimentales.
- Las herramientas de inteligencia artificial pueden ser aplicadas en el análisis energético de los sistemas fotovoltaicos en condiciones de campo obteniendo excelentes resultados.

REFERENCIAS

- [1]. KOUTA, J.; *et al.* "Improving the incremental conductance control method of a solar energy conversion system". In: *International Conference on Renewable Energy and Power Quality*. VI. Santander: [s.n.], 2008, p.1-4, ISBN: 978-84-611-9289-2.
- [2]. OSPINO, A. "Aplicaciones de Electrónica Análoga en sistemas de Energía Solar". 1ra ed., Barranquilla, Educosta, 2010, 146 p., ISBN: 978-958-8710-19-8.

- [3]. TIWARI, G.; DUBEY, S. "*Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*", 2da. ed., United Kingdom, RSC Publishing, 2010, 402 p., ISBN: 978-1-84973-020-4.
- [4]. JIANG, J.; *et al.* "Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Power Systems", *Tamkang Journal Science and Engineering*, 2005, vol.8, n. 2, p.147–153, ISSN 1560-6686.
- [5]. KARATEPE, E.; BOZTEPE, M.; ÇOLAK, M. "Estimation of equivalent circuit parameters of PV module using neural network". In: *Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks International XII*. Çanakkale: [s.n.], 2003.
- [6]. DE ARMAS, M. "*Fundamentos Básicos de Inteligencia Artificial con MATLAB*". 1ra. ed., Barranquilla, Educosta, 2009, 192 p. ISBN: 978-958-8511-30-6.
- [7]. ARIAS, F. "*El proyecto de investigación: Guía para su elaboración*". 3ra. ed., Caracas, Episteme, 1999, 95 p. ISBN: 980-07-3868-1.
- [8]. TAMIZHMANI, G.; *et al.* "Photovoltaic module thermal /wind performance". In: *NCPV and Solar Program Review Meet.* 2003, p.936-939, NREL/CD-520-33586, Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/35645.pdf>.
- [9]. GARCÍA, M. "Modelado de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos". En: *Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid: CIEMAT, 2006, p.13, ISBN: 9788478345144.
- [10]. WENHAM, S.; *et al.* "*Applied Photovoltaics*", 2nd. ed., London, Earthscan, 2007, 134 p. ISBN: 978-184407-401-3.
- [11]. Mc EVOY, A.; MARKVART, T.; CASTAÑER, L. "*Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*". 2nd. ed., Waltham: Elsevier, 2012, 1243 p., ISBN: 978-0-12-385934-1.

AUTORES

Adalberto Ospino Castro

Ingeniero Electrónico, Máster en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos, Profesor Asistente, Facultad de Ingenierías, Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia.

e-mail: aospino8@cuc.edu.co

Carlos Robles Algarín

Ingeniero Electrónico, Máster en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos, Profesor Instructor, Facultad de Ingenierías, Universidad Cooperativa de Colombia, Profesor Asociado, Facultad de Ingenierías, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.

e-mail: carlos.robles@ucc.edu.co, croblesa@unimagdalena.edu.co

Alejandro Duran Pabón

Ingeniero Electrónico, Máster en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos, Profesor Asociado, Facultad de Ingenierías, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.

e-mail: aduran@unimagdalena.edu.co