

MÉTODO DE CÁLCULO SIMPLIFICADO DE LOS CINCO PARÁMETROS DESCONOCIDOS PARA EL MODELO DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE UN SOLO DIODO

Por Ing. **Rafael VillalónGarcía*** e Ing. **Sergio G. Fuentes Cardona****

* Empresa Eléctrica Santiago de Cuba

E-mail: rafaelv@elecstg.une.cu

** Laboratorios Farmacéuticos

E-mail: sergio@lfo.biocubafarma.cu

Resumen

Las energías renovables han recibido un importante impulso y respaldo tras el Acuerdo de París de 2015. Este Acuerdo entró en vigor en 2020 y, por primera vez, estableció un objetivo global vinculante para todos los países firmantes.

Entre las fuentes de energía renovables se encuentra la solar, aprovechada a través de paneles fotovoltaicos. Distintos desarrollos e investigaciones han permitido la creación de vehículos y embarcaciones marítimas impulsadas a través de energía solar, y también encontramos los calentadores solares de agua.

Este artículo presenta la forma de calcular los cinco parámetros desconocidos para el modelo de paneles fotovoltaicos de un solo diodo α (las resistencias R_s y R_p , la corriente fotogenerada I_{ph} , el factor de idealidad del diodo, y la corriente de saturación I_o), mediante el Método de Cálculo simplificado. Se caracteriza el Modelo de una celda solar de un diodo, se realiza el cálculo de estos parámetros y se lleva a cabo una comparación con otros métodos numéricos para validar sus resultados.

Palabras clave: Energía fotovoltaica, diodos, celda solar.

SIMPLIFIED CALCULATION METHOD OF THE FIVE UNKNOWN PARAMETERS FOR THE SINGLE-DIODE PHOTOVOLTAIC PANEL MODEL

Abstract

Renewable energies have received a significant boost and support after the 2015 Paris Agreement. This Agreement entered into force in 2020 and, for the first time, established a binding global target for all signatory countries.

Among the renewable energy sources the solar energy, harnessed through photovoltaic panels. Various developments and research have allowed the creation of marine vehicles and vessels powered by solar energy, and we also find solar water heaters

This article presents the way to calculate the five unknown parameters for the single-diode photovoltaic panel model (the R_s and R_p resistors, the photogenerated current I_{ph} , the ideality factor of the diode, and the saturation current I_o), by the Simplified Calculation Method. The model of a solar cell of a diode is characterized, the calculation of these parameters is performed and a comparison is made with other numerical methods to validate its results.

Keywords: Photovoltaic energy, diodes, solar cell.

I. Introducción

El objetivo del artículo es presentar una metodología que permita calcular los parámetros del circuito equivalente de simple diodo con cinco parámetros (las resistencias R_s y R_p , la corriente fotogenerada I_{ph} , el factor de idealidad del diodo α , y la corriente de saturación I_0), a partir de los datos aportados por el fabricante. El cálculo de estos parámetros es indispensable para realizar la simulación de una celda fotovoltaica.

Los datos suministrados por los fabricantes en las hojas características de los paneles fotovoltaicos son la corriente de corto-circuito (I_{sc}), la tensión de circuito abierto (V_{oc}), la potencia en el punto de máxima potencia (P_{mp}), la tensión de máxima potencia (V_{mp}), la corriente de máxima potencia (I_{mp}), así como el número de celdas conectadas en serie (N_s) y en paralelo (N_p). Otros datos que brindan los fabricantes son el coeficiente de variación de la tensión con la temperatura (K_v) y el coeficiente de variación de la corriente con la temperatura (K_i). Todos estos datos están referidos a las condiciones de pruebas (STC), o sea, que estos datos están determinados durante pruebas realizadas bajo una radiación solar de 1000 W/m^2 y a una temperatura de 25°C .

Para la simulación del comportamiento de una celda fotovoltaica, ya sea empleando el modelo de un solo diodo como el de dos diodos, los datos brindados por los fabricantes no son suficientes, por lo que se hace necesario determinar los valores de los parámetros del circuito equivalente de la celda solar con los datos brindados por los fabricantes, a partir de métodos analíticos [Callegaro *et al.*, 2015; Cubas *et al.*, 2014; Cubas *et al.*, s/a; Efstratios, 2019; Efstratios, 2015; Haider *et al.*, 2017] o métodos numéricos [Callegaro *et al.*, 2015; Bogning *et al.*, 2012; Echeverría *et al.*, 2014; Madi *et al.*, 2017; Hussein, 2017; Ma *et al.*, 2013; Abbassi *et al.*, 2018].

II. Desarrollo

La energía fotovoltaica

La energía fotovoltaica es obtenida directamente a partir de la radiación solar, y se transforma en electricidad mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica. Tiene diversos usos y van desde la producción de electricidad a gran escala a través de redes de distribución, pasando por alimentar innumerables aplicaciones y aparatos autónomos, hasta abastecer de energía a viviendas aisladas de la red eléctrica.

Durante el diseño de una Central Fotovoltaica los diseñadores seleccionan diferentes opciones de módulos fotovoltaicos para obtener el mejor, antes de dimensionar el generador fotovoltaico, y por otra parte estiman la dimensión del sistema requerido para suministrar la energía necesaria. Por tanto, la predicción de la respuesta eléctrica del generador fotovoltaico en cualquier condición de operación es vital para predecir el comportamiento del sistema fotovoltaico desde su etapa de diseño y para lograr los mejores índices energéticos en explotación [Arias *et al.*, 2018].

Modelo de una celda solar de un diodo

El modelo matemático simplificado de una celda solar con un solo diodo es representado por el circuito equivalente que se muestra en la figura 1.

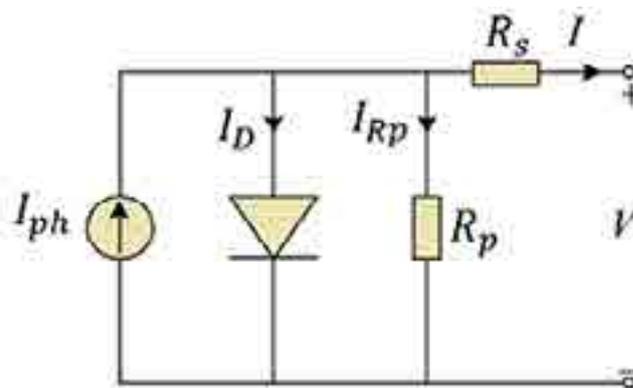


Fig. 1. Modelo de una celda solar de un diodo.

Las ecuaciones que describen este modelo son las siguientes:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_{ph} = \frac{S}{S_{ref}} * [I_{sc} + u_{ref}(T_c - T_{ref})] \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{V + R_s * I}{R_p} \quad (3)$$

$$I_d = I_0 * \left(e^{\left(\frac{V + R_s * I}{a * V_T} \right)} - 1 \right) \quad (4)$$

$$V_T = \frac{k * T}{q} \quad (5)$$

$$I_0 = I_{oref} * \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 * e^{\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) * \frac{q * E_g}{a * k}} \quad (6)$$

$$I_{oref} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q * V_{oc}}{a * T * k} \right)} - 1} \quad (7)$$

$$I_d = I_0 * \left(e^{\left(\frac{V + R_s * I}{a * V_T} \right)} - 1 \right) \quad (8)$$

Método para la determinación de los cinco parámetros desconocidos del circuito equivalente

El método numérico propuesto para la determinación de los cinco parámetros desconocidos del circuito equivalente de una celda o panel solar, se basa en dos algoritmos iterativos, el primero de ellos permite obtener el valor de I_{sc} y a partir del segundo algoritmo se obtienen los restantes parámetros del modelo.

Los cinco parámetros son evaluados a partir del comportamiento de la corriente y la tensión en tres puntos operacionales: el punto de cortocircuito, el circuito abierto y el punto de máxima potencia [Bogning *et al.*, 2012].

En el punto de cortocircuito: $V=0, I=I_{sc}$ (9)

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 * \left(e^{\left(\frac{R_s * I_{sc}}{a * V_T} \right)} - 1 \right) - \frac{R_s * I_{sc}}{R_p}$$

En el punto de circuito abierto: $V=V_{oc}, I=0$, (10)

$$0 = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{oc}}{a \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_p}$$

En el punto de Máxima Potencia: $V=V_{mp}, I=I_{mp}$,

$$I_{mp} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{mp} + R_s \cdot I_{mp}}{a \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{mp} + R_s \cdot I_{mp}}{R_p} \quad (11)$$

Para estimar el valor de la resistencia R_s se parte de la expresión 10, despreciando el efecto de la resistencia en paralelo R_p , por lo que se obtiene:

$$I_{ph} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{oc}}{a \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (12)$$

Sustituyendo 12 en 9 se obtiene:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left[e^{\frac{V_{oc}}{a \cdot V_T}} - e^{\frac{V_{mp}}{a \cdot V_T}} \right]} \quad (13)$$

La expresión para el cálculo de la resistencia para la resistencia R_s es obtenida imponiendo que en el punto de máxima potencia P_{mp} la derivada de la potencia con respecto a la tensión es cero. La ecuación para el cálculo de la potencia se obtiene multiplicando (11) por V_{mp} . La derivada de la potencia con respecto a la tensión se obtiene como [Cubas *et al.*, 2014; Stornelli *et al.*, 2019]:

$$\frac{dP}{dV} = \left\{ I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V + R_s \cdot I}{a \cdot V_T}} - 1 \right) \right\} + V \cdot \left[-\frac{I_0}{a \cdot V_T} \cdot e^{\frac{V + R_s \cdot I}{a \cdot V_T}} \right] = 0 \quad (14)$$

La expresión para el cálculo de R_s se obtiene sustituyendo los valores de I_0 e I_{ph} en la ecuación 14 y despejando:

$$R_s = \frac{V_{oc}}{I_{mp}} + \frac{V_T}{I_{mp}} \ln \left(\frac{V_T}{V_T + V_{mp}} \right) - \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (15)$$

A partir de la ecuación (8), despreciando el efecto de la resistencia R_p , sustituyendo $V = V_{mp}$ y despejando, se obtiene la ecuación de la tensión en el punto de máxima potencia como:

$$V_{mp} = V_T \cdot \ln \left(\frac{I_{ph} + I_0 - I_{mp}}{I_0} \right) - (R_s \cdot I_{mp}) \quad (16)$$

Debido a que el cálculo de a y R_s se realiza despreciando el efecto de la resistencia en paralelo R_p , es necesario encontrar el valor de esta resistencia de forma que los valores de las corrientes I_{mp} e I_{sc} calculados con estos tres parámetros sean iguales a los datos brindados por el fabricante.

El procedimiento para determinar el valor de R_p inicia calculando un valor inicial de resistencia a partir de la ecuación de potencia máxima que se presenta en la expresión siguiente:

$$R_p = \frac{V_{oc} \cdot (I_{sc} - I_{mp})}{I_{sc} \cdot (I_{sc} - I_{mp}) - (I_{sc} - I_{mp})^2} \quad (17)$$

Despejando en la ecuación anterior se obtiene la expresión para determinar R_p como:

$$R_p = \frac{V_{oc} \cdot (I_{sc} - I_{mp})}{I_{sc} \cdot (I_{sc} - I_{mp}) - (I_{sc} - I_{mp})^2} \quad (18)$$

De las condiciones de operación en los puntos de circuito abierto y corto circuito, se obtienen las expresiones para el cálculo de las corrientes I_0 e I_{ph} , teniendo en cuenta el efecto de la resistencia shunt R_p como:

$$I_{ph} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{oc}}{a \cdot V_T}} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (19)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{a \cdot V_T} \right) - \frac{V_{oc}}{R_p}}{\left[e^{\frac{V_{oc}}{a \cdot V_T}} - 1 \right] - e^{\frac{V_{mp}}{a \cdot V_T}}} \quad (20)$$

El algoritmo para la determinación de los cinco parámetros del modelo se muestra en la Fig. 2. El algoritmo inicia con la estimación del factor de idealidad del diodo, para calcular los valores iniciales de R_s , I_{ph} , I_0 y $V_{mp-calc}$. Con el valor de la tensión de máxima potencia calculada, se calcula el error; si el valor de $V_{mp-calc}$ es menor que el de V_{mp} dado por el fabricante en la hoja característica del panel, se disminuye el valor de a , pero si es mayor entonces se aumenta el valor de a . El proceso iterativo continúa hasta que el error calculado sea menor o igual a 0,1. Una vez calculado el valor de R_s , se calculan los valores iniciales de R_p , I_{ph} , I_0 e $I_{mp-calc}$, para dar inicio al segundo proceso iterativo.

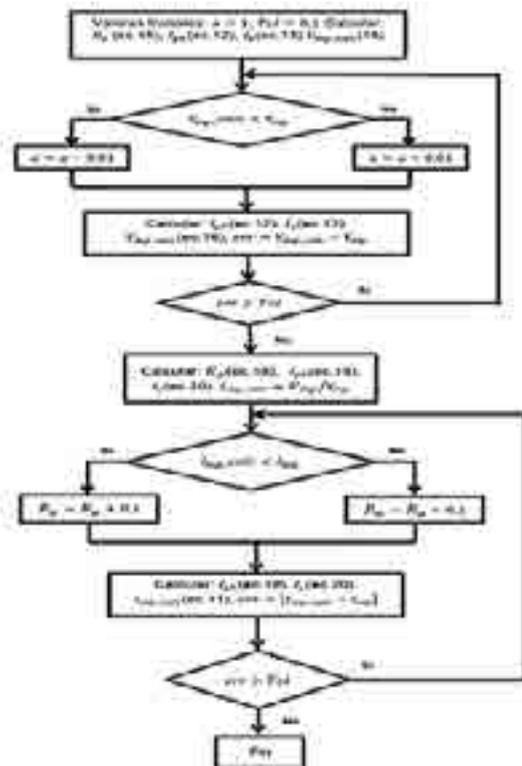


Fig. 2. Diagrama de flujo para la determinación de los parámetros desconocidos del circuito equivalente de una celda o panel fotovoltaico.

En el segundo proceso iterativo se compara el valor de la corriente de máxima potencia calculada $I_{mp-calc}$, con la corriente dada por el fabricante en la hoja característica del panel solar; si la corriente calculada es menor que la máxima potencia del panel solar entonces se incrementa el valor de R_p , en caso contrario se disminuye el valor de R_p . Luego de calcular el valor de la resistencia en paralelo, se calculan I_{ph} , I_o e I_{mp} . El proceso iterativo continua hasta que la diferencia entre las corrientes $I_{mp-calc}$ e I_{mp} sea menor que el valor de tolerancia establecido.

Validación del método implementado

Para la validación del método expuesto, se comparan los valores de los cinco parámetros del modelo, calculados de tres paneles solares empleando el algoritmo propuesto con los valores obtenidos por otros autores en trabajos previos empleando métodos analíticos y numéricos.

Tabla 1. Características eléctricas de los paneles empleados para la validación de los resultados obtenidos

	KC200GT	BP SX-150	MSX-60
I_{sc}	8,21	4,75	3,87
V_{oc}	32,9	43,5	21,0
I_{mp}	7,61	4,35	3,56
W_{mp}	26,3	34,5	16,8
P_m	200,0	150,0	60
N_s	60	72	36
K_j	0,0032	0,065	0,0065
K_v	-0,123	-0,16	-0,08

Tabla 2. Parámetros calculados del Panel Solar KC200GT empleando el método propuesto y otros métodos desarrollados en trabajos previos

Método	KC200GT				
	a	$R_s (\Omega)$	$R_p (\Omega)$	$I_{ph} (A)$	$I_o (A)$
Propuesto	1,28	0,1765	903,57	8,212	$4,61 \times 10^{-7}$
Chan & Phang [Callegaro et al., 2015]	1,13	0,26	135	8,22	$4,61 \times 10^{-9}$
Femia (Newton-Raphson) [Callegaro et al., 2015]	1,08	0,21	214	8,21	$4,61 \times 10^{-9}$
Can & Ickilli [Callegaro et al., 2015]	1,34	0,22	952	8,21	$4,61 \times 10^{-9}$
N. Echeverría (Algoritmos Genéticos) [Echeverría et al., 2014]	1,29	0,2016	213,13	-	$8,5 \times 10^{-9}$

Cubas (Analítico) [Cubas et al., 2014]	1,3	0,231	594,851	8,213	$9,699 \times 10^{-8}$
Jieming Ma (Algoritmo Cuckoo Search) [Ma et al., 2013]	1,009	0,2665	140,48	8,1729	$4,23 \times 10^{-10}$

Tabla 3. Parámetros calculados del Panel Solar BP SX-150 empleando el método propuesto y otros métodos desarrollados en trabajos previos

Método	BP SX-150				
	a	$R_s (\Omega)$	$R_p (\Omega)$	$I_{ph} (A)$	$I_o (A)$
Propuesto	1,66	0,3001	1089,51	4,751	$3,361 \times 10^{-6}$
Ahmed Hussein (Newton-Raphson) [Hussein, 2017]	1,64	0,3125	1799,37	4,75	$2,801 \times 10^{-6}$
Trabajos previos [Hussein, 2017]	1,64	0,343	-	4,75	$2,83 \times 10^{-6}$

Tabla 4. Parámetros calculados del Panel Solar MSX-60 empleando el método propuesto y otros métodos desarrollados en trabajos previos

Método	MSX-60				
	a	$R_s (\Omega)$	$R_p (\Omega)$	$I_{ph} (A)$	$I_o (A)$
Propuesto	1,46	0,1936	697,31	3,871	$6,86 \times 10^{-7}$
Ahmed Hussein (Newton-Raphson) [Hussein, 2017]	1,387	0,2234	406,34	3,872	$2,97 \times 10^{-6}$
Trabajos previos [Hussein, 2017]	1,27	0,2165	274,93	3,812	$6,45 \times 10^{-7}$
Dominique Bonkoungou [Hussein, 2017]	1,36	0,180	360,002	3,811	$1,859 \times 10^{-7}$

III. Conclusiones

La importancia de este artículo radica en la propuesta de un algoritmo mediante el cual es posible determinar los valores de los parámetros desconocidos del módulo solar fotovoltaico en condiciones estándar (STC), a partir de los datos aportados por el fabricante mediante el análisis del circuito equivalente de un diodo de un panel solar.

Este artículo tiene como principal aporte que para la aplicación del método numérico propuesto no se hacen consideraciones adicionales para realizar el cálculo de cada uno de los parámetros, sino que se trabaja con las mismas expresiones que describen el comportamiento de un módulo fotovoltaico, además de que no se requiere de una elevada carga computacional para obtener los resultados.

IV. Referencias bibliográficas

ABBASSI, RABEH; ATTIA BOUDJEMLINE, ABDELKADER ABBASSI, AHMED TORCHANI, HATEM GASMI AND TAWFIK GUESMI (2018). «A Numerical-Analytical Hybrid Approach for the Identification of SDM Solar Cell

- Unknown Parameters». *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2018, Vol. 8, No. 3.
- ARIAS GARCÍA, RODOLFO MANUEL E IGNACIO PÉREZ ABRIL (2018). «Nueva metodología para determinar los parámetros de un módulo fotovoltaico». *Revista de Ingeniería Energética*, 2018, Enero/Abril, vol. 39, n. 1, p. 38-47.
- ASITIMBAY REGALADO, MAYRA (2018). «Método de Detección de Puntos Calientes en Paneles Solares». Ecuador.
- BOGNING DONGUE, SAKAROS; DONATIEN NJOMO, JEAN GASTON TAMBA AND LESSLY EBENGAI (2012). «Modeling of Electrical Response of Illuminated Crystalline Photovoltaic Modules Using Four- And Five-Parameter Models». *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, November 2012.
- CALLEGARO, LEONARDO; CIBOTARU MIHAI, AND AGELIDIS VASSILIOS G. (2015). «Analysis and Comparison of Electrical PV Modeling Techniques Based on Datasheet Values». Australian Energy Research Institute, School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, September, 2015.
- CUBAS, JAVIER; SANTIAGO PINDADO Y ASSAL FARRAHI (s/a). «New Method for Analytical Photovoltaic Parameter Extraction». Instituto de Microgravedad Ignacio da Riva Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
- CUBAS, JAVIER; SANTIAGO PINDADO Y CARLOS DE MANUEL (2014). «Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function». 1st International e-Conference on Energies, 2014.
- EACHEVERRÍA, NOELIA; M. P. CERVellini, R. GARCÍA RETEGUI, SERGIO ALEJANDRO GONZÁLEZ, M. FUNES Y DANIEL CARRICA (2014). «Extracción de Parámetros de un Panel Solar Utilizando Algoritmos Genéticos». Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 2, pp. 04.49-04.56, 2014.
- EFSTRATIOU, BATZELIS (2015). «A Method for the Analytical Extraction of the Single-Diode PV Model Parameters». National Technical University of Athens, Athens 15780, Greece.
- EFSTRATIOU, BATZELIS (2019). «Non-Iterative Methods for the Extraction of the Single-Diode Model Parameters of Photovoltaic Modules: A Review and Comparative Assessment». Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London, Energies 2019.
- HAIDER, IBRAHIM; ANANI NADER (2017). «Evaluation of Analytical Methods for Parameter Extraction of PV modules». 9th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-17, 5-7, July 2017, Chania, Crete, Greece.
- HUSSEIN, AHMED (2017). «A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules». *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017.
- MA, JIEMING; T. O. TING, KALOK MAN, NAN ZHANG, SHENG-UEI GUAN AND PRUDENCE W. H. WONG (2013). «Parameter Estimation of Photovoltaic Models via Cuckoo Search». *Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics*, Volume, 2013.
- MADI, SAIDA; KHELDOUN, AISSA (2017). «A Novel Mathematical Model for Photovoltaic Module». *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 8, Issue 5, May 2017.
- STORNELLI, VINCENZO; MIRCO MUTTILLO, TULLIO DE RUBEIS AND IOLE NARDI (2019). «A New Simplified Five-Parameter Estimation Method for Single-Diode Model of Photovoltaic Panels». Department of Industrial and Information Engineering and Economics (DIIIE), University of L'Aquila, Piazzale Pontieri 1, Monteluco di Roio, I 67100, 67100 L'Aquila, Italy, Energies 2019.