

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILICIO PARA DIFERENTES IRRADIANCIAS Y TEMPERATURAS – MÉTODO SIMPLIFICADO CON DATOS DEL DATASHEET

Fantini D.G.*, Baptista de Siqueira M.B. *

* Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Lab. de Energia e Ambiente, Campus Darcy Ribeiro Asa Norte – Brasília, DF, CEP 70910-900, Brasil. fantinidario@gmail.com, mariosiqueira@unb.br, <http://www.lea.unb.br>

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2064>

RESUMEN

Este artículo propone y describe un modelo numérico para la obtención de los cinco parámetros (corriente foto generada, corriente de saturación, factor de idealidad, resistencia en serie y en paralelo) del circuito equivalente de un módulo fotovoltaico (modelo de un diodo) a partir de los datos dados en el datasheet. Estos parámetros posibilitan determinar el punto de máxima potencia y trazar la curva I-V del módulo para condiciones diferentes a las dadas por los fabricantes de irradiancia y temperatura. Se utiliza el método de Newton-Raphson para resolver el sistema de ecuaciones no lineales del modelo propuesto. Se realiza el muestreo de las diferentes curvas I-V dadas por los fabricantes de dos módulos fotovoltaicos diferentes y se determinan las métricas RMSE y NRMSE. Estas métricas, así como los valores de los cinco parámetros son comparados con los obtenidos por otros modelos propuestos por diferentes autores. El modelo final presentó 100% de convergencia a soluciones válidas para los paneles usados en la validación de los resultados.

PALABRAS CLAVE: Modelo Célula Fotovoltaica, Modelo de un Diodo, Cinco Parámetros.

ABSTRACT

This paper proposes and describes a numerical model to obtain the five parameters (photo generated current, saturation current, ideality factor, resistance in series and parallel) of the equivalent single-diode model of photovoltaic cell from the data given in the datasheet. These parameters allow to determine the maximum power point and plot the I-V curve of the module for irradiance and temperatures different from the datasheet. The Newton-Raphson method is used to solve the system of nonlinear equations of the proposed model. The different I-V curves given by the manufacturers of two different photovoltaic modules are sampled and the metrics RMSE and NRMSE are calculated. The metrics obtained, as well as the values of the five parameters are compared with those obtained by other models proposed by different authors. The final model presented 100% convergence to valid solutions for the photovoltaic panels used in the validation of the results.

KEYWORDS: Photovoltaic Cell Model, One Diode Mode, Five Parameters

INTRODUCCIÓN

Los fabricantes de módulos (células o paneles) fotovoltaicos suministran los valores de potencia máxima (P_{mpp}), voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), voltaje (V_{mpp}) y corriente (I_{mpp}) para el punto de máxima potencia para condiciones estándares de testeo (STC - Standard Test Conditions) y para condiciones de operación nominal de temperatura (NOCT). También proporcionan los coeficientes de temperatura para V_{oc} , I_{sc} y P_{mpp} . Para STC corresponden 1000 W/m^2 de irradiancia, temperatura de operación 25°C y AM (Air Mass) 1,5. Para NOCT corresponden 800 W/m^2 de irradiancia, temperatura de operación entre $45\text{-}49^\circ\text{C}$ y AM 1,5. Los valores de potencia de un módulo fotovoltaico dados por los fabricantes son un número útil para comparar el rendimiento entre diferentes módulos en condiciones fijas (STC o NOCT), sin embargo estas condiciones raramente se dan en ambientes reales de funcionamiento y por lo tanto no son valores útiles para describir cómo funcionará un módulo en condiciones reales (Marion et al., 2000).

Los fabricantes de módulos fotovoltaicos normalmente proporcionan las curvas I-V para condiciones diferentes a las STC y NOCT. En la práctica estas curvas presentan características no lineales y pueden ser aproximadas mediante una ecuación trascendente exponencial, que se basa en la interpretación física del modelo eléctrico utilizado para representar a una célula fotovoltaica. En la literatura referente a estos dispositivos se encuentra el modelo eléctrico ideal de un diodo, el modelo de un diodo con resistencia en serie y el modelo de uno y dos diodos con resistencia en serie y en paralelo (de deriva). En este trabajo se adopta el modelo de un diodo con ambas resistencias, (ver Fig. 1) el cual está representado matemáticamente por la Ec. (1) que consta de 5 parámetros desconocidos, corriente foto generada (I_{ph}), corriente de saturación (I_{sat}), resistencia en serie (R_s), resistencia en paralelo (R_{sh}) y el factor de idealidad (A_0). Para encontrar los valores de estos parámetros basándose solo en los datos dados en el datasheet o a través de valores obtenidos con un trazador de curva I-V se emplean diferentes métodos de resolución numérica, utilizando algoritmos iterativos propios (Stornelli et al., 2019; Silva et al., 2016; Villalva et al., 2009; Sera et al 2007) o métodos numéricos bien conocidos como Newton-Raphson (Hejri y Mokhtari, 2017; Dobos, 2012), y también existe la posibilidad de solución analítica utilizando la función W de Lambert (Nassar-Eddine et al., 2016; Batzelis, Papathanassiou, 2016).

De acuerdo con Laudan et al. (2014) la identificación de los cinco parámetros del modelo de un diodo, a partir de datos experimentales mediante el uso de un sistema de cinco ecuaciones, es un problema de optimización no convexo. En particular, la extracción de los cinco parámetros de la curva I-V es un problema multimodal de difícil solución, debido a la presencia de varios mínimos locales que dificultan la utilización de algoritmos directamente deterministas, por ser muy sensibles a los valores iniciales. De hecho, al cambiarlos, el algoritmo puede permanecer en un mínimo local distinto y devolver una solución diferente o físicamente no real, como es el caso de obtener valores negativos para las resistencias. El modelo que se propone pretende resolver este problema permitiendo la obtención de los cinco parámetros para un amplio rango de irradiancias y temperaturas, convergiendo a soluciones reales físicamente sin la necesidad de ajustes constantes en los valores de inicialización.

MODELO DE LA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Una célula fotovoltaica puede ser definida como un diodo de gran área optimizado para convertir de forma directa parte de la irradiancia solar, que en él incide, en energía eléctrica. La Fig. 1 es el circuito eléctrico equivalente de una célula fotovoltaica, conocido como modelo de un diodo (Phang et al., 1986).

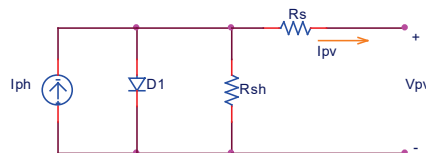


Fig. 1. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica (modelo de un diodo)

Aplicando la ley de corriente de Kirchoff al circuito junto con la ecuación del diodo de Shockley se obtiene, la Ec. (1),

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{I_{pv} R_s + V_{pv}}{A_0 V_t} \right) - 1 \right] - \frac{I_{pv} R_s + V_{pv}}{R_{sh}} \quad (1)$$

donde I_{ph} es la corriente foto generada [A], R_{sh} es la resistencia en paralelo [Ω], R_s es la resistencia en serie [Ω], I_{pv} es la corriente la corriente de salida [A], V_{pv} es la tensión de salida [V], I_{sat} es la corriente de saturación del diodo D1 [A], A_0 es el factor de idealidad del diodo y V_t es el voltaje térmico de la unión pn del diodo.

METODO DE DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS

Ecuaciones Fundamentales para el Modelo

Las Ecs. (2) (3) (4) y (5), permiten trasladar la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto, la corriente y tensión de máxima potencia para STC (irradiancia $G_0 = 1000W/m^2$ y temperatura $T_{STC} = 25^\circ C$) para condiciones diferentes de operación (I_{sc} , I_{mpp} , V_{oc} , V_{mpp} , T_{cell} y G) (Marion et al., 2000; Marion, 2002; Picault et al., 2010; Lopes Filho et al., 2018),

$$I_{sc} = \frac{G}{G_0} [I_{sc,STC} + k_i (T_{cell} - T_{STC})] \quad (2)$$

$$I_{mpp} = \frac{G}{G_0} [I_{mpp,STC} + k_{i,mpp} (T_{cell} - T_{STC})] \quad (3)$$

$$V_{oc} = [V_{oc,STC} + k_v (T_{cell} - T_{STC})] \left[1 + \delta(T) \ln \frac{G}{G_0} \right] \quad (4)$$

$$V_{mpp} = [V_{mpp,STC} + k_{v,mpp} (T_{cell} - T_{STC})] \left[1 + \delta(T) \ln \frac{G}{G_0} \right] \quad (5)$$

$I_{sc,STC}$ y $I_{mpp,STC}$ son las corrientes de cortocircuito y de máxima potencia, $V_{oc,STC}$ y $V_{mpp,STC}$ son las tensiones de circuito abierto y de máxima potencia para STC, k_i y k_v son los coeficientes de temperatura de corriente e de tensión (datasheet). El factor de corrección de irradiancia δ para V_{oc} y V_{mpp} y los coeficientes de temperatura de corriente y tensión máxima $k_{i,mpp}$ y $k_{v,mpp}$, son determinados a través de los procedimientos propuestos por Marion et al. (2000) y Marion (2002) modificados, de acuerdo con las Ecs. (6), (7) y (8),

$$\delta(G_{NOCT}, T_{NOCT}) = \frac{V_{oc,NOCT} - V_{oc,STC} + k_v (T_{NOCT} - T_{STC})}{[V_{oc,STC} + k_v (T_{NOCT} - T_{STC})] \ln \left(\frac{G_{NOCT}}{G_0} \right)} \quad (6)$$

$$k_{v,mpp} = \left[\frac{V_{mpp,NOCT}}{1 + \delta(T_{NOCT}) \ln \left(\frac{G_{NOCT}}{G_0} \right)} - V_{mpp,STC} \right] (T_{NOCT} - T_{STC})^{-1} \quad (7)$$

$$k_{i,mpp} = \frac{I_{mpp,NOCT} - \frac{G_{NOCT}}{G_0} I_{mpp,STC}}{T_{NOCT} - T_{STC}} \quad (8)$$

Analizando la Ec. (1) para el caso $V_{pv} = V_{oc}$ lo que implica $I_{pv} = 0$, se obtiene la Ec. (9),

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{A_0 V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (9)$$

de la Ec. (9) despreciando el término V_{oc}/R_{sh} (modelo ideal de un diodo), se obtiene la Ec. (10),

$$V_{oc} = A_0 V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (10)$$

siendo $V_t = k T_{cell} N_{cell}/q$ donde $k = 1,3807 \cdot 10^{-23} J/K$ es la constante de Boltzmann, $q = 1,6022 \cdot 10^{-19} C$ es la carga de un electrón, T_{cell} es la temperatura del módulo fotovoltaico [K] y N_{cell} es el número de células en serie. Para el caso de circuito abierto donde la célula no tiene una carga externa toda la corriente foto generada (I_{ph}) circula a través del diodo (D1) debido a que este se polariza directamente, por lo tanto, puede despreciarse el término V_{oc}/R_{sh} por R_{sh} ser mucho mayor a la resistencia del diodo. Así V_{oc} se considera independiente de la resistencia en paralelo. De esta forma, substituyendo I_{sc} por I_{ph} en la Ec. (2), combinándola con la Ec. (10) y siendo la relación $I_{ph}/I_{sat} \gg 1$ se tiene que,

$$V_{oc}(G, T) = A_0 V_t \ln \left\{ \frac{\frac{G}{G_0} [I_{ph,STC} + k_i (T_{cell} - T_{STC})]}{I_{sat}} \right\} \quad (11)$$

Reorganizando la Ec. (11) y considerando $T_{cell} = T_{STC}$ obtenemos la Ec.(12),

$$V_{oc}(G, T_{STC}) = V_{oc,STC} + A_0 V_t \ln \left(\frac{G}{G_0} \right) \quad (12)$$

generalizándola para diferentes temperaturas e igualando las Ecs. (12) y (4) combinadas con la Ec. (6) para T_{STC} e $G = G_{NOCT}$ se determina A_0 para NOCT con la Ec. (13),

$$A_0(G_{NOCT}, T_{STC}) = \frac{V_{oc,NOCT} - V_{oc,STC} + k_v (T_{NOCT} - T_{STC})}{\ln \left(\frac{G_{NOCT}}{G_0} \right)} \frac{q}{k T_{STC} N_{cell}} \quad (13)$$

El factor δ representa la pendiente $\Delta V_{oc} / \Delta \ln(G)$ normalizada por la división de V_{oc} corregida para cada temperatura ($V_{oc,STC} + k_v (T_{cell} - T_{STC})$), por lo tanto la Ec. (13) es para condiciones NOCT y es utilizada para ajustar la tangente de la curva I-V en el punto $I_{pv} = I_{sc}$ y $V_{pv} = 0$ (corto circuito).

En este trabajo se considera k_v constante y δ función de la temperatura e irradiancia, esto es una modificación a lo propuesto por Marion et al. (2000) y Marion (2002) que consideran a δ dependiente de la temperatura y a k_v de la irradiancia. Para corregir el valor de V_{mpp} por la irradiancia se utiliza el mismo δ obtenido para V_{oc} .

Tomando la Ec. (9) que corresponde a las condiciones de circuito abierto, se despeja I_{sat} de acuerdo con la Ec. (14),

$$I_{sat} = \frac{I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{A_0 V_t} \right) - 1} \quad (14)$$

De la Ec. (1) para la condición de corto circuito y despreciando el termino $I_{sat} \left[\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{A_0 V_t} \right) - 1 \right]$ obtenemos I_{ph} ,

$$I_{ph} = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) \quad (15)$$

Para la condición de máxima potencia se cumple que $\left. \frac{dP}{dV} \right|_{mpp} = 0$ y, por lo tanto, se tiene que

$$\left. \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} \right|_{mpp} = - \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} \quad (16)$$

derivando la Ec. (1) respecto de V_{pv} se obtiene la siguiente ecuación,

$$\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} = -I_{sat} \exp \left(\frac{I_{pv} R_s + V_{pv}}{A_0 V_t} \right) \left(\frac{R_s}{A_0 V_t} \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + \frac{1}{A_0 V_t} \right) - \frac{R_s}{R_{sh}} \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} - \frac{1}{R_{sh}} \quad (17)$$

Modelo para Determinar los 5 Parámetros

Las ecuaciones presentadas posibilitan la resolución del problema de determinar los cinco parámetros R_s, R_{sh}, A_0, I_{ph} y I_{sat} para las diferentes condiciones de irradiancia y temperatura. Los parámetros I_{ph} y I_{sat} se eliminan del sistema de ecuaciones colocándolos en función de los restantes de acuerdo con las Ecs. (14) y (15), esto reduce el sistema de cinco ecuaciones para tres, evitando la dificultad de estimar un valor inicial de I_{sat} que permita la convergencia del método numérico a una solución válida. Se utiliza el método de Newton-Raphson para resolver el sistema de ecuaciones. Inicialmente se ajusta la pendiente de la curva I-V en el punto de cortocircuito para las condiciones NOCT.

La primera ecuación del sistema se obtiene evaluando la Ec. (1) en el punto de máxima potencia, sustituyendo I_{ph} por la Ec. (15) y I_{sat} por la Ec. (14),

$$f_1(R_s, R_{sh}, A_0) = I_{mpp} - I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) + \frac{I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{A_0 V_t}\right) - 1} \left[\exp\left(\frac{I_{mpp} R_s + V_{mpp}}{A_0 V_t}\right) - 1 \right] + \frac{I_{mpp} R_s + V_{mpp}}{R_{sh}} \quad (18)$$

La segunda ecuación del sistema se obtiene de la Ec. (17) combinada con la Ec. (16) evaluada en el punto de máxima potencia,

$$f_2(R_s, R_{sh}, A_0) = I_{mpp} + \frac{I_{mpp} R_s - V_{mpp}}{R_{sh}} + \frac{I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{A_0 V_t}\right) - 1} \exp\left(\frac{I_{mpp} R_s + V_{mpp}}{A_0 V_t}\right) \left(\frac{I_{mpp} R_s - V_{mpp}}{A_0 V_t}\right) \quad (19)$$

La tercera ecuación se obtiene a partir de la Ec. (17) evaluada en las condiciones de cortocircuito,

$$f_3(R_s, R_{sh}, A_0) = \frac{1}{R_s + \left[\frac{I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{A_0 V_t \exp\left(\frac{V_{oc}}{A_0 V_t}\right) - 1} \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{A_0 V_t}\right) + \frac{1}{R_{sh}} \right]^{-1}} - \frac{I_{sc} - I_{mpp}}{m V_{mpp}} \quad (20)$$

En la Ec. (20) se introduce el término “ m ” que permite el ajuste de la pendiente de la curva I-V en el punto de cortocircuito y siempre asumirá valores mayores que 2.

Las Ecs. (18), (19) y (20) forman el sistema de ecuaciones no lineales el cual se resuelve aplicando Newton-Raphson. Para ajustar el valor de m se incrementa su valor inicial igual a 2 hasta que se cumpla la igualdad establecida en la Ec. (13). Luego se utiliza el mismo coeficiente m para todas las demás condiciones de irradiancia y temperatura. En las ecuaciones del sistema se utilizan los valores para NOCT informados por el fabricante para encontrar el valor de m . En las Ecs. (18), (19) y (20) deben sustituirse los términos V_{oc} y V_{mpp} por las Ecs. (21) y (22) resultado de la combinación de las Ecs. (4) y (5) con la Ec. **Error! Reference source not found.**,

$$V_{oc} = [V_{oc,STC} + k_v(T_{cell} - T_{STC})] \left[1 + \frac{A_0 V_t}{V_{oc,STC} + k_v(T_{cell} - T_{STC})} \ln\left(\frac{G}{G_0}\right) \right] \quad (21)$$

$$V_{mpp} = [V_{mpp,STC} + k_{v,mpp}(T_{cell} - T_{STC})] \left[1 + \frac{A_0 V_t}{V_{oc,STC} + k_v(T_{cell} - T_{STC})} \ln\left(\frac{G}{G_0}\right) \right] \quad (22)$$

La obtención de las ecuaciones de aproximación analíticas para los valores de inicialización de A_0 y R_s son basadas en el trabajo de Hejri et al. (2016),

$$A_0 = \frac{2V_{mpp} - V_{oc}}{V_t \left[\frac{I_{mpp}}{I_{sc} - I_{mpp}} + \ln\left(\frac{I_{sc} - I_{mpp}}{I_{sc}}\right) \right]} \quad (23)$$

$$R_s = \frac{2V_{mpp} - V_{oc}}{I_{mpp} + (I_{sc} - I_{mpp}) \ln\left(\frac{I_{sc} - I_{mpp}}{I_{sc}}\right)} + \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (24)$$

El valor inicial de R_{sh} es (-1) dividido la tangente de la mitad del ángulo del triángulo formados por los puntos (0, I_{sc}), (V_{mpp} , I_{sc}) y (V_{mpp} , I_{mpp}) en el punto de cortocircuito. Siendo que la Ec. (17) es aproximadamente igual a $-1/R_{sh}$ la siguiente aproximación resulta satisfactoria como valor de inicialización,

$$R_{sh} = \frac{2V_{mpp}}{I_{sc} - I_{mpp}} \quad (25)$$

RESULTADOS

Para validar el modelo propuesto se utilizan los paneles solares KYOCERA KC200GT y SUNTECH STP245-20/Wd cuyas características fueron extraídas de los datasheets correspondientes. El valor de m fue de 4 y 6 respectivamente. En la Fig. 2 y Fig. 3 se muestran las curvas I-V para las diferentes condiciones de temperatura e irradiancia, en azul se representan las obtenidas por medio del modelo propuesto y en líneas punteadas se muestran las curvas experimentales dadas por los fabricantes.

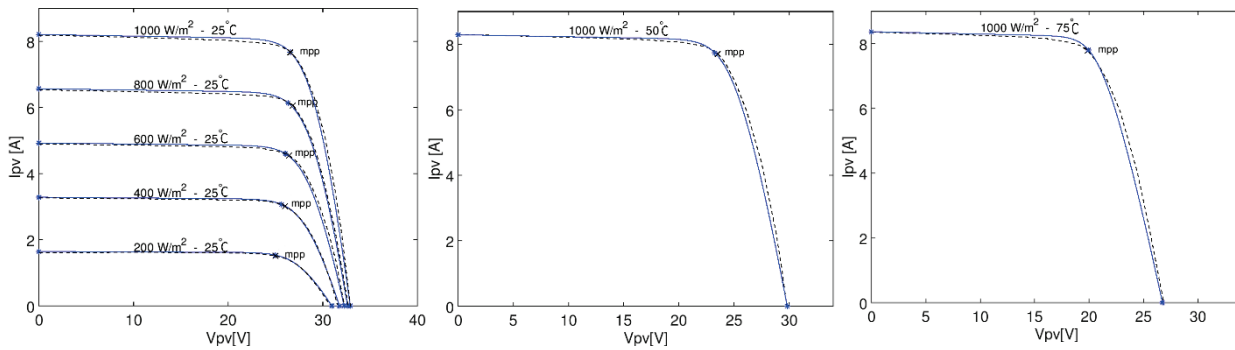


Fig. 2. Curvas I-V del panel KYOCERA KC200GT.

Tabla 1. Resultados de los 5 parámetros del modelo propuesto para diferentes irradiancias y temperaturas.

| G [W/m ²] | T _{cell.} [°C] | R _s [Ω] | R _{sh} [Ω] | A ₀ | I _{sat} [nA] | I _{ph} [A] | RMSE - NRMSE |
|-----------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------------|---------------------|---------------|
| 1000 | 25 | 0,323 | 197,19 | 0,9293 | 0,0668 | 8,224 | 0,1760 - 2,57 |
| 800 | 25 | 0,400 | 244,35 | 0,9213 | 0,0534 | 6,578 | 0,1000 - 1,88 |
| 600 | 25 | 0,528 | 322,19 | 0,9111 | 0,0401 | 4,934 | 0,1376 - 3,48 |
| 400 | 25 | 0,780 | 475,88 | 0,8971 | 0,0267 | 3,289 | 0,0246 - 1,78 |
| 200 | 25 | 1,520 | 927,43 | 0,8742 | 0,0134 | 1,645 | 0,0242 - 1,77 |
| 1000 | 50 | 0,430 | 168,00 | 0,7229 | 0,00989 | 8,317 | 0,2117 - 3,03 |
| 1000 | 75 | 0,538 | 140,31 | 0,5401 | 0,000436 | 8,401 | 0,2634 - 3,81 |

Tabla 2. Comparativo NRMSE del modelo propuesto con modelos existentes de diferentes autores.

| Temperatura T _{cell.} [°C] | 25 | | | | | 50 | 75 | |
|---|-----------------------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|
| | Irradiancia G [W/m ²] | | | | | | | |
| | | 1000 | 800 | 600 | 400 | 200 | 1000 | 1000 |
| Modelo | | NRMSE [%] | | | | | | |
| Stornelli et al. (2019) modelo 1 | | 0,87 | 1,62 | 2,53 | 3,05 | 3,73 | 1,14 | 2,28 |
| Stornelli et al. (2019) modelo 2 | | 0,87 | 0,92 | 1,38 | 1,09 | 1,75 | 1,01 | 1,95 |
| Hejri et al. (2017) | | 7,00 | 5,68 | 8,58 | 5,56 | 7,34 | 4,63 | 3,86 |
| Sera et al. (2007) en Hejri et al. (2017) | | 7,00 | 5,43 | 9,80 | 9,59 | 24,5 | 3,74 | 2,09 |
| Curve-fitting en Hejri et al. (2017) | | 0,86 | 1,59 | 1,51 | 0,68 | 1,23 | 2,17 | 2,41 |
| Propuesto | | 2,57 | 1,88 | 3,48 | 1,78 | 1,77 | 3,03 | 3,81 |

En la Tabla 1 y Tabla 3 se exhiben los valores referentes a los 5 parámetros de los paneles KYOCERA y SUNTECH respectivamente. También se da el valor de las métricas RMSE [A] y el RMSE normalizado (NRMSE [%]). Ambos se calculan en función de la corriente I_{pv} y, en el caso del NRMSE, se normaliza con respecto a la corriente muestreada de la curva I-V dadas en el datasheet de cada panel.

En la Tabla 2 se expone el RMSE [A] y el NRMSE [%] de los modelos propuestos por distintos autores y se observa una mejora con relación a los presentados por Hejri et al. (2017) y Sera et al. (2007).

En la Tabla 4 se comparan los 5 parámetros obtenidos con el modelo propuesto y los utilizados por el SAM (System Advisor Model - NREL) para los dos paneles solares en STC. Por medio del muestreo de la curva I-V obtenida del SAM, la cual se representa por líneas punteadas en la Fig. 4., se calculan el RMSE [A] y NRMSE [%] entre ambos modelos. La curva I-V de color azul corresponde a la obtenida con el modelo propuesto. Los valores de RMSE [A] y NRMSE [%], indicados en la Tabla 15, así como las curvas I-V generadas por ambos modelos, representadas en la Fig. 4., denotan un elevado grado de correlación. Comparando los 5 parámetros para el panel solar KYOCERA, obtenidos por ambos modelos, se verifica una gran proximidad. Para el caso del panel SUNTECH existe una marcada diferencia para I_{sat} y R_{sh} , esta diferencia es consecuencia de la divergencia del valor de A_0 entre los dos modelos.

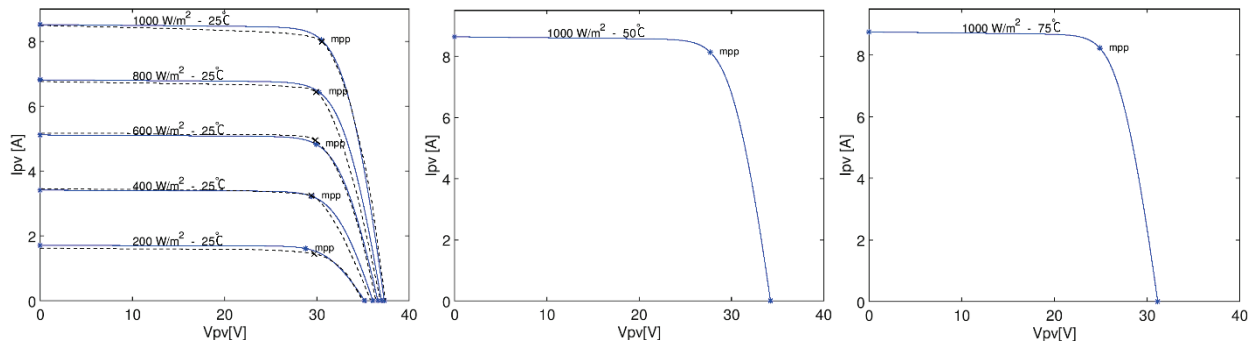


Fig. 3. Curvas I-V del panel SUNTECH STP245-20/Wd.

Tabla 3. Resultados de los 5 parámetros del modelo propuesto para diferentes irradiancias y temperaturas.

| G [W/m ²] | T _{cell.} [°C] | R _s [Ω] | R _{sh} [Ω] | A ₀ | I _{sat} [nA] | I _{ph} [A] | RMSE - NRMSE |
|-----------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------------|---------------------|---------------|
| 1000 | 25 | 0,313 | 380,94 | 0,9122 | 0,0255 | 8,527 | 0,168 - 2,313 |
| 800 | 25 | 0,388 | 472,20 | 0,9046 | 0,0204 | 6,822 | 0,244 - 4,279 |
| 600 | 25 | 0,512 | 622,90 | 0,8950 | 0,0153 | 5,116 | 0,097 - 2,178 |
| 400 | 25 | 0,756 | 920,54 | 0,8817 | 0,0102 | 3,412 | 0,136 - 4,648 |
| 200 | 25 | 1,475 | 1795,7 | 0,8600 | 0,0051 | 1,705 | 0,084 - 6,140 |

Tabla 4. Comparativo entre el modelo propuesto y el modelo del SAM para ambos paneles

| Panel | Modelo | Condiciones | R _s [Ω] | R _{sh} [Ω] | A ₀ | I _{sat} [nA] | I _{ph} [A] | RMSE-NRMSE |
|--------------------|-----------|-------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------------|---------------------|---------------|
| KYOCERA KC200GT | Propuesto | STC | 0,323 | 175,01 | 1,0365 | 0,932 | 8,225 | 0,067 - 1,011 |
| | SAM | STC | 0,325 | 171,60 | 1,0298 | 0,794 | 8,226 | |
| SUNTECH STP245 | Propuesto | STC | 0,270 | 830,08 | 1,0178 | 0,402 | 8,523 | 0,046 - 0,629 |
| | SAM | STC | 0,313 | 380,94 | 0,9122 | 0,0255 | 8,527 | |

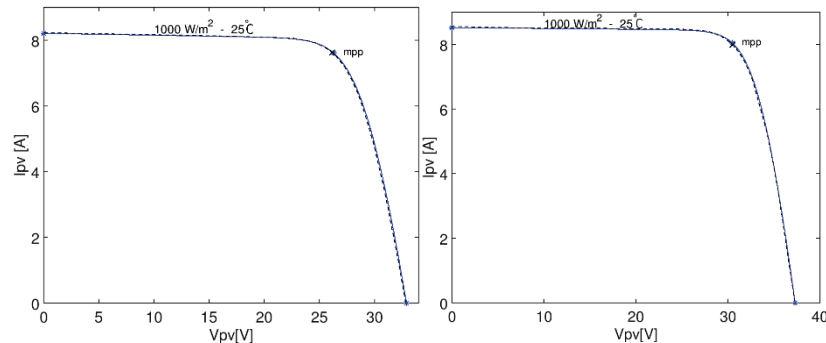


Fig. 4. Curvas I-V modelo propuesto y modelo SAM para los paneles KYOCERA (izquierda) SUNTECH (derecha)

CONCLUSIÓN

El factor de idealidad indica en qué medida el dispositivo se comporta de manera similar a un diodo ideal. Este modelo asume que el valor del factor de idealidad es dependiente tanto de la temperatura como de la irradiancia, esto está en concordancia con el artículo de revisión de Bashahu y Nkundakura (2007) que expone que A_0 depende del voltaje, de la temperatura, de la concentración del dopaje y de las diferentes condiciones de funcionamiento, este disminuye con el aumento de la temperatura en condiciones oscuras e iluminadas y aumenta con el incremento de la irradiancia. De acuerdo con la Tabla 2 y Tabla 4 este último comportamiento se cumple en el modelo propuesto.

En el modelo propuesto se obtiene que la resistencia en serie es directamente proporcional a la variación de la temperatura e inversamente proporcional a la variación de la irradiancia, coincidiendo con lo expuesto por Stornelli et al. (2019), Sahin (2016) y Silva et al. (2016) que está de acuerdo con lo expresado por la norma internacional IEC 60891.

Con relación al comportamiento de la resistencia en paralelo en el modelo propuesto, se verifica un aumento con la disminución de la irradiancia y una disminución con el aumento de la temperatura. Este comportamiento también es exhibido por Lopes Filho (2018), Hejri y Mokhtari (2017) y Picault et al. (2010). La resistencia en paralelo representa las pérdidas intrínsecas debidas a las corrientes de fugas, estas se dan entre los contactos negativos y positivos, y entre los contactos negativos la región p (dopada positivamente) de la célula.

El modelo presentó 100% de convergencia a soluciones válidas para los módulos analizados sin necesidad de ajustes en los valores de inicialización, esto facilita el cálculo dinámico del punto de máxima potencia tanto en paneles como en células para elevados valores de irradiancia e temperatura.

REFERENCIAS

- Bashahu M. and Nkundabakura P. (2007). Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors. *J. Solar Energy* 81, 856-863.
- Batzelis, E., Papathanassiou, S. (2016). A Method for the Analytical Extraction of the Single-Diode PV Model Parameters, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 7, 504–512.
- Dobos A. P., (2012). An Improved Coefficient Calculator for the California Energy Commission 6 Parameter for Single-Diode Model of Photovoltaic Panels. *J. Energies* 12, 4271-4291.
- Hejri M., and Mokhtari H. (2017). On the Comprehensive Parametrization of the Photovoltaic (PV) Cells and Modules. *J. IEEE Journal of Photovoltaics* 7, 250-258.
- Hejri, M., Mokhtari, H., Azizian, M. R., (2016). An analytical-numerical approach for parameter determination of a five-parameter single-diode model of photovoltaic cells and modules. *J. International Journal of Sustainable Energy* 35, 396-410.
- Laudani, A., Fulginei, F. R. and Salvini, A. (2014). High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms. *J. Solar Energy* 103, 316-326.
- Lopes Filho G., Pereira Franco R. A. and Teles Vieira F. H. (2018). Estimación de parámetros de painéis fotovoltaicos utilizando o algoritmo firefly com atualização em função da irradiancia e temperatura. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 17-20 de abril, Gramado, Brasil.
- Marion B., Kroposki B., Emery K., del Cueto J., Myers D., and Osterwald C. (2000). Validation of a Photovoltaic Module Energy Ratings Procedure at NREL. *Program and Proceeding, NCPV Program Review Meeting*, April 16-19, Denver, United States.
- Marion B. (2002). A Method for Modeling the Current–Voltage Curve of a PV Module for Outdoor Conditions. *J. Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 10, 205-214.
- Nassar-Eddine I., Obbadi A., Errami Y., El Fajri A. and Agunaou M. (2016). Parameter estimation of photovoltaic modules using iterative method and the Lambert W function: A comparative study. *J. Energy Conversion and Management* 119, 37-48.
- Phang, J. C. H., Chan, D. S. H. and Phillips, J. R. (1986). A Comparative Study of Extraction Methods for Solar Cell Model Parameters, *J. Solid-State Electronics* 29, 329-337.
- Picault D., Raison, B., Bacha, S., de la Casa, J., and Aguilera, J. (2010). Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses. *J. Solar Energy* 84, 1301-1309.
- Sahin G. (2016). Effect of temperature on the series and shunt resistance of a silicon solar cell under frequency modulation. *Journal of Basic and Applied Physics* 5.1, 21-29.
- Sera D., Teodorescu R. and Rodriguez P. (2007). PV panel model based on datasheet values. *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2392-2396.
- Silva E. A., Bradaschia F., Cavalcanti M. C., and Nascimento A. J. Jr. (2016). Parameter Estimation Method to Improve the Accuracy of Photovoltaic Electrical Model. *J. IEEE Journal of Photovoltaics*, 6, 278-285.
- Stornelli V., Muttillio M., de Rubeis T. and Nardi I. (2019). A New Simplified Five-Parameter Estimation Method of Photovoltaic Panels”, *J. Energies* 12, 4271-4291.
- Villalva M. G, Gazoli J. R. and Ruppert Filho E. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *J. IEEE Transactions on power electronics* 24, 1198-1207.