



TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Nueva metodología para determinar los parámetros de un módulo fotovoltaico

New methodology for obtain the parameters of a photovoltaic module

Rodolfo Manuel Arias García¹
 Ignacio Pérez Abril²

¹ Empresa Copextel.SA, División Centro, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

² Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

E-mail: rodolfoag@vc.copextel.com.cu

[Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.](#)



Recibido: octubre 2016

Aprobado: julio 2017

RESUMEN/ABSTRACT

La celda y el módulo fotovoltaico se representan típicamente mediante un circuito equivalente. La correcta modelación del circuito equivalente es hoy en día una herramienta esencial para diseñadores y proyectistas, para la realización de estudios y optimizar la energía en los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, la determinación de los parámetros del circuito equivalente, es aún una tarea difícil y normalmente requiere de datos experimentales y procedimientos de cálculo, generalmente no disponibles por el usuario. Este artículo presenta una nueva metodología, que posibilita el cálculo exacto de los parámetros y magnitudes eléctricas, del modelo de simple diodo con cinco parámetros, obtenidos a partir de los datos aportados por los fabricantes en las hojas de datos de los módulos fotovoltaicos. Finalmente se comprueba la validez y precisión de la metodología propuesta, comparando datos y curvas experimentales obtenidas por el fabricante de un módulo comercial, con los obtenidos mediante el modelo matemático propuesto.

Palabras clave: fotovoltaico, simulación, arreglo, modelo, celdas solares.

The cell and photovoltaic module is typically represented by an equivalent circuit. The correct equivalent circuit modeling is nowadays an essential tool for designers and planners, for studies and optimizes energy in photovoltaic systems. However, the extraction of the equivalent circuit parameters is still a difficult task and typically requires experimental data and calculation procedures, generally not available for the user. This paper presents a new methodology, which enables the exact calculation of the parameters and electrical quantities, simple diode model with five parameters, obtained from the data provided by manufacturers in the data sheets of photovoltaic modules. Finally is showed the validity and accuracy of the proposed methodology, comparing experimental data and curves obtained by the manufacturer of a commercial module, with those obtained by the proposed mathematical model is checked.

Key words: photovoltaic, simulation, array, model, solar cells.

INTRODUCCIÓN

La energía solar constituye una fuente de energía limpia e inagotable. La conversión directa de esta energía en electricidad se realiza a través de las celdas fotovoltaicas. Las celdas se agrupan para formar los módulos fotovoltaicos, estos a su vez se agrupan en serie y/o paralelo para formar arreglos fotovoltaicos, conformándose así los denominados generadores fotovoltaicos. Los generadores fotovoltaicos pueden alimentar directamente cargas eléctricas de corriente directa. Aplicaciones más sofisticadas requieren de convertidores electrónicos para procesar la energía eléctrica proveniente del generador fotovoltaico. Estos convertidores pueden ser usados para regular la tensión y la corriente en las cargas, para controlar el flujo de potencia en los sistemas conectados a las redes eléctricas y principalmente para seguir el punto de máxima potencia (en inglés *MPPT*), del generador fotovoltaico para lograr la mejor eficiencia del sistema.

La rápida expansión de la energía solar fotovoltaica, como consecuencia de las ventajas que representa su uso, esencialmente en los sistemas interconectados a las redes eléctricas, por su carácter totalmente descentralizado, tanto en grandes parques fotovoltaicos o en cubiertas y fachadas de edificios, han hecho posible que se amplíen cada vez más las investigaciones en este campo [1]. Los dispositivos fotovoltaicos iluminados sobre la superficie de la tierra dan una respuesta que depende de la calidad e intensidad de la radiación recibida y de la temperatura de las celdas [2]. La respuesta obtenida es el resultado en su conjunto de los parámetros eléctricos de los módulos y de la estructura del generador fotovoltaico. Por tanto 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 [3-4]. 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.

El comportamiento eléctrico de un dispositivo fotovoltaico, bajo determinadas condiciones de operación, se caracteriza por sus parámetros eléctricos y por la curva Volt-Ampere ($I=f(V)$), que describe en operación. Numerosas investigaciones se han desarrollado encaminadas a lograr una elevada precisión de los modelos. En todos los casos los parámetros de los modelos desarrollados, se obtienen a partir de los escasos datos suministrados por los fabricantes. Sin embargo, para el cálculo de los parámetros se realizan consideraciones como: se estima el factor de idealidad del diodo [5-8], se considera la fotocorriente igual a la corriente de cortocircuito [9-11], se desprecia la corriente de saturación inversa para el cálculo de la fotocorriente [12-14], se desprecia la resistencia paralelo para calcular la corriente de saturación inversa [15-17], además de las consideraciones anteriores en [18-19], los algoritmos propuestos para el cálculo de los parámetros requieren de una elevada carga computacional.

En el presente artículo se presenta una metodología que permite calcular de manera exacta los parámetros del circuito equivalente de simple diodo con cinco parámetros, a partir de los datos aportados por el fabricante, logrando desacoplar en las ecuaciones propuestas los parámetros del circuito equivalente y con un mínimo de esfuerzo computacional calcular cada uno de ellos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Circuito equivalente del módulo fotovoltaico

Desde el siglo XX y lo que va del XXI, se han desarrollado diferentes circuitos equivalentes para celdas y módulos fotovoltaicos. Típicamente la opción de uno u otro circuito equivalente depende de la precisión deseada de la curva $I=f(V)$ modelada con respecto a la curva obtenida de forma experimental. La figura 1, muestra el circuito equivalente más usado para modelar el módulo fotovoltaico, por garantizar elevada precisión y desempeño en estudios de sistemas fotovoltaicos.

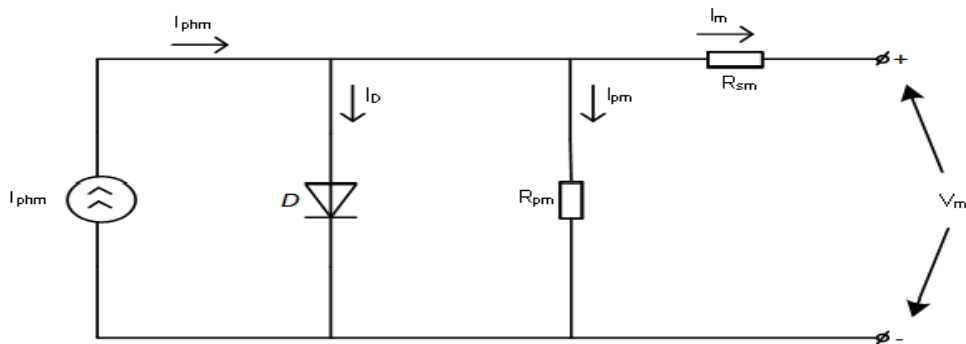


Fig.1. Circuito equivalente del módulo fotovoltaico.

En la figura 1, I_{phm} es la fotocorriente del módulo en (A), I_D es la corriente a través del diodo en (A), I_{pm} la corriente que circula por la resistencia paralelo del módulo (R_{pm}), I_m es la corriente del módulo en (A) que circula por la resistencia serie del módulo (R_{sm}) y la resistencia equivalente de la carga eléctrica conectada al módulo y V_m representa la tensión de salida del módulo fotovoltaico en (V).

Aplicando las leyes de *Kirchoff* y el modelo matemático del diodo *Shockley* para representar la corriente I_D del diodo [12], la característica Volt-Ampere del circuito $I=f(V)$, se expresa a través de la ecuación (1).

$$I_m = I_{phm} - I_0 \left[e^{\frac{V_m + I_m R_{sm}}{N_s n V_t}} - 1 \right] - \frac{V_m + I_m R_{sm}}{R_{pm}} \quad (1)$$

Donde, I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo, N_c es el número de celdas del módulo fotovoltaico, n es el factor de idealidad del diodo, desde la teoría de difusión de *Shockley*. El valor de n para celdas de silicio se encuentra en valores comprendidos en el intervalo $1 \leq n \leq 2$ y su elección tiene una marcada incidencia en la forma que adopta la característica $I_m = f(V_m)$ [12; 19]. La mayoría de los modelos adoptan para este factor un valor arbitrario dentro del intervalo, recomendándose por varios autores elegir un valor por el entorno de 1,3 [12; 14]. Como se verá posteriormente en la metodología propuesta este valor se calcula de manera automática garantizando el mejor ajuste de la característica $I_m = f(V_m)$, a partir de los datos del fabricante. Finalmente V_t es la tensión térmica del diodo, una constante que depende de la temperatura T (K), la constante de *Boltzman* ($K = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K) y la carga del electrón ($q = 1,60217646 \cdot 10^{-19}$ C). La dependencia de V_t de estos parámetros se expresa como $V_t = K T/q$.

La ecuación (1), resultado del circuito equivalente propuesto en la figura 1, contiene cinco parámetros desconocidos, I_{phm} , R_{sm} , R_{pm} , I_0 y n , cuyos valores se determinan a partir de los datos aportados por el fabricante en la hoja de datos de sus módulos fotovoltaicos, que básicamente representan tres puntos de la característica: 1) el punto de cortocircuito ($0, I_{ccm}$), 2) el de circuito abierto ($V_{ocm}, 0$) y 3) el de máxima potencia (V_{max}, I_{max}). Los datos de estos tres puntos corresponden a las condiciones estándar de 1000 W/m^2 , una temperatura de 25°C y una masa de aire ($AM=1.5$).

La figura 2.a, muestra la característica externa del módulo fotovoltaico $I_m = f(V_m)$, en la que aparecen señalados los puntos antes mencionados, mientras en la figura 2.b, aparece la característica de potencia del módulo fotovoltaico en función de la tensión, $P_m = f(V_m)$.

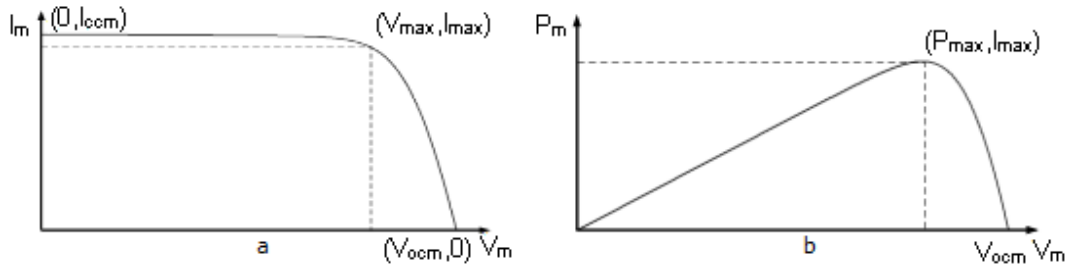


Fig.2. Característica del módulo fotovoltaico. a) Característica $I_m = f(V_m)$; b) característica $P_m = f(V_m)$.

Es poco probable el trabajo del módulo fotovoltaico en las condiciones estándar de operación, por lo que dos parámetros de la ecuación (1), son dependientes de la variación de la radiación y temperatura. La fotocorriente posee una elevada dependencia de la radiación (G) y en menor medida de la temperatura y por su parte la corriente de saturación inversa (I_0) posee una elevada dependencia de la temperatura. A efecto de los cálculos para condiciones de operación no estándar, el valor de estas magnitudes eléctricas se obtiene a partir de las ecuaciones (2) y (3), [5; 8; 11; 19].

$$I_{phmx} = \frac{G_x}{G_{nom}} (I_{phmn} + K_i \Delta T) \quad (2)$$

$$I_{0x} = I_{0n} \left(\frac{T_n}{T_x} \right)^3 e^{\left[\frac{q E_g}{n K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_x} \right) \right]} \quad (3)$$

Donde I_{phmn} e I_{0n} representan la fotocorriente y la corriente de saturación inversa en condiciones estándar respectivamente, $\Delta T = T_x - T_n$ (T_x y T_n son las temperaturas a la condición real y la estándar respectivamente en K, K_i (A/K), representa el factor de variación de la fotocorriente por grados Kelvin, G_x y G_{nom} representan las respectivas radiaciones en la condición real y estándar. Por su parte E_g es la energía de activación de la banda prohibida del semiconductor, para el silicio poli-cristalino $E_g = 1.12 \text{ eV}$ y para el silicio amorfo $E_g = 1.7 \text{ eV}$ [5].

La tensión de circuito abierto V_{ocm} es otro de los parámetros que sufre una marcada variación con la temperatura [5; 8; 11; 19], la ecuación (4), para su cálculo en condiciones no estándar es la siguiente:

$$V_{ocmx} = V_{ocmn} + K_v \Delta T \quad (4)$$

Donde V_{ocmn} y V_{ocmx} en (V), representan las correspondientes tensiones de circuito abierto en condiciones nominales y en la condición no estándar, K_v (V/K), representa el factor de variación de la tensión de circuito abierto con el incremento de la

temperatura, su valor es negativo, el valor de V_{ocmx} disminuye con el incremento de la temperatura.

Método de obtención de I_0 a partir de los datos del fabricante

A partir del circuito equivalente del módulo (fig.1), y tomando en cuenta los datos nominales del fabricante, se plantean los tres circuitos representado en la figura 3, para facilitar la comprensión de los cálculos y los posteriores análisis.

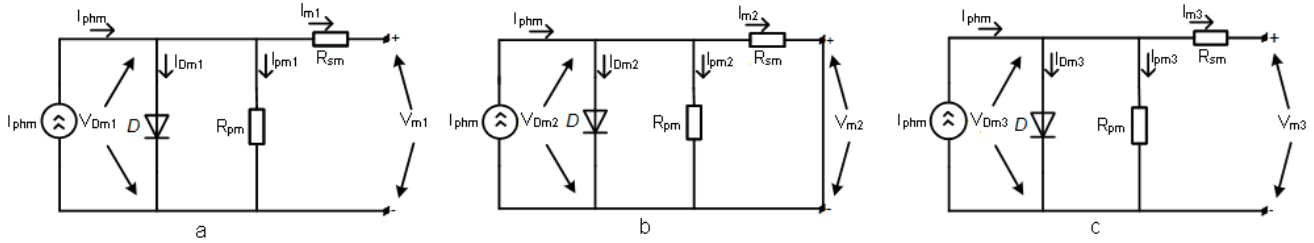


Fig.3. Esquema eléctrico del circuito, para las tres condiciones aportadas por el fabricante.

En la tabla 1, aparecen los valores que toman las magnitudes eléctricas para cada una de las condiciones planteadas en función de los datos aportados por el fabricante.

Tabla 1. Valores de las magnitudes eléctricas para cada condición			
Parámetro	Condición		
	1. Circuito Abierto	2. Cortocircuito	3. Máxima Potencia
V_{Dm}	V_{ocm}	$I_{ccm} R_{sm}$	$V_{max} + I_{max} R_{sm}$
I_m	0	I_{ccm}	I_{max}
V_m	V_{ocm}	0	V_{max}
I_{Dm}	$I_0 \left[e^{\frac{V_{ocm}}{N_c n V_t}} - 1 \right]$	$I_0 \left[e^{\frac{I_{ccm} R_{sm}}{N_c n V_t}} - 1 \right]$	$I_0 \left[e^{\frac{V_{max} + I_{max} R_{sm}}{N_c n V_t}} - 1 \right]$
I_{pm}	V_{ocm} / R_{pm}	$(I_{ccm} R_{sm}) / R_{pm}$	$(V_{max} + I_{max} R_{sm}) / R_{pm}$

El teorema de *Tellegen* [20-22], constituye un teorema de excepcional valor y versatilidad, es simple y general. Para su aplicación solo se requiere que dos circuitos contengan igual matriz de incidencia, aunque los elementos de cada una de las ramas sean diferentes. Si cumpliendo esta condición $i_1', i_2', \dots, i_m'$, son las corrientes de rama de una red N' de m ramas y $V_1'', V_2'', \dots, V_m''$, son las tensiones de rama de una red N'' de m ramas se cumplen las condiciones, vea ecuación (5):

$$\sum_{i=1}^m i_i' v_i'' = 0 \quad \text{y} \quad \sum_{i=1}^m i_i'' v_i' = 0 \quad (5)$$

Aplicando el teorema a las combinaciones posibles de los circuitos de la figura 3, sustituyendo los valores de la tabla 1, según corresponda, desarrollando manipulaciones algebraicas y despejando en cada uno de los casos I_0 , se obtienen tres expresiones que permiten calcular el valor de I_0 , para las condiciones estándar en función de los datos aportados por el fabricante en la hoja de datos de los módulos. La ecuación (6), corresponde con la aplicación del teorema a la condición 1 y 3, la ecuación (7), con la aplicación del teorema a la condición 1 y 2, y la ecuación (8), con la aplicación del teorema a la condición 2 y 3.

$$I_0 = \frac{I_{phm} (V_{max} + I_{max} R_{sm} - V_{ocm}) + I_{max} V_{ocm}}{(V_{max} + I_{max} R_{sm}) \left[e^{\frac{V_{ocm}}{N_c n V_t}} - 1 \right] - V_{ocm} \left[e^{\frac{(V_{max} + I_{max} R_{sm})}{N_c n V_t}} - 1 \right]} \quad (6)$$

$$I_0 = \frac{I_{phm} (I_{ccm} R_{sm} - V_{ocm}) + I_{ccm} V_{ocm}}{I_{ccm} R_{sm} \left[e^{\frac{V_{ocm}}{N_c n V_t}} - 1 \right] - V_{ocm} \left[e^{\frac{I_{ccm} R_{sm}}{N_c n V_t}} - 1 \right]} \quad (7)$$

$$I_0 = \frac{I_{phm} (V_{max} + I_{max} R_{sm} - I_{ccm} R_{sm}) - I_{ccm} V_{max}}{(V_{max} + I_{max} R_{sm}) \left[e^{\frac{I_{ccm} R_{sm}}{N_c n V_t}} - 1 \right] - I_{ccm} R_{sm} \left[e^{\frac{V_{max} + I_{max} R_{sm}}{N_c n V_t}} - 1 \right]} \quad (8)$$

Como se observa en las últimas tres expresiones la corriente de saturación inversa en condiciones estándar es una función de la fotocorriente, el factor de idealidad del diodo y la resistencia serie, $I_0 = f(I_{phm}, n, R_{sm})$.

Método de obtención de la fotocorriente (I_{phm}), a partir de los datos del fabricante

Los circuitos de las figuras 3.a, 3.b y 3.c se corresponden con las condiciones del circuito equivalente del módulo fotovoltaico bajo las condiciones estándar de los datos aportado por los fabricantes. Como consecuencia de ello, la fotocorriente (I_{phm}), en los tres circuitos es la misma. Las tres ecuaciones anteriores (6; 7; 8), se obtuvieron bajo esta condición, por lo que igualando dos de ellas y despejando I_{phm} , se obtiene la ecuación (9), donde la fotocorriente solo queda en función de dos parámetros de modelo, $I_{phm} = f(n, R_{sm})$.

$$I_{phm} = \frac{I_{ccm} V_{max} E_{Vocm} + I_{max} V_{ocm} E_{Iccm} - I_{ccm} V_{ocm} E_{Pmax}}{(I_{max} R_{sm} - I_{ccm} R_{sm} + V_{max}) E_{Vocm} - (V_{max} + I_{max} R_{sm} - V_{ocm}) E_{Iccm} + (I_{ccm} R_{sm} - V_{ocm}) E_{Pmax}} \quad (9)$$

Donde E_{Vocm} , E_{Iccm} y E_{Pmax} se determinan por las ecuaciones (10), (11) y (12):

$$E_{Vocm} = e^{\frac{V_{ocm}}{N_c n V_t}} - 1 \quad (10)$$

$$E_{Iccm} = e^{\frac{I_{ccm} R_{sm}}{N_c n V_t}} - 1 \quad (11)$$

$$E_{Pmax} = e^{\frac{V_{max} + I_{max} R_{sm}}{N_c n V_t}} - 1 \quad (12)$$

Método de obtención de la resistencia paralelo del módulo (R_{pm}), a partir de los datos del fabricante

El valor de la resistencia paralelo (R_{pm}), se obtiene evaluando en la ecuación (1), obtenida del circuito equivalente del módulo, los valores correspondientes con los datos del fabricante en el punto de máxima potencia (V_{max}, I_{max}), el que constituye un punto contenido en la característica *Volt-Ampere*. Después de realizarse la sustitución de los valores del punto de máxima potencia en la ecuación y despejando R_{pm} , se obtiene la ecuación (13), para su cálculo, quedando expresada en función de los restantes cuatro parámetros del circuito equivalente, $R_{pm} = f(I_{phm}, I_0, n, R_{sm})$.

$$R_{pm} = \frac{V_{max} + I_{max} R_{sm}}{I_{phm} - I_{max} - I_0 \left[e^{\frac{V_{max} + I_{max} R_{sm}}{N_c n V_t}} - 1 \right]} \quad (13)$$

Consideraciones sobre la potencia del módulo fotovoltaico

La potencia de salida del módulo se calcula a través de la ecuación (14), (ver fig.1).

$$P_m = V_m I_m \quad (14)$$

La figura 2.b, muestra la característica de $P_m = f(V_m)$, la curva solo contiene un máximo local, que coincide con el máximo global. Diferenciando la ecuación (14), respecto a la tensión, e igualando a cero se obtiene la ecuación (15), para la condición de máximo.

$$\frac{dP_m}{dV_m} = V_m \frac{dI_m}{dV_m} + I_m \frac{dV_m}{dV_m} = 0 \quad (15)$$

De la ecuación (15), se obtiene la conductancia del módulo fotovoltaico en el punto de máxima potencia mediante la ecuación (16).

$$\frac{dI_m}{dV_m} = -\frac{I_m}{V_m} = -\frac{I_{max}}{V_{max}} \quad (16)$$

Método de obtención de la pendiente de la característica *Volt-Ampere* del módulo fotovoltaico

La pendiente de la característica *Volt-Ampere* del módulo fotovoltaico, expresa la conductancia del módulo, se obtiene diferenciando la ecuación (1), respecto a la tensión del módulo, ecuación (17).

$$\frac{dI_m}{dV_m} = \frac{d \left\{ I_{phm} - I_0 \left[e^{\frac{V_m + I_m R_{sm}}{N_c n V_t}} - 1 \right] - \frac{V_m + I_m R_{sm}}{R_{pm}} \right\}}{dV_m} \quad (17)$$

El resultado de diferenciar la ecuación anterior se muestra en la ecuación (18).

$$\frac{dI_m}{dV_m} = - \frac{I_0 R_{pm} e^{\frac{V_m + I_m R_{sm}}{N_c n V_t}} + N_c n V_t}{N_c n V_t (R_{sm} + R_{pm}) + I_0 R_{sm} R_{pm} e^{\frac{V_m + I_m R_{sm}}{R_{pm}}}} \quad (18)$$

Para el caso particular en que $V_m = V_{max}$ e $I_m = I_{max}$, cuando se cumpla que $dI_m/dV_m = -(I_{max}/V_{max})$, se garantiza la pendiente que debe poseer la característica *Volt-Ampere* del módulo fotovoltaico en el punto de máxima potencia. Para este caso particular $dI_m/dV_m (V_{max}, I_{max}) = f(I_0, n, R_{sm}, R_{pm})$, cuatro de los parámetros del circuito equivalente.

Procedimiento de cálculo de I_{phm} , I_0 , n , R_{pm} y R_{sm}

El procedimiento de cálculo se realiza explorando el intervalo en que puede variar n . Para cada valor de n se asume inicialmente el valor de R_{sm} igual a cero ($R_{sm}=0$), y se calculan en el siguiente orden los restantes tres parámetros I_{phm} , I_0 y R_{pm} . Para cada valor de n se incrementa R_{sm} en un valor ΔR_{sm} , se va obteniendo el valor de la pendiente y se va calculando el error absoluto, mediante la ecuación (19), hasta lograr que el error sea menor a un error mínimo (E_{min}), definido por el usuario, cumpliendo esta condición quedan calculado para el valor n , los restantes cuatro parámetros del circuito equivalente.

$$E = \left| \frac{dI_m}{dV_m} (V_{max}, I_{max}) + \frac{I_{max}}{V_{max}} \right| \quad (19)$$

Así se calculan de manera sucesiva los valores de los parámetros del circuito equivalente, para cada nuevo valor de n , explorando el intervalo con un incremento de Δn , cada vez que se realiza un cálculo se compara el resultado del error absoluto, con el obtenido anteriormente, con el objetivo de que en caso que sea menor desechar los resultados anteriores y admitir como más precisos los valores recién calculados. De manera que al final de la exploración realizada se obtiene el mejor ajuste de la curva. Como el valor de n influye marcadamente en la forma de la curva, cada vez que se realiza un cálculo se tiene una forma diferente de la característica *Volt-Ampere*, y finalmente se obtiene el resultado de los parámetros de la curva más precisa. La figura 4, muestra el algoritmo de cálculo implementado.

Expresión de cálculo de I_{0x}

La ecuación (3), permite calcular el valor de I_{0x} , a la temperatura T_x , sin embargo hay referencias que difieren en la expresión de cálculo. La ecuación (20), se obtiene a partir del circuito equivalente del modelo, mediante la aplicación del teorema de *Tellegen* [20-22]. El valor se obtiene considerando el circuito equivalente del modelo bajo la condición nominal de circuito abierto y el propio circuito considerando la variación de la fotocorriente con la temperatura y la irradiancia y la tensión de circuito abierto con la temperatura, expresadas por las correspondientes ecuaciones (2) y (4). En la ecuación obtenida, la n y la x en los subíndices expresan el valor de las variables a la temperatura nominal y la de operación del módulo respectivamente.

$$I_{0x} = \frac{V_{ocm,n} I_{phm,x} - V_{ocm,x} I_{phm,n} + V_{ocm,x} I_{0n} \left[e^{\frac{V_{ocm,n}}{N_c n V_{tn}}} - 1 \right]}{V_{ocm,n} \left[e^{\frac{V_{ocm,x}}{N_c n V_{tx}}} - 1 \right]} \quad (20)$$

Validación de la metodología

El algoritmo de cálculo de los cinco parámetros del modelo se implementó en *Matlab*. El valor de Δn y ΔR_{sm} , se asumió igual a 0,01 y el valor de E_{min} se asumió igual a 10^{-5} . Los valores asumidos garantizan una elevada precisión de los cálculos. La metodología se comprobó con más de cien módulos fotovoltaicos de diferentes fabricantes y en todos los casos se obtuvieron excelentes resultados. Para ilustrar la validez de la metodología se comparan los resultados obtenidos mediante el modelo con los de la hoja de datos del módulo KC200GT, del fabricante *Kyocera* [23].

La tabla 2, muestra los datos ofrecidos por el fabricante en su hoja de datos y los obtenidos mediante el modelo propuesto, donde se aprecia que los valores coinciden con los del fabricante.

Tabla 2. Parámetros del módulo KC200GT y los obtenidos mediante el modelo

Parámetro	Datos del fabricante	Valores obtenidos con el modelo
I_{ccm}	8,21 A	8,21 A
V_{ocm}	32,9 V	32,9 V
I_{max}	7,61 A	7,61 A
V_{max}	26,3 V	26,3 V
P_{max}	200,43 W	200,43 W

Además, en la figura 5, se muestran, curvas de corriente en función de la tensión $I_m=f(V_m)$, obtenidas a diferentes irradiancias y temperaturas con los parámetros calculados mediante la metodología desarrollada, así como se adicionan puntos marcados en la figura mediante círculos, que representan puntos experimentales, extraídos de las curvas de la hoja de datos del fabricante [23]. Como se puede observar, para todos los casos, se obtienen magníficos resultados, los puntos experimentales se encuentran sobre las curvas obtenidas mediante el modelo propuesto.

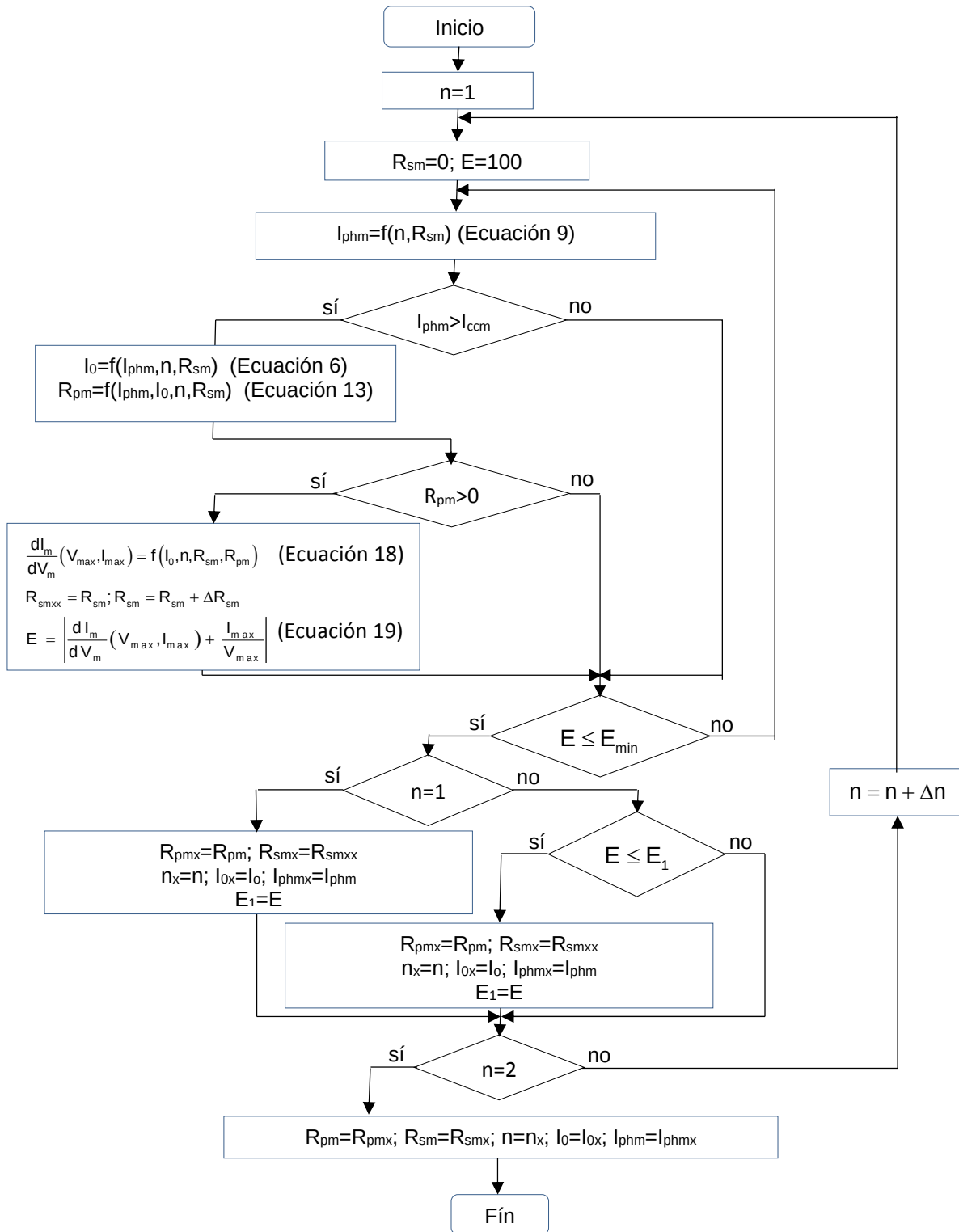


Fig. 4. Algoritmo de cálculo de los cinco parámetros del circuito equivalente.

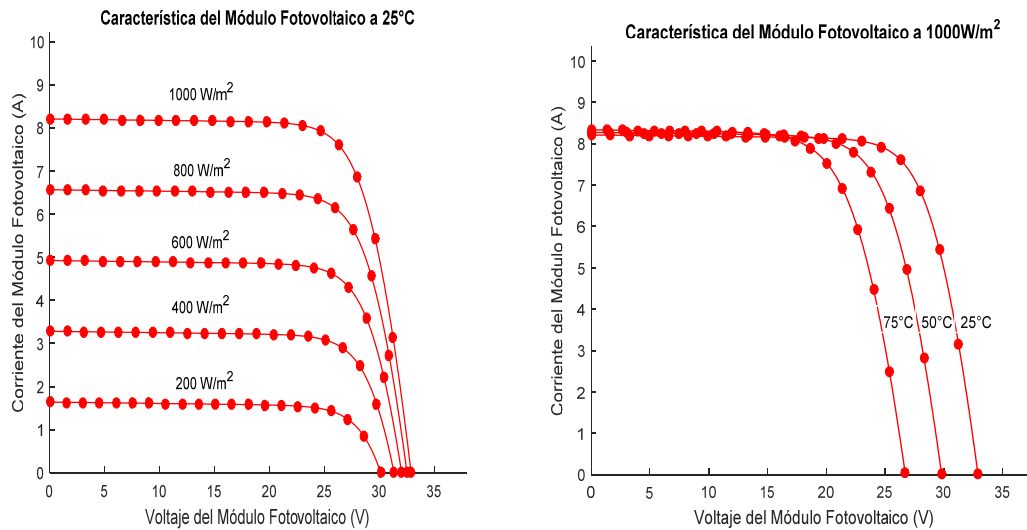


Fig. 5. Curvas del módulo fotovoltaico KC200GT a diferentes irradiancias y temperaturas.

CONCLUSIONES

Se desarrolló y validó una metodología que permite obtener de forma exacta los parámetros del circuito equivalente del módulo fotovoltaico a partir de los datos aportados por el fabricante en la hoja de datos de los módulos fotovoltaicos.

Los parámetros se obtienen a partir del circuito equivalente más tratado en la bibliografía por su exactitud y precisión. Sin embargo, este método presenta la ventaja de que para obtener cada uno de los parámetros del modelo, con las expresiones de cálculo y procedimientos propuestos, no se hacen consideraciones adicionales para realizar el cálculo de cada uno de los parámetros, lo que evita el detrimento de la precisión del modelo, además de que no se requiere de una elevada carga computacional para obtener los resultados.

La expresión propuesta para obtener la corriente de saturación inversa a temperatura no estándar (I_{0x}), se obtiene a partir del propio circuito equivalente del modelo propuesto y presenta la ventaja que permite obtener una mejor interrelación de las magnitudes eléctricas del circuito. Los datos requeridos para su cálculo, se obtienen a partir de los datos aportados por el fabricante en la hoja de datos de los módulos fotovoltaicos y el factor de idealidad calculado.

El artículo provee al lector de toda la información necesaria para obtener los cinco parámetros del modelo de simple diodo de manera exacta, así como de un conjunto de expresiones de cálculo de gran utilidad para proponer modelos de simulación dinámica del módulo y/o arreglo fotovoltaico.

REFERENCIAS

- [1] PETRONE, Geovani; RAMOS, Carlos. "Modeling of photovoltaic fields in mismatched conditions for energy yield evaluations". *Electric power systems research*. 2011, vol. 81, N° 4, p.1003-1013. ISSN: 0121-750X.DOI:10.1016/j.epsr.2010.12.008.
 - [2] BOGNING DONGUE, Sakanos; NJOMO, Donation; GASTON TAMBA, Jean; EBENGAIN, Lessly. "Modeling of electrical response of illuminated crystalline photovoltaic modules using four-and fives-parameter model". *International Journal of Emerging Technologic and Advanced Engineering*. 2012, Vol. 2, N° 11, p. 612-619. ISSN: 2250-2459.
 - [3] SALOUX, E; TEYSSÉDOU, A; SORIN, M. "Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point". *Solar Energy*. 2011, vol. 85, N° 5, p. 713-722. ISSN:2250-2449.DOI:10.1016/j.solener.2010.12.022.
 - [4] ISHAQUE, H; Salam, Z. "An improved modeling method to determine the model parameter of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE)". *Solar Energy*. 2011, vol. 85, N° 2, p. 2349-2359.ISSN:1569-190X.DOI:10.1016/j.solener.2010.12.022.
- Ingeniería Energética 2018, vol. 39, n. 1, p. 38-47, Enero/Abril, ISSN 1815 -5901

- 10.1016/j.solener.2011.06.025.
- [5] BONKOUNGOU, Dominique; KOALAGA, Zacharie; NJOMO, Donatien. "Modelling and simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in Matlab". *International journal of computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE)*. 2013, vol. 3, N° 3, p. 493-502. ISSN:2250-2459.
 - [6] BASIM, Alsayid. "Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell/Module/Array with Two-Diode Model". *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE)*. 2012, vol. 1, N° 3, p. 6-11. ISSN:2249-6343. Disponible en: http://www.ijctee.org/files/VOLUME2ISSUE3/IJCTEE_0612_02.pdf
 - [7] SHANNAN, Natha M.; YAHAYA, Nor Zaihar; SINGHA, Baldir; SALAM, Zainal; AHMED, Khalid Y. "Two-diode model for parameters extraction of photovoltaic module under temperature variation". *Electronics Express*. 2015, vol. 12, N° 19, p. 1-9. ISSN:0121-750X. DOI:10.1587/elex.12.20150492..
 - [8] HABBAT, Bellia; RAMDANI, Youcef; MOULAY, Fatima. "A detailed modeling of photovoltaic module using Matlab". *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2014, vol. 3, N° 3, p. 53-61. ISSN:2090-9977. DOI:10.1016/j.nrjag.2014..04.001.
 - [9] LINEYKIN, S. "Five-parameter model of photovoltaic cell based on STC data and dimensionless". *Electrical Engineering and Electronics*. 2012, vol. 12, N° 3, p. 1-5. ISBN:978-1-4673-4682-5. DOI:10.1109/IEEE.2012.6377079.
 - [10] ALGAHTANI, A.H. "A simplified and accurate photovoltaic module parameters extraction approach using Matlab". *Electrical Engineering*. 2012, vol. 7, N° 3, p. 1748-1753. ISSN:2163-5137. DOI:10.1109/ISIE.2012.6237355.
 - [11] SALMI, Tanak; BOUZGUENDA, Mounir; GASTLI, Adel; MASMOUDI; Ahmed. "Matlab/Simulink based modelling of solar photovoltaic cell". *International Journal of Renewable Energy Research*. 2012, vol. 2, N° 2, p. 213-218. ISSN:1309-0127. DOI:10.1234/ijrer.v2i2.157.
 - [12] GRADELLA VILLALVA, Marcelo; GAZOLI, Tomas R; Ruppert Filho, Ernesto. "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays". *IEEE Transactions on power electronics*. 2009, vol. 24, N° 5, p. 1998-1208. ISSN:0885-8993. DOI:10.1109/TPEL.2009.2013862.
 - [13] CUBAS, Javier; PINDADO, Santiago; Carlos Manuel. "Explicit expressions for solar panel equivalent circuit parameters based on analytical formulation and the lambert w-function". *Energies*. 2014, vol. 124, N° 7, p. 4098-4115. ISSN:4098-4115. DOI:10.3390/en7074098.
 - [14] PENG, L; SUN, Y; MENG, Z. "An improved model and parameters extraction for photovoltaic cells using only three state points at standard test condition". *Journal of Power Sources*. 2014, vol. 248, N° 7, p. 621-631. ISSN:4098-4115. DOI:10.1016/j.jpowsour.2013.07.058. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313012482>
 - [15] ORIOLI, A; DIGANGI, A. "A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data". *Energy*. 2013, vol. 102, N° 7, p. 1160-1177. ISSN:4098-4115. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.06.036.
 - [16] MA, J; TING, T; MAN, K.L; ZHANG, N; GUAN, S.U; WONG, P. "Parameter estimation of photovoltaic models via Cuckoo Search". *Journal of applied mathematics*. 2013, vol. 2013, N° 7, p. 1-8. ISSN: 4098-4115. DOI:10.1155/2013/362619.
 - [17] LINEYKIN, S; AVERBUKH, M; KUPERMAN, A. "An improved approach to extract the single-diode equivalent circuits parameters of a photovoltaic all panel". *Renewable sustain Energy*. 2014, vol. 30, N° 11, p. 282-289. ISSN:4098-4115. DOI:10.1016/j.rser.2013.10.015.
 - [18] COTFAS, D.T; COTFAS, P.A; KAPLANIS, S. "Methods to determine the DC parameters of solar cells". *Renewable sustain Energy*. 2013, vol. 28, N° 10, p. 558-596. ISSN:4098-4115. DOI:10.1016/j.rser.2013.08.017.
 - [19] BASTIDAS RODRIGUEZ, Juan David; RAMOS-PAJA, Carlos Andres; FRANCO MEJIAS, Edison. "Modeling and parameter calculation of photovoltaic field in irregular weather conditions". *Ingeniería*. 2012, vol. 17, N° 1, p. 37-48. ISSN:0121-750X. E-ISSN:2344-8393.
 - [20] TELLEGEN, Bernard. "A general network theorem, with applications". *Philips Res. Rept.* 1952, vol. 7, N° 1, p. 259-270. ISSN:2008-0302.
 - [21] PENFIELD, Jr.; SPENCE, Robert; DUINKES, S. "A generalized form of Tellegen's theorem ". *IEEE Transactions on Circuit Theory*. 1970, vol. 17, N° 3 p. 302-305. ISSN: 0018-9324. DOI: 10.1109/TCT.1970.1083145. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1083145/>
 - [22] PENFIELD, Jr.; SPENCE, R; DUINKES, S. *Tellegen's theorem and electrical network*. MIT press. Cambridge, 1970, Vol. XV, 143p, p. 2-137. Disponible en: <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:000003734>. ISBN 0262160323.
 - [23] KC200GT. Hight efficiency multicristal photovoltaic module [en línea]. Datasheet Kyocera. Disponible en Web: <http://www.kyocera.com.sg/products/solar/pdf/kc200gt.pdf>.