**TRANSMISION, DISTRIBUCION Y UTILIZACION DE LA ENERGIA ELECTRICA**

Metodología generalizada para el cálculo de parámetros de los módulos fotovoltaicos

Generalized methodology for the calculation of parameters of photovoltaic modules

**Rodolfo Manuel Arias Garcia1, Ignacio Pérez Abril2, Liliam Ochoa Fajardo3**

1-Empresa COPEXTEL.SA, División Villa Clara, Santa Clara, Cuba.

2- Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

3- Empresa COPEXTEL.SA, División Villa Clara, Santa Clara, Cuba.

**Resumen:**

En el trabajo se propone una metodología generalizada para calcular los parámetros del modelo de simple diodo con cinco parámetros y el de doble diodo con siete parámetros, a partir del circuito equivalente del módulo fotovoltaico. La principal contribución, de este trabajo, consiste en la propuesta de una novedosa metodología, que partiendo de un conjunto de ecuaciones exactas obtenidas del circuito equivalente y un simple proceso iterativo, permite determinar de manera exacta, sin realizar consideraciones, ni aproximaciones, los parámetros del circuito equivalente a través de los datos aportados por el fabricante en la hoja de datos de los módulos fotovoltaicos. Para validar la precisión de los resultados, se comparan datos y curvas experimentales obtenidas por el fabricante de un módulo comercial, así como resultados obtenidos en artículos precedentes, con los obtenidos mediante la metodología propuesta.

***Abstract:***

*In the work is proposed a generalized methodology to calculate the parameters of the simple diode model with five parameters and the double diode with seven parameters, from the equivalent circuit of the photovoltaic module. The main contribution, of this work, consists of the proposal of a novel methodology, which starting from a set of exact equations obtained from the equivalent circuit and a simple iterative process, allows to determine in an exact way, without making considerations, nor approximations, the parameters of the equivalent circuit through the data provided by the manufacturer in the data sheet of the photovoltaic modules. To validate the accuracy of the results, data and experimental curves obtained by the manufacturer of a commercial module are compared, as well as results obtained in previous articles, with those obtained by the proposed methodology.*

**Palabras Clave:** Módulo fotovoltaico; Modelo siete parámetros; Modelo doble diodo, Modelo simple diodo, Modelo dos diodo

***Keywords:*** *Photovoltaic module; Seven-parameter model; Double diode model; Simple diode model; Two diode model.*

1. **Introducción**

El impacto que en la actualidad están causando las fuentes tradicionales de energía, responsables del calentamiento global y los cambios climáticos, ha motivado la necesidad de reorientar el enfoque energético de la humanidad. Como consecuencia de ello, la producción de energías limpias no es una cultura o un intento de mejorar el medio ambiente, sino una necesidad a la que el ser humano se ha visto abocado, independientemente de su opinión, gustos o creencias. La energía solar constituye una fuente de energía limpia e inagotable. Entre las tecnologías que en la actualidad se expande de una manera vertiginosa se encuentra la fotovoltaica, por ser una tecnología que posibilita la generación de electricidad en cualquier parte del planeta [1,2].

La celda fotovoltaica es el dispositivo que realiza la conversión directa de la radiación solar en electricidad, utilizando las propiedades inherentes a los semiconductores [3]. Las celdas se agrupan, en las fábricas, para conformar los módulos fotovoltaicos comerciales. Estos a su vez se agrupan, por los proyectistas, en serie y/o paralelo para formar arreglos fotovoltaicos, conformándose así los denominados generadores fotovoltaicos [4]. El voltaje y la corriente disponible en los terminales de los módulos, pueden alimentar directamente cargas eléctricas de corriente directa. Aplicaciones más sofisticadas requieren de convertidores electrónicos, para procesar la energía eléctrica proveniente de los módulos fotovoltaicos [4]. Estos convertidores pueden ser utilizados para regular el voltaje y la corriente en las cargas, para controlar el flujo de potencia en los sistemas fotovoltaicos conectados a las redes eléctricas, y para el rastreo del punto de máxima potencia (MPPT), del generador fotovoltaico y así lograr una mayor eficiencia del sistema.

Como consecuencia del alto costo de inversión y la necesidad de realizar una utilización óptima de la energía solar, en sistemas fotovoltaicos, se requiere desde la etapa de diseño contar con simuladores que de una manera precisa, permitan estimar el comportamiento del sistema fotovoltaico antes de su instalación.

El modulo fotovoltaico, es el componente que más afecta la precisión de la simulación de un sistema fotovoltaico [5,6]. Muchas investigaciones se han realizado para perfeccionar el modelo del módulo fotovoltaico. El acercamiento más popular, considera la representación del modelo, mediante un circuito equivalente. Para modelar el comportamiento y las relaciones voltaje-corriente de los módulos, se han desarrollado dos modelos de circuitos eléctricos equivalentes, que ofrecen los mejores resultados al presentar un mayor acercamiento al comportamiento real de los módulos fotovoltaicos: El modelo de simple diodo con cinco parámetros y el modelo de doble diodo con siete parámetros [3,4].

El modelo de simple diodo, solo considera el proceso de difusión de portadores, a diferencia del modelo de doble diodo que incorpora el efecto de la corriente de pérdidas por recombinación en la región de deflexión, lo que permite elevar la precisión del modelo en las proximidades del voltaje de circuito abierto del módulo [3,6].

Tanto en un caso como en el otro, los parámetros del circuito equivalente se obtienen a partir de datos experimentales y curvas aportadas por el fabricante en la hoja de datos del módulo fotovoltaico. Sin embargo estos parámetros son difíciles de obtener y se complejizan al pasar del modelo de simple diodo, donde se requiere calcular cinco parámetros, al modelo de doble diodo donde se requiere calcular siete parámetros.

Numerosos métodos se han propuesto para obtener estos parámetros, se han propuesto métodos analíticos, métodos numéricos [4], técnica de inteligencia artificial, evolución diferencial [7,8], sistemas artificial inmune [9]. Sin embargo a pesar de la precisión de los métodos de cálculo, todos poseen un talón de Aquiles al realizar suposiciones y simplificaciones en la formulación de las ecuaciones que obtienen del circuito equivalente, y en muchos casos la carga computacional para el cálculo de los parámetros es elevada lo que va en detrimento de la precisión del modelo y en el incremento del tiempo de cálculo de los parámetros.

En el caso del modelo de simple diodo con cinco parámetros, entre las consideraciones más frecuentes se encuentran: se estima el factor de idealidad del diodo [4,9,10], se considera la fotocorriente igual a la corriente de cortocircuito [1,2,4,10,11,12,13,14,15,16], se desprecia la corriente de saturación inversa para el cálculo de la fotocorriente [2,4,17], y se desprecia la resistencia paralelo para calcular la corriente de saturación inversa [4,9,11,13]. En el caso del modelo de doble diodo con siete parámetros, se adicionan otras consideraciones, además de las realizadas en el caso del modelo de simple diodo con cinco parámetros. Entre ellas se encuentran: Los valores de las corrientes de saturación inversa de ambos diodos se consideran iguales [5,6,18,19], en contradicción con el bien conocido hecho de que la corriente de saturación inversa del diodo adicionado al modelo es de tres a siete veces mayor, que la del diodo que considera el proceso de difusión [5,18,20], varias investigaciones asumen los factores de idealidad de ambos diodos, el que modela las perdidas por difusión (n1=1), y el que modela las perdidas por recombinación (n2=2), basado en las aproximaciones de la recombinación *Schokley-Read-Hall*, en la región de deflexión del fotodiodo [5,6,21]. Esta suposición es ampliamente usada; pero no siempre se cumple [5]. Los valores de n1 y n2 se consideran 1 y mayor o igual que 1.2 respectivamente en [5,18,22], y se calcula la corriente de saturación inversa a través de una extensión del método tratado en [4], incurriendo además en las aproximaciones tratadas en [4]. Adicionalmente para el cálculo de los parámetros utiliza un método iterativo y un método numérico, lo que alarga los tiempos de cómputo para el cálculo de los parámetros. En [23] el factor de idealidad del diodo, para celdas multicristalinas y celdas de película fina se calcula considerando n1+n2=3 y para celdas de silicio amorfo considerando n1+n2=4.

En este trabajo, a partir del circuito equivalente de doble diodo, aplicando la teoría de circuitos, se obtienen las ecuaciones exactas, que permiten calcular mediante un proceso iterativo, sin realizar aproximaciones, ni consideraciones los siete parámetros del circuito equivalente, haciendo uso de los datos aportados por el fabricante en la hoja de datos de sus módulos fotovoltaicos. Además, a partir de las ecuaciones obtenidas se generaliza la metodología para obtener los parámetros del modelo de simple diodo con cinco parámetros, como caso particular del modelo de doble diodo.

1. **Metodología**

# **Calculo de los parámetros del modelo de doble diodo del módulo fotovoltaico**

La Figura 1 muestra el circuito equivalente del modelo generalizado del módulo fotovoltaico. Cuando el interruptor S1, se encuentra cerrado el modelo corresponde con el de doble diodo con siete parámetros, y cuando se encuentra abierto, el modelo se corresponde con el de simple diodo con cinco parámetros. *Iph*, en (A), representa la fotocorriente del módulo fotovoltaico, *ID1*, en (A), es la corriente que circula a través del diodo D1, que considera el proceso de difusión, *ID2*, en (A), es la corriente que circula a través del diodo D2, que considera el proceso de recombinación, *Ip*, en (A), es la corriente que circula por la resistencia paralelo *Rp*, *Im*, en (A), es la corriente que circula por la resistencia serie *Rs* y la resistencia equivalente de la carga eléctrica conectada al módulo, y *Vm*, en (V), representa el voltaje de salida del módulo fotovoltaico.



Figura 1.Circuito equivalente del modelo generalizado del módulo fotovoltaico.

 Fuente: Elaboración propia.

Aplicando las leyes de *Kirchoff* y utilizando el modelo matemático del diodo *Schockley*, para representar la corriente de los correspondientes diodos [14], la característica voltaje–corriente (*Im=f(Vm)*), del circuito queda expresada mediante la ec. (1).

 (1)

Donde, *Io1* e *Io2* son las corrientes de saturación inversa del diodo D1 y D2 respectivamente, *Nc*, es el número de celda del módulo fotovoltaico, *n1* y *n2* los factores de idealidad del diodo D1 y D2 respectivamente. Estos factores poseen una marcada incidencia en la forma que adopta la característica *Im=f(Vm)* [4]. Para el caso del modelo de simple diodo con cinco parámetros, el valor de *n1* para celdas de silicio se encuentra en valores comprendidos en el intervalo 1≤ *n1*≤ 2 [4]. Para el caso del modelo de doble diodo con siete parámetros existen diferentes criterios: En [5,18,22], *n1* se considera igual a uno (*n1*=1) y *n2* se considera mayor o igual a 1.2 (*n2*=1.2), en [23] para celdas multicristalinas y celdas de película fina, se considera *n1*+*n2*=3, y para celdas de silicio amorfo *n1*+*n2*=4. En la metodología propuesta, el factor o los factores de idealidad se calculan de conjunto con el resto de los parámetros, garantizando el mejor ajuste de la característica *Im=f(Vm)*. En el caso del modelo de simple diodo con cinco parámetros se calcula explorando el intervalo propuesto en [4]. En el caso del modelo de doble diodo con siete parámetros se calcula, *n1* explorando el intervalo 1≤ *n1*≤ 1.2 y *n2* explorando el intervalo 1.2≤ *n2*≤ 2. Finalmente *Vt1* y *Vt2* representan el voltaje térmico de cada uno de los correspondientes diodos, que dependen de la temperatura de la celda *T*(K), la constante de *Bolzman* (K=1.3806503x10-23 J/K), y de la carga del electrón (q=1.60217646x10-19 C). La dependencia de *Vt* de estos parámetros, para cada caso, se expresa como *Vt*= K*T*/q.

En la condición en la que el interruptor S1 de la figura 1 se encuentra abierto, el tercer término de la ec. (1) no existe y la ecuación se reduce a la del modelo de simple diodo con cinco parámetros desconocidos *Iph*,*Rs*, *Rp*, *Io1*, *n1*. Cuando el interruptor S1 se encuentra cerrado, la ec. (1) representa al modelo de doble diodo con siete parámetros, a la que se adicionan otros dos parámetros desconocidos *Io2*y *n2*. Tanto para un caso como para el otro, la formulación de las ecuaciones permite determinar el valor de los parámetros desconocidos a partir de los datos aportados por el fabricante, en condiciones estándar, en la hoja de datos de los módulos. Estos datos representan tres puntos de la característica *Im=f(Vm)*: el punto de cortocircuito (0,Icc), el de circuito abierto (Voc,0) y el de máxima potencia (Vmax,Imax). Los datos de estos tres puntos corresponden a condiciones estándar de irradiancia de 1000 W/m2, temperatura de la celda de 25 ºC, y una masa de aire de 1.5 (AM=1.5) [4].

## **Método de cálculo de las corrientes *Iphn, Io1n, Io2n* a partir de las condiciones estándar**

Para el caso de los tres puntos de las condiciones estándar se pueden plantear los tres circuitos que aparecen en la Figura 2. El valor de cada una de las magnitudes eléctricas, para cada una de la condiciones, aparecen en la Tabla 1.



Figura 2.Circuito equivalente, del modelo de doble diodo, para condiciones estándar.

 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1

Valores de las magnitudes eléctricas en condiciones estándar

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parameter | Open circuitcondition | Short circuitcondition | Maximum powercondition |
|  |  |  |  |

Fuente: Elaboración propia.

Donde *EVoc1*, *EVoc2*, *EIcc1*, *EIcc2*, *EPmax1* y *EPmax2*, se determinan mediante las ec. (2)-(7).

 (2)

 (3)

 (4)

 (5)

 (6)

 (7)

El teorema de *Tellegen* [24], 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 *I1ˈ, I2ˈ,…, Imˈ*, son las corrientes de rama de una red *Nˈ* de *m* ramas y *V1ˈˈ, V2ˈˈ, … , Vmˈˈ*, son los voltajes de rama de una red *Nˈˈ* de *m* ramas, se cumple la condición planteada en la ec. (8).

 y (8)

Aplicando el teorema a los circuitos de la figura 2, se puede formular un sistema de ecuaciones de tres ecuaciones, que permite calcular los valores de las corrientes. La ec. (9) muestra la ecuación matricial utilizada para el cálculo de las corrientes, donde **I**=*f(n1,n2,Rs)*.

(9)

Donde:

(10)

(11)

(12)

## **2.1.2. Método de cálculo de la resistencia *Rp*, a partir de las condiciones estándar**

El valor de la resistencia *Rp* se obtiene evaluando en la ec. (1), los datos del fabricante en el punto de máxima potencia. Después de realizada la sustitución de estos valores y despejando *Rp*, se obtiene para su cálculo la ec. (13), quedando expresada en función de seis parámetros del circuito equivalente, *Rp*=*f(Iphn, Io1n,Io2n,n1,n2,Rs)*.

 (13)

## **2.1.3. Método de cálculo de la pendiente de la característica voltaje-corriente del módulo fotovoltaico**

En condiciones estándar la curva de potencia del módulo fotovoltaico, solo contiene un máximo local, que coincide con el máximo global. El punto de máxima potencia se encuentra, en el punto donde se cumple que *dIm*/*dVm*=-(*Imax*/*Vmax*) [12,17]. Diferenciando la ec. (1), se obtiene la ec. (14).

 (14)

Para la condición en que *Vm*=Vmax e *Im*=Imax, cuando se cumple que *dIm*/*dVm* (Vmax, Imax)=-(*Imax*/*Vmax*), se garantiza la pendiente que tiene la característica voltaje-corriente en el punto de máxima potencia. Para este caso particular la derivada *dIm*/*dVm* (Vmax, Imax)=*f*(*Io1n, Io2n, n1, n2, Rs, Rp*).

**2.1.4. Procedimiento de cálculo de *Iphn, Io1n, Io2n, n1, n2, Rs, Rp***

El procedimiento de cálculo se realiza explorando los intervalos en que varían los factores de idealidad *n1* (1≤ *n1*≤ 1.2) y *n2* (1.2≤ *n2*≤ 2). Para cada combinación de valores de *n1* y *n2*, asumiendo inicialmente el valor de *Rs* igual a cero (*Rs*=0), se calculan los valores del vector **I,** y posteriormente *Rp*. Para cada combinación de valores, de *n1* y *n2*, se incrementa *Rs* en un valor Δ*Rs* y se va calculando el valor de la pendiente, mediante ec. (14), y el signo del error *E* y el error absoluto *Eabs* mediante la ec. (15) y ec. (16) respectivamente. Cuando el signo del error *E* sea negativo, para la combinación de *n1* y *n2* quedan calculado los parámetros del circuito equivalente.

 (15)

 (16)



Figura 3. Algoritmo de cálculo simplificado, del procedimiento de cálculo, de los parámetros.

 Fuente: Elaboración propia.

Así se calculan de manera sucesiva, mediante un proceso iterativo, los parámetros del circuito equivalente, para cada nueva combinación de valores de *n1* y *n2*, explorando el intervalo con un incremento Δ*n1* y Δ*n2* respectivamente. Cada vez que se realiza un cálculo se compara el valor del error absoluto calculado, con el almacenado, con el objetivo de que en caso que sea menor desechar los resultados almacenados y almacenar los recién calculados como valores más precisos. De esta manera al concluir la exploración realizada, para las combinaciones posibles de *n1* y *n2*, quedan calculados los parámetros del circuito equivalente que garantizan el mejor ajuste y la mejor forma de la curva voltaje–corriente, por la implicación que tiene *n1* y *n2* en su forma [4]. La Figura 3 muestra un algoritmo simplificado del procedimiento de cálculo de los parámetros.

# **Ecuaciones de cálculo de *Iphx*, *Io1x*, *Io2x* y *Vocx*  en condiciones reales de operación**

Es poco probable el trabajo del módulo fotovoltaico en condiciones estándar. Las magnitudes eléctricas de ec. (1), son dependientes de la variación de la radiación y la temperatura. La fotocorriente (*Iph*) posee elevada dependencia de la irradiancia y en menor medida de la temperatura. La corriente de saturación inversa *Io1* e *Io2* de los respectivos diodos D1 y D2, así como el voltaje de circuito abierto *Voc*, poseen una elevada dependencia de la temperatura. A efecto de los cálculos para condiciones de operación real, el valor de las magnitudes eléctricas *Iphx*, *Io1x*, *Io2x*, y *Vocx*, se obtienen mediante las ecuaciones ec. (17) – (20) respectivamente [2,11,13,16].

 (17)

 (18)

 (19)

 (20)

Donde, Δ*T*=*Tx*-*Tn* (*Tx* y *Tn*, en K, son las temperatura de la celda en condiciones real y estándar respectivamente), *Ki* (A/K), representa el factor de variación de la fotocorriente con la temperatura, *Kv* (V/K), representa el factor de variación del voltaje de circuito abierto con la temperatura, *Gx* y *Gn* (W/m2), representan las correspondientes irradiancias en condiciones reales y estándar. *Eg* es la energía de activación de la banda prohibida del semiconductor, para el silicio cristalino *Eg*=1.12 eV y para el silicio amorfo *Eg*=1.7 eV [25]. *Vocx* y *Vocn*, en V, son los respectivos voltajes de circuito abierto en condiciones reales y en condiciones estándar.

##  **Método de cálculo de *Io1x* a través del circuito equivalente**

La ec. (18) y ec. (19), representan las ecuaciones de cálculo de las corrientes de saturación inversa en condiciones reales de operación. Sin embargo hay referencias que difieren de estas ecuaciones. La referencia [26] afecta el correspondiente exponente de la relación de temperatura, por el correspondiente factor de idealidad del diodo (*Tn*/*Tx*)3/n . Es frecuente encontrar referencias donde el numerador y el denominador de la relación de temperaturas aparecen invertidas: (*Tn*/*Tx*)3 [4,5,6,23,26] y (*Tx*/*Tn*)3 [2,11,13,16,23,27]. Además estas ecuaciones no están directamente relacionadas con las magnitudes eléctricas del circuito equivalente.

Para hacer independiente, de las diferencias entre las referencias en las formulaciones de la ec. (18) y ec. (19), dividiendo ambas ecuaciones y despejando *Io2x*, se obtiene al ec. (21), para su cálculo.

 (21)

Donde:

 (22)

El cálculo de *Io1x* se realiza a partir del circuito equivalente aplicando el teorema de *Tellegen* [24]. Considerando el circuito equivalente del modelo en la condición estándar de circuito abierto y el propio circuito en condición de circuito abierto considerando la variación de la temperatura a un valor *Tx*, aplicando el teorema y utilizando las ec. (17), ec. (20) y ec. (21), se obtiene ec. (23), que permite calcular de manera exacta la magnitud de la corriente *Io1x*.

 (23)

#  **Calculo de los parámetros del modelo de simple diodo del módulo fotovoltaico**

Cuando el interruptor S1 se encuentra abierto en el circuito de la figura 1, el diodo D2 se encuentra desconectado y el circuito equivalente se reduce al del modelo de simple diodo con cinco parámetros. La metodología descrita anteriormente es general y permite obtener los cinco parámetros del modelo (*Iphn*, *Io1n*, *n1*, *Rp*, *Rs*), así como la característica voltaje-corriente de circuito equivalente. Como *ID2*=0, el tercer término de ec. (1) es igual a cero y la ecuación se reduce a la ecuación del modelo de simple diodo con cinco parámetros.

El cálculo de las corrientes *Iphn* e *Io1n*, se realiza a partir de la ec. (9), donde: el vector **I**, ec. (10), se reduce a un vector de solo dos filas, al ser *I*(2,1)= *Io2n*=0. Haciendo uso del algebra matricial se puede llegar a la conclusión que para calcular el vector **I**, en estas condiciones, eliminando en la matriz **V** de ec. (12) la columna 2 y eliminando en el vector **P** de la ec. (11) y en la matriz **V,** cualquiera de las filas, se puede formular el sistema de ecuaciones que permite calcular las corrientes *Iphn* e *Io1n*. Para calcular el valor de *Rp*y la pendiente de la característica voltaje-corriente, haciendo *Io2n*=0 en la ec. (13) y la ec. (14), las ecuaciones se reducen a las del modelo de simple diodo. Una vez realizada las simplificaciones descritas, el procedimiento de cálculo de los cinco parámetros se realiza, siguiendo el procedimiento descrito en el *epígrafe 2.1.4* y mediante el algoritmo propuesto en la Figura 3, donde se eliminan las dependencias de las ecuaciones de *Io2n* y *n2*, se elimina el lazo iterativo de *n2*, y el criterio de parada del lazo de *n1* se ajusta al intervalo (1≤ *n1*≤ 2), propuesto en [4]. Con estos simples ajustes en las ecuaciones y en el algoritmo propuesto, se puede pasar de las ecuaciones de cálculo de los siete parámetros del modelo de doble diodo, a las ecuaciones de cálculo de los cinco parámetros del modelo de simple diodo.

La ventaja del modelo consiste en que al eliminar el lazo de *n2* en el algoritmo, el tiempo de cálculo de los parámetros se reduce; pero el modelo es menos preciso que el de doble diodo, en una mayor medida en las proximidades del voltaje de circuito abierto, siendo más pronunciado el efecto en la medida que la fotocorriente disminuye.

##  **Método de cálculo de *Io1x* a partir del circuito equivalente**

El cálculo de *Io1x* se realiza a través de ec. (23). Haciendo *Io2n*=0 en ec. (23), ec. (23) se reduce a una ecuación que permite calcular, de manera exacta, el valor de *Io1x.*

**3. Resultados y discusión**

La metodología de cálculo propuesta, se implementó en *Matlab*. El valor de Δ*n1,* Δ*n2* se asumieron igual a 0.01, y Δ*Rs* igual a 10-4, valores que garantizan elevada precisión en los cálculos. La metodología se comprobó con varios módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologías de fabricación, en todos los casos se obtuvieron excelentes resultados. Para ilustrar la validez y precisión de la metodología, se comparan los resultados obtenidos mediante el modelo con los de la hoja de datos del módulo fotovoltaico KC200GT, del fabricante *Kyocera* [28] y con los resultados obtenidos para este módulo en [9,18,21,23].

La Tabla 2 muestra los datos del fabricante en condiciones estándar y a la temperatura nominal de operación de la celda (NOCT), así como los resultados obtenidos con la metodología propuesta para el cálculo de los parámetros del modelo de simple y doble diodo, donde se puede observar la precisión de los resultados obtenidos.

Tabla 2

Datos del fabricante del módulo KC200GT y resultados obtenidos con la metodología propuesta.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Parameter | StandardManufacturer simple diode double diode model model | NOCTManufacturer simple diode double diode model model |
| Pmax (W) Vmax  (V)Imax (A)Voc (V)Icc  (A) | 20026.37.6132.98.21 |  200.1 26.3 7.61 32.9 8.21 | 200.126.37.6132.98.21 | 14223.26.1329.96.62 |  142 23.2 6.13 29.9 6.62 | 14223.26.1329.96.62 |

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4, aparecen las características voltaje-corriente obtenidas, mediante la metodología propuesta y las especificaciones de la hoja de datos del fabricante aparecen representadas mediante cuadros, acompañados de sus respectivos valores. De igual forma se puede apreciar, de forma gráfica, la exactitud de los resultados obtenidos.



1. Modelo de simple diodo b) Modelo de doble diodo

Figura 4. Curvas obtenidas mediante el modelo y puntos experimentales del módulo KC200GT, en condiciones estándar y en el NOCT.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra curvas voltaje-corriente, obtenidas a diferentes irradiancias y temperaturas, con los parámetros calculados mediante el modelo de doble diodo con siete parámetros. Los círculos representan puntos experimentales extraídos de las curvas de la hoja de datos del fabricante [28]. Se puede observar que en todos los casos se obtienen excelentes resultados, los puntos experimentales se encuentran sobre las curvas obtenidas mediante el modelo propuesto. Lo anterior evidencia: la validez de la metodología propuesta para obtener los parámetros del circuito equivalente, y la precisión y exactitud de las ecuaciones obtenidas para modelar el módulo fotovoltaico.



 a) Temperature of 25ºC b) Irradiance of 1000W/m2

Figura 5.Curvas obtenidas mediante la metodología y puntos experimentales extraídos de la hoja de datos del módulo KC200GT, a diferentes irradiancias y temperaturas.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6 se muestran las características *Im=f(Vm)*, obtenidas mediante la metodología propuesta, para ambos modelos. Las curvas del modelo de doble diodo se muestran en trazos continuos y las del modelo de simple diodo se muestran en trazos discontinuos. Se puede observar como el modelo de doble diodo es más preciso que el de simple diodo en la medida que la radiación disminuye, haciéndose más impreciso el modelo de simple diodo en las proximidades del voltaje de circuito abierto para radiaciones inferiores a los 800W/m2.



Figura 6. Curvas del módulo KC200GT, a diferentes irradiancias, para comparar ambos modelos.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3 aparecen los resultados de los parámetros calculados, del módulo KC200GT, mediante la metodología propuesta en [9,18,21,23] y los obtenidos mediante la metodología propuesta, en este trabajo, para el caso del modelo de doble diodo. Además se ha adicionado en cada caso el valor de la fotocorriente de referencia (*Iphref*).

Tabla 3

Valores de los parámetros del modelo de doble diodo según la metodología propuesta en cada referencia.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Parameter | Reference[9] | Reference [18] | Reference [21] | Reference [23] | ProposedMethod |
| *Iph* (A)*Io1* (A)*Io2* (A)*Rs* (Ω)*Rp* (Ω) *n1* *n2**Iphref* (A) | 8.211.11 10-81.87 10-100.303343.101.218.21 | 8.214.218 10-104.218 10-100.32160.51≥ 1.28.21 | 8.213.9878 10-101.0329 10-90.34179.4992128.21 | 8.22374.1437 10-101.9032 10-60.3305196.51.00031.99978.2237 | 8.22222.2446 10-94.2008 10-90.3045196.88961.081.328.2222 |

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de los parámetros desconocidos en el circuito equivalente, se calculan a partir de los datos aportados por el fabricante en la hoja de datos, en condiciones estándar [4]. En la condición estándar, la fotocorriente generada por el módulo fotovoltaico tiene un valor constante, para cualquier condición impuesta por la carga eléctrica conectada al módulo. Una forma fácil de comparar los errores de los parámetros obtenidos por las metodologías propuestas, es sustituyendo los valores de los parámetros calculados en el circuito equivalente del modelo, aplicar las leyes de *Kirchoff*, considerando las tres condiciones estándar, obtener en cada caso el valor de la fotocorriente (*Iphcal*), y calcular el error relativo. El error relativo (*Erel*), en %, se calcula mediante la ec. (24). En la Tabla 4 se muestra el error relativo calculado en cada metodología propuesta para cada una de las condiciones estándar.

 (24)

Tabla 4

Valor de los errores relativos en (%) para cada condición, según referencia.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Condition | Reference[9] | Reference [18] | Reference [21] | Reference [23] | ProposedMethod |
| Open circuitMaximum powerShort circuit | 0.81210.2692 -0.0883 | -7.8864-0.1658-0.1994 |  0.0023 -0.0661 -0.1894 | -6.0222-0.3720-0.0014 | -0.0750-0.0663-0.0060 |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4 muestra la elevada precisión de los resultados obtenidos en el cálculo de los parámetros del circuito equivalente mediante la metodología propuesta. El error relativo, en todos los casos, es inferior a 0.08%, como consecuencia de obtener los parámetros del circuito equivalente mediante un procedimiento que tiene como punto de partida, un conjunto de ecuaciones exactas obtenidas del circuito equivalente, que garantizan un correcto balance de potencia en el circuito. En [18,23], para la condición de circuito abierto el error relativo se encuentra en el orden de 6% y 8% respectivamente, incide en estos resultados calcular la corriente de saturación inversa de ambos diodos, despreciando la resistencia paralelo. Esto provoca que en la vecindad del voltaje de circuito abierto, los cálculos realizados mediante estos modelos posean errores. En [9,21] existen condiciones en los que el error relativo es positivo, esto significa que la fotocorriente calculada es inferior a la corriente de cortocircuito, lo que altera significativamente el balance de potencia del circuito.

**4. Conclusiones**

Se desarrolló y validó una metodología generalizada, que permite obtener de forma exacta los parámetros del circuito equivalente del modelo de simple y doble diodo, a partir de los datos aportados por los fabricantes en la hoja de datos de los módulos fotovoltaicos, sin realizar aproximaciones ni consideraciones en las formulaciones y el procedimiento de cálculo.

La ecuación propuesta para obtener la corriente de saturación inversa, *Io1x*, en condiciones reales de operación es una ecuación exacta fácil de evaluar, obtenida a partir del circuito equivalente y presenta la ventaja de lograr un balance de potencia exacto en el circuito equivalente, bajo cualquier condición de operación del módulo fotovoltaico, incidiendo significativamente en los resultados.

El trabajo posee toda la información necesaria para obtener de forma exacta los parámetros del modelo de simple y doble diodo, así como contiene un conjunto de ecuaciones de gran utilidad para proponer modelos generalizados de simulación dinámica del módulo y/o arreglo fotovoltaico.

**5. Referencias bibliográficas**

 [1] S.B. Dongue, D. Njomo, J.G. Tamba, L. Ebengai, Modeling Of Electrical Response of Illuminated Crystalline Photovoltaic Modules Using Four-And Five-Parameters Models. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETAE), 2(11), 2012, pp. 612-619.

 [2] J. Cubas, S. Pindado, C. Manuel, Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function. Energies, 2014(7), 2014, pp. 4098-4115. DOI: 10.3390/en7074098.

 [3] A. Yahya-Khotbehsara, A. Shahhoseini, A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach, Solar Energy, 162,2018, pp. 403-409. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.047>.

 [4] M.G. Villalva, J.R. Gonzali, E.R. Filho, Comprehensive approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, 24(5), 2009, pp. 1198-1208. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2013862.

 [5] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model, Simulation Modelling Practice and Theory, 19, 2011, pp. 1613-1626. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.04.005.

 [6] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model, Journal of Power Electronics, 2(11), 2011, pp. 179-187.

 [7] V.J. Chin, Z. Salam, K. Ishaque, An accurate modelling of the two-diode model of PV module using a hybrid solution based on differential evolution, Energy Conversion and Management, 124, 2016, pp. 42-50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.076>.

 [8] C. Saha, N. Agbu, R. Jinks, M.N. Huda, Review article of the solar PV parameters estimation using evolutionary algorithms, MOj Solar and Photoenergy Systems, 2(2), 2018, pp. 66-78. DOI: 10.15406/mojsp.2018.02.00026.

 [9] B. Jacob, K. Balasubramanian, S. Babu, S.M. Azharuddin, N. Rajasekar, Solar PV modelling and Parameter Extraction using Artificial Immune System, Energy Procedia, 75, 2015, pp. 331-336.

 [10] J. Ma, K.L. Man, T.O. Ting, N. Zhang, S.U. Guan, P.W.H. Wong, Approximate Single-Diode Photovoltaic Model for Efficient I-V Characteristics Estimation. The Scientific World Journal, 2013, 2013, pp. 1-7. DOI: org/10.1155/2013/230471.

 [11] H. Bellia, R. Youcef, M. Fatima, A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 3(2014), 2014, pp. 53-61. DOI: org/10.1016/j.nrjag.2014.04.001.

 [12]A.A. El Tayyan, PV system behavior based on datasheet. Journal of Electron Devices, 9(1), 2011, pp. 335-341.

 [13] J.D. Bastidas, C.A. Ramos, E. Franco, Modeling and parameter calculation of photovoltaic field in irregular weather conditions. Ingeniería, 17(1), 2012, pp. 37-48.

 [14] D. Bonkoungou, Z. Koalaga, D. Njomo, Modelling and simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB. International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE), 3(3), 2013, pp. 493-502.

[15] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, A. Masmoundi, MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. International Journal of Renewable Energy Research, 2(2), 2012, pp. 213-218.

[16] J. Ma, T.O. Ting, K.L. Man, N. Zhang, S.U. Guan, P.W.H. Wong, Parameter Estimation of Photovoltaic Models Via Cuckoo Search. Journal of Applied Mathematics, 2013(1), 2013, pp. 1-8. DOI: org/10.1155/2013/362619.

[17] M.A. Mohamed, Osman, M.H. Osman, Evaluation of a PV Model Based on a Novel Parameter Estimation Procedure for Different Manufacturers Module. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 3(1), 2014, pp. 1-7.

[18] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules, Solar Energy Materials & Solar Cells,95 , 2011, pp. 586-594. DOI:10.1016/j-solmat.2010.09.023.

[19] N.M. Shannan, N.Z. Yahaya, B. Singha, Z. Salam, K.Y. Ahmed, Two- diode model for parameters extraction of photovoltaic module under temperature variation, Electronics Express, 12(19), 2015, pp. 1-9. DOI: 10.1587/elex.12.2015.0492.

[20] V.J. Chin, Z. Salam, K. Ishaque, Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review, Applied Energy, 154, 2015, pp. 500-519. <http://dx.doi.org/10.2016/j.apenergy.2015.05.035>.

[21] R.S. Sangeetha, M.V. Jayan, M. Pradish, An improved Technique for Predicting Characteristics of Two-diode Based PV Model, Energy Procedia (ELSEVIER),117,2017, pp. 870-877. DOI:10.1016/j.egypro.2017.05.205.

[22] T. Ahmad, S. Sobhan, Md.F. nayan, Comparative Analysis between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell: Concentrate Different Parameters Effect on Its Efficiency, Journal of Power and Energy Engineering, 4, 2016, pp. 31-46. <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2016.43004>.

[23]A.A. Elbaset, H. Ali, M. Abd-El Sattar, Novel seven-parameter model for photovoltaic modules, Solar Energy Materials & Solar Cell, 130, 2014, pp. 442-455. <http://dx.doi.org/10.2016/j.solmat.2014.07.016>.

[24] J. Penfield, R. Spence, S. Duinkes, A generalized form of Tellegenʾs theorem. IEEE Transaction on Circuit Theory, 17(3), 1970, pp.302-305. DOI:10.1109/TCT.1970.1083145.

[25] E. Lorenzo, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Cap.20, Energy Collected and Delivered by PV Modules, 2005, pp. 905-969.

[26]V. Tamrakar, S.C. Guppa, Y. Sawle, Single-Diode and Two-Diode PV Cell Modeling Using Matlab for Studying Characteristics of Solar Cell under Varying Conditions, Electrical & Computer Engineering: An international Journal (ECIT), 4(2), 2015, pp. 67-77. DOI: 10.14810/ecij.2015.4207.

[27] R. Dash, S.M. Ali, Comparative Study of One and Two diode model of Solar Photovoltaic Cell, International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), 3(10), 2014, pp. 189-194.

[28] KC200GT. High efficiency multicristal photovoltaic module, Datasheet Kyocera. <http://www.kyocera.com.sg/products/solar/pdf/kc200gt.pdf>.