

Optimized Parameter Extraction Method for Photovoltaic Devices Model

M. P. Cervellini, N. I. Echeverría, P. D. Antoszczuk, R. A. G. Retegui, M. A. Funes, *Member, IEEE*, S. A. González, *Member, IEEE*

Abstract— A model that accurately reproduces the electrical behavior of photovoltaic (PV) devices becomes relevant, not only for cell, panel, array and system simulation, but also as an analysis tool that provides an insight of the internal physical mechanisms of PV devices. Consequently, a method based on genetic algorithms is proposed in this paper to obtain the parameters of the one-diode model of PV cells. The proposed method is applicable to I-V curves at several irradiation and temperature levels. Moreover, it simplifies the computation by adjusting the real data to the modeled one, without solving the transcendental equation that describes the current-voltage (I-V) characteristic. Additionally, the presented method combines two approaches; on the one hand, one that relies on the use of fitting algorithms that minimize the error for the entire set of data, and on the other, one that seeks minimization in selected I-V points (open-circuit, short-circuit and maximum power points). In order to verify the validity of the method, an I-V curve is obtained out of the parameters previously determined and later compared with that offered by the panel manufacturer.

Keywords— Genetic Algorithms, Parameter Extraction, PV Devices.

I. INTRODUCCIÓN

LOS DISPOSITIVOS fotovoltaicos se han convertido en una de las estrategias más populares para aprovechar el recurso solar. Esto es debido a que, además de convertir energía de una fuente inagotable en energía eléctrica, pueden ser utilizados para generación centralizada o distribuida, siendo aptos tanto para aplicaciones terrestres (locaciones urbanas y rurales) como para aplicaciones espaciales [1].

Este trabajo fue soportado por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), Argentina, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET) proyecto PIP 0210, Argentina, el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MINCYT), Argentina y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT), Argentina.

M. P. Cervellini, Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE), UNMDP, CONICET, Facultad de Ingeniería, 7600 Mar del Plata, Argentina, paulacervellini@fi.mdp.edu.ar

N. I. Echeverría, Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE), UNMDP, CONICET, Facultad de Ingeniería, 7600 Mar del Plata, Argentina, noelia.echeverria@fi.mdp.edu.ar

P. D. Antoszczuk, Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE), UNMDP, CONICET, Facultad de Ingeniería, 7600 Mar del Plata, Argentina, pablo_ant@fi.mdp.edu.ar

R. A. G. Retegui, Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE), UNMDP, CONICET, Facultad de Ingeniería, 7600 Mar del Plata, Argentina, rgarcia@fi.mdp.edu.ar

M. A. Funes, Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE), UNMDP, CONICET, Facultad de Ingeniería, 7600 Mar del Plata, Argentina, mfunes@fi.mdp.edu.ar

S. A. González, Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE), UNMDP, CONICET, Facultad de Ingeniería, 7600 Mar del Plata, Argentina, sagonzal@fi.mdp.edu.ar

Un aspecto de gran interés en lo que respecta a los dispositivos solares, es el análisis y estimación de su desempeño. Este desempeño depende mayormente de la disponibilidad de radiación solar y de la temperatura de operación del dispositivo, las cuales se ven afectadas por diversos parámetros físicos tales como latitud, condiciones ambientales, efectos de sombreado, etc. Dicho desempeño es normalmente evaluado bajo condiciones estándar de testeo (*STC*), es decir, espectro promedio AM 1.5 [2], irradiancia normalizada a 1000 W/m^2 y temperatura del dispositivo a 25°C . Para poder satisfacer los requerimientos de temperatura e irradiancia en *STC*, el testeo requiere un ambiente controlado y equipamiento específico tal como un simulador solar [3]. De esta manera no es posible, mediante experimentos sencillos, evaluar el comportamiento del dispositivo fotovoltaico para diferentes condiciones, ya sea ambientales o de carga.

Tener un modelo adecuado y estimar de manera apropiada los parámetros del mismo, a partir de datos brindados por el fabricante, permite obtener distintas curvas corriente-tensión (*I-V*) para diferentes valores de irradiancia (*G*) y temperatura del panel (*T*). De esa manera, el modelo resulta de gran utilidad, no sólo para realizar simulaciones de celdas, paneles (celdas en serie o paralelo) o arreglos solares (conjunto de paneles en serie y/o paralelo), sino también como herramienta para inferir características relativas a los mecanismos físicos internos de los dispositivos fotovoltaicos mencionados [4][5].

Por otro lado, teniendo en cuenta que la tensión y la corriente disponibles en los terminales del panel varían en función de la temperatura de operación, la irradiancia, y la carga, es necesario incorporar convertidores electrónicos que regulen la tensión y la corriente, de manera de encontrar el punto en que el dispositivo fotovoltaico, entregue la mayor potencia (*MPP*). De esa forma, el modelo de celda, panel o arreglo, resulta de gran utilidad para realizar un estudio de la dinámica asociada al convertidor y, además, posibilita el estudio de algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia (algoritmos *MPPT*) [6].

En la literatura existe una variedad de modelos destinados a obtener características *I-V* de los dispositivos fotovoltaicos, destacando dos ampliamente utilizados: el modelo de un diodo (Fig. 1.a) [7][8][9][10][11] y el modelo de dos diodos (Fig. 1.b) [12][13][14]. Si bien en el modelo de dos diodos se tienen en cuenta fenómenos físicos que en el modelo de un diodo se desprecian, este último presenta una buena relación de compromiso entre exactitud y simplicidad [6].

Para ambos modelos se han propuesto distintos métodos que permiten extraer sus parámetros, entre los que se destacan principalmente dos enfoques [7][8]: por un lado los que utilizan puntos específicos provistos por el fabricante con el

objetivo de resolver un conjunto de ecuaciones, y por otro, aquellos que se basan en el ajuste a una determinada curva I-V.

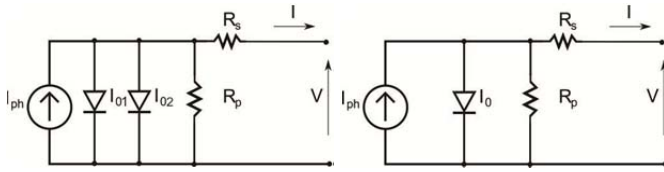


Figura 1. a) Modelo de un diodo. b) Modelo de dos diodos.

La principal ventaja del primer enfoque radica en que se necesita una cantidad mínima de información para obtener los parámetros. Adicionalmente, se puede obtener una buena correspondencia entre los datos reales y los modelados, en puntos específicos como lo son la tensión a circuito abierto del panel (V_{OC}), la corriente de cortocircuito (I_{SC}) y el punto de máxima potencia (MPP). Sin embargo, los métodos que utilizan este enfoque descuidan la forma de la curva y la minimización global de la misma. Otra desventaja radica en que, para poder plantear tantas ecuaciones como parámetros se quieran encontrar, se utilizan diferentes estrategias, tales como aproximaciones numéricas y cálculos de derivadas, que limitan la exactitud de la solución obtenida [14].

El segundo enfoque, por su parte, involucra técnicas de optimización, en las cuales los parámetros buscados se obtienen minimizando la diferencia entre la totalidad de los datos provistos por el fabricante y los datos obtenidos por modelado. Este enfoque proporciona soluciones que se ajustan a la totalidad de la curva, pero al buscar la minimización global, se puede perder de vista la exactitud de los resultados en los puntos de mayor interés (V_{OC} , I_{SC} , MPP).

A partir de lo mencionado, resulta deseable combinar ambos enfoques de modo de alcanzar, simultáneamente, una minimización global, con una alta correspondencia en los puntos de interés (V_{OC} , I_{SC} , MPP).

Otro aspecto importante a tener en cuenta al momento de abordar un método es su aplicabilidad. La información para encontrar los parámetros puede provenir de puntos particulares o de curvas I-V completas, de mediciones en condiciones estándar o mediciones en cualquier situación de temperatura e irradiancia. A partir de esto, la aplicabilidad hace referencia a la capacidad del método de utilizar información provista en cualquier condición de G y T , para realizar una adecuada extracción de parámetros. En tal sentido, aquellos métodos que utilizan la totalidad de la curva [8][10][16][17] tienen ventajas sobre aquellos que toman sólo puntos específicos [6][9][14][18][19]. De todas formas, aunque utilicen todos los puntos de la curva, algunos de los métodos son aplicables sólo a la curva en STC , sin poder aplicar el método a otros niveles de temperatura e irradiancia, como se observa en [8][16][17]. De esta manera resulta de gran interés plantear un método de extracción que pueda ser aplicado a partir de cualquier información de tensión, corriente, irradiancia y temperatura.

Respecto del proceso de extracción, también es esperable que el mismo converja a una solución adecuada en el menor tiempo posible. La velocidad de extracción está asociada a la complejidad computacional del método, siendo deseable

minimizarla [5][13][20]. Teniendo en cuenta que la ecuación que describe el modelo del panel o celda es trascendente, no es posible encontrar una solución cerrada que relacione la corriente y la tensión. Para resolver este problema algunos autores utilizan la función W-Lambert [18] y otros recurren al algoritmo iterativo de Newton-Raphson [1][10][11]. El inconveniente de estos métodos radica en su intensidad computacional, la cual reduce la velocidad de cálculo y los vuelve susceptibles a problemas de convergencia. Para afrontar este inconveniente algunos trabajos proponen la utilización de técnicas de optimización que ajustan los datos reales a los datos modelados sin recurrir a la resolución de una ecuación trascendente [8][14][17]. Sin embargo, estos trabajos no cumplen con el criterio de aplicabilidad, o no establecen con claridad si efectivamente pueden utilizar cualquier información para hallar los parámetros.

Teniendo en cuenta el análisis realizado respecto de las características deseables de un método de extracción, en el presente trabajo se propone un método para la obtención de un conjunto óptimo de parámetros para el modelo de un diodo, a partir de la combinación de los dos enfoques mencionados. Por un lado, se recurre a la técnica de optimización por Algoritmos Genéticos (AG) para ajustar la totalidad de los datos brindados por el fabricante a aquellos modelados; y por otro se penaliza el error en puntos de particular interés como la V_{OC} , la I_{SC} , y el MPP , para lograr mayor correspondencia en esa zona de la curva. Asimismo, el ajuste se realiza mediante una relación que no requiere la resolución de una ecuación trascendente, reduciendo la complejidad del cálculo y aumentando la velocidad de convergencia del método. El método propuesto se evalúa encontrando los parámetros del modelo de un diodo para el panel de silicio policristalino KC200GT de la empresa Kyocera. Finalmente, se comparan las curvas corriente-tensión obtenidas a partir del modelo con las provistas por el fabricante.

En las siguientes secciones, previo a la descripción del método propuesto, se realiza una breve revisión de los conceptos asociados al modelo de un diodo y a la técnica de algoritmos genéticos.

II. MODELO DE UN DIODO

La celda solar es la unidad básica en un sistema fotovoltaico y está compuesta por un material semiconductor, típicamente de silicio cristalino, que es especialmente tratado para crear dos capas diferentemente dopadas (tipo p y tipo n) y producir un campo eléctrico en la interfaz. Al exponerla a la radiación solar la celda se comporta como un generador de corriente, cuyo funcionamiento se puede describir por medio de la característica corriente-tensión del modelo de difusión de Shottky en una juntura pn. La ecuación (1) muestra la relación entre la corriente I y la tensión V de la celda [6].

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

donde I_{ph} es la corriente fotogenerada, I_0 es la corriente inversa de saturación del diodo, R_s es la resistencia serie del modelo, R_p la resistencia paralelo, a el factor de idealidad del diodo y V_t la tensión térmica definida en función de la constante de Boltzman k y la carga del electrón q ($V_t = k.T/q$).

La ecuación (2) muestra la relación de la corriente fotogenerada con la temperatura y la irradiancia [1].

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} \left(I_{scSTC} \frac{R_p + R_s}{R_p} + k_i(T - T_{STC}) \right) \quad (2)$$

donde I_{scSTC} es la corriente de cortocircuito en STC ; G y T , la irradiancia y la temperatura de operación; G_{STC} y T_{STC} sus valores en STC ; y k_i el coeficiente de temperatura para la corriente.

La corriente inversa de saturación del diodo puede ser expresada en función de la corriente inversa de saturación nominal, la temperatura de operación, la temperatura en STC (T_{STC}), el factor de idealidad, la energía del gap E_g , la carga del electrón y la constante de Boltzman, como se muestra a continuación [10].

$$I_0 = I_{0n} \left(\frac{T}{T_{STC}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

Las ecuaciones del modelo planteadas no sólo son válidas para una celda, sino que pueden ser extrapoladas para determinar la característica I-V de un panel o un arreglo teniendo en cuenta que al conectar N_s celdas en serie se ve aumentada la tensión y al conectar N_p celdas en paralelo se ve incrementada la corriente. Los fabricantes de paneles solares brindan como dato la corriente I_{scSTC} para la temperatura T_{STC} de 25°C e irradiancia G_{STC} de 1000 W/m², la constante k_i y curvas I-V para valores específicos de irradiancia y temperatura. De esa manera, los parámetros que se tienen como incógnita en las ecuaciones (1), (2) y (3) son: la resistencia serie (R_s), la resistencia paralelo (R_p), la corriente inversa de saturación nominal (I_{0n}) y el factor de idealidad (a).

III. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos que se pueden usar para resolver problemas de búsqueda y optimización, imitando el proceso de evolución y selección natural, postulado por Darwin en 1859. En este proceso, las poblaciones evolucionan a lo largo de sucesivas generaciones, donde prevalece la supervivencia del más apto. Los AG trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado, que evoluciona a lo largo de distintas generaciones. A cada individuo se le asigna un puntaje, determinado por una función de evaluación, relacionado con la bondad de dicha solución (o adaptación del individuo). Asimismo, la evolución entre sucesivas generaciones se lleva a cabo utilizando operadores genéticos tales como cruces y mutaciones.

En cada ciclo, el algoritmo utiliza la población actual (P_{ACTUAL}) para generar los 3 tipos de hijos que conforman la población de la siguiente generación (P_{FUTURA}), como se muestra en la Fig. 2.

La elite está conformada por los individuos de la generación actual con la mejor puntuación, los cuales sobreviven a la siguiente generación.

El cruce genera descendencia a partir de la combinación de la información provista por dos individuos de la generación actual. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al

problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma. Cuanto menor sea la adaptación de un individuo, menor será la probabilidad de que dicho individuo sea seleccionado para la reproducción, y por lo tanto, que su material genético se propague en sucesivas generaciones. Por su parte, la mutación es un operador con baja probabilidad que altera alguna propiedad de un individuo en forma aleatoria, antes de introducirlo en la nueva generación.

El cruce y la mutación cumplen distintos roles dentro del algoritmo. La descendencia producida por cruce tiende a mejorar la calidad promedio de la población, mientras que la mutación sirve para explorar otros espacios, evitando así mínimos locales.

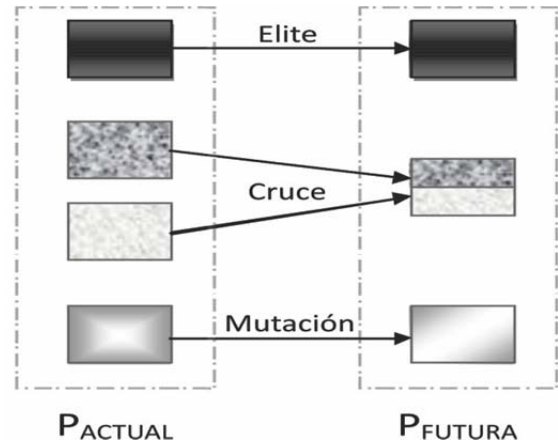


Figura 2. Creación de una nueva generación del AG.

Cada nueva población, creada a partir de la aplicación de operadores genéticos, vuelve a su tamaño original mediante la selección de los individuos más aptos. El ciclo continúa hasta alcanzarse algún criterio de finalización. Existen varios criterios para finalizar el ciclo del algoritmo. Por ejemplo: que el error obtenido sea menor a una cota estipulada, que la cantidad de generaciones llegue al máximo establecido, que no existan cambios significativos en los valores entregados por la función objetivo durante una cantidad determinada de generaciones, entre otras.

Teniendo en cuenta las características mencionadas, los algoritmos genéticos son una herramienta muy eficiente para extraer los parámetros del modelo de una celda ya que permiten abordar problemas involucrados con mínimos locales en el caso de optimización no convexa [8]. Otras ventajas que presenta esta técnica son: la posibilidad de ser aplicada aún cuando existe un espacio grande de soluciones, el hecho de no ser necesarios conocimientos específicos sobre el problema que se intenta resolver y la capacidad de prescindir de las derivadas de la función de evaluación.

IV. MÉTODO PROPUESTO

Como se menciona en la sección II, para poder modelar el comportamiento de un panel solar se necesitan ciertos parámetros (R_s , R_p , I_{0n} , a) que no se encuentran disponibles en la hoja de datos provista por el fabricante. En el presente

trabajo, la extracción de estos parámetros se realiza mediante AG, razón por la cual resulta necesario definir la composición del individuo, la función de evaluación y un conjunto de variables y operadores, para poder poner en funcionamiento el algoritmo de optimización.

Cada individuo representa una posible solución para los parámetros buscados (R_s , R_p , I_{0n} , a), y para evitar arribar a soluciones sin validez física, como por ejemplo, valores de resistencias negativos o corrientes inversas de saturación elevadas, se establecen límites (según rangos presentados en [1] y [16]) para cada uno de ellos, como se muestra en la Tabla I.

TABLA I
LÍMITES ESTABLECIDOS PARA LOS PARÁMETROS

Parámetro	Límite inferior	Límite superior
R_s	0.01 Ω	1.2 Ω
R_p	100 Ω	1000 Ω
I_{0n}	0 A	1e-6 A
a	1	2

La función de evaluación se construye a partir de las ecuaciones (1), (2) y (3), y de los datos proporcionados por el fabricante. Dicha función se define como el error cuadrático entre la corriente que brinda el fabricante (I_D) (para la correspondiente tensión V_D) y la corriente obtenida con las ecuaciones (1), (2) y (3). Los puntos (V_D , I_D) utilizados como información son extraídos de cualquiera de las curvas provistas por el fabricante (STC u otras). Luego, la ecuación para la función de evaluación (F_E) resulta:

$$F_E = \sum (I_D - I(R_s, R_p, I_{0n}, a, V_D))^2 \quad (4)$$

Debido a que la ecuación que relaciona la corriente con la tensión de un panel es trascendente y no puede obtenerse una solución analítica, usualmente se recurre a métodos iterativos para arribar a una solución. En este trabajo, para simplificar el cálculo y aumentar la velocidad de convergencia, se sustituye I por I_D en la ecuación (1), ya que, en el punto óptimo, I es igual a I_D , definiendo la función de evaluación como se muestra en la ecuación (5).

$$F_E = \sum \left(I_D - I_{ph} + I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V_D + R_s I_D}{V_t a}\right) - 1 \right] + \frac{V_D + R_s I_D}{R_p} \right)^2 \quad (5)$$

Esta función de evaluación se complementa con un algoritmo de penalización adicional. De esta manera, si se obtiene un conjunto de parámetros que minimiza la función objetivo, pero la corriente modelada I no pasa por los 3 puntos característicos proporcionados por el fabricante (I_{sc} , V_{oc} , MPP), se considera que es un individuo no apto. Dicha penalización se realiza dándole un valor alto de error de manera de evitar que se produzca un cruce con este individuo. Con esta estrategia se logra que el error entre la curva del fabricante y la modelada sea mínimo en todos los puntos, pero particularmente en aquellos de interés. Cabe destacar que si no se tienen como datos la I_{sc} , la V_{oc} y el MPP , no existe tal penalización y se minimiza la curva de manera global.

En este trabajo el algoritmo se ejecuta dos veces. En una primera instancia, la población inicial es elegida de forma aleatoria, y la mejor población de esta primera ejecución se utiliza como población inicial para la segunda iteración del algoritmo.

En la Tabla II se muestra la configuración del AG, donde F_{CRUCE} es la proporción de la población generada por cruce y H_{ELITE} es la cantidad de individuos seleccionados para pasar a la próxima generación sin sufrir cambios.

Esta técnica de optimización permite obtener, de manera sencilla, un conjunto de parámetros adecuado a partir de un amplio abanico de posibles soluciones. Además, aprovechando la simplicidad de cálculo y la velocidad de convergencia del algoritmo, es posible probar distintas configuraciones (tamaño de la población, cantidad de generaciones, funciones de cruce, funciones de costo, etc) para hallar las que mejor se adecuen a la obtención de los parámetros para el esquema propuesto.

TABLA II
OPCIONES ADOPTADAS PARA CONFIGURAR EL ALGORITMO GENÉTICO

Generaciones	50
Tamaño de la población	40
Población inicial (1ª iteración)	Generación aleatoria
Población inicial (2ª iteración)	Mejor población de la primera iteración
Función de mutación	Uniforme
Tasa de mutación	0.02
Función de cruce	Función de dispersión
F_{CRUCE}	0.8
H_{ELITE}	2

V. VALIDACIÓN

Con el objetivo de evaluar el método, se plantea extraer los parámetros del modelo de un diodo para el panel solar de silicio policristalino Kyocera KC200GT [21]. En la Tabla III se detallan las especificaciones eléctricas y térmicas medidas por el fabricante en condiciones estándar de testeo (STC).

TABLA III
ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS Y TÉRMICAS DEL PANEL KC200GT

Temperatura (T_{STC})	25°C
Irradiancia (G_{STC})	1000 W/m ²
Potencia máxima (P_{MPP})	200 W
Tensión en el MPP (V_{MPP})	26.3 V
Corriente en el MPP (I_{MPP})	7.61 A
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	32.9 V
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	8.21 A
Coef. de temperatura de tensión (K_T)	-0.123V/°C
Coef. de temperatura de corriente (k_i)	3,18e-3 A/°C
Ns (número de celdas en serie)	54

Luego de aplicar el método propuesto se obtienen los parámetros que se muestran en la Tabla IV, considerando un $E_g = 1.12\text{eV}$, por tratarse de silicio policristalino.

TABLA IV
PARÁMETROS OBTENIDOS LUEGO DE APLICAR ALGORITMOS GENÉTICOS

Resistencia serie (R_s)	0.2016 Ω
Resistencia paralelo (R_p)	213.1306 Ω
Factor de idealidad (a)	1.2931
Corriente inversa de saturación nominal (I_0n)	8.5e-8 A

Una vez obtenida la solución óptima, se evalúa el modelo para distintos valores de irradiancia y temperatura, comparando los resultados obtenidos con las curvas I-V brindadas por el fabricante. El primer conjunto de curvas (Fig. 3) se obtiene para una temperatura fija de 25°C e irradiancias de: 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², 400 W/m² y 200 W/m². Para el segundo conjunto de curvas (Fig. 4) se mantiene la irradiancia constante a 1000 W/m² y se evalúan temperaturas de: 25°C, 50°C y 75°C.

En Fig. 3 y Fig. 4, se puede ver que el modelo se ajusta a los datos ofrecidos por el fabricante. Para realizar una comparación cuantitativa, se analiza el error en tres puntos característicos de la curva (MPP , I_{sc} y V_{oc}) por ser datos de particular importancia para el diseño de algoritmos de máxima extracción de potencia y el diseño de la electrónica asociada a los paneles, entre otras utilidades.

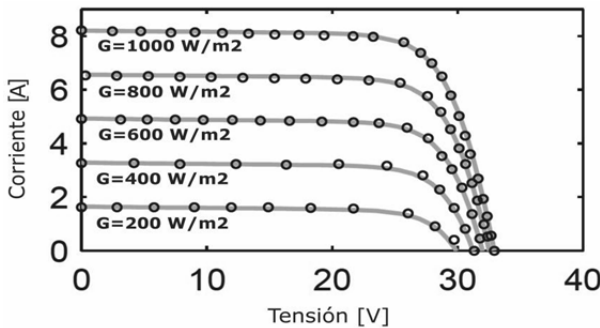


Figura 3. Curvas I-V modeladas (-) y provistas por el fabricante (o) para distintos valores de G y T=25°C.

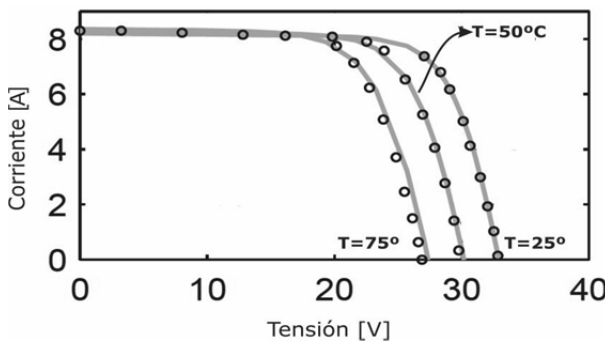


Figura 4. Curvas I-V modeladas (-) y provistas por el fabricante (o) para distintos valores de T y G=1000W/m².

Los resultados encontrados para los niveles de irradiancia y temperatura ensayados, resultaron con errores porcentuales

menores al 5% en todos los casos. En la Tabla V se muestran los errores calculados para una temperatura del panel de 25°C y considerando irradiancias de 1000 W/m², 600 W/m² y 200 W/m². Respecto de la mayor irradiancia, el error relativo resulta menor al 1% para los 3 puntos característicos analizados. Para el caso de G=600 W/m² los errores se mantienen por debajo del 2.5 %. Al disminuir la irradiancia a 200 W/m², se incrementan los errores relativos pero sin superar el 5% de error. Por último, en las Tablas VI y VII se pueden observar los resultados para temperaturas de 50°C y 75°C con irradiancia de 1000 W/m².

TABLA V
COMPARACIÓN ENTRE DATOS PROVISTOS POR EL FABRICANTE Y DATOS OBTENIDOS DEL MODELO PARA T = 25°C

G		Fabricante	Modelo	E. abs.	Error %
1000 W/m ²	V_{oc}	32.93 V	32.9 V	0.03 V	0.09%
	I_{sc}	8.21 A	8.20 A	0.01 A	0.12%
	V_{mpp}	26.35 V	26.55 V	0.20 V	0.76%
	I_{mpp}	7.62 A	7.54 A	0.08 A	1.04%
	P_{mpp}	200.67 W	200.28 W	0.39 W	0.19%
600 W/m ²	V_{oc}	32.14 V	32.0 V	0.14 V	0.44%
	I_{sc}	4.91 A	4.92 A	0.01 A	0.20%
	V_{mpp}	26.61 V	26.20 V	0.41 V	1.54%
	I_{mpp}	4.51 A	4.49 A	0.02 A	0.44%
	P_{mpp}	119.98 W	117.56 W	2.42 W	2.02%
200 W/m ²	V_{oc}	30.54 V	29.9 V	0.64 V	2.10%
	I_{sc}	1.61 A	1.64 A	0.03 A	1.86%
	V_{mpp}	25.45 V	24.7 V	0.75 V	2.95%
	I_{mpp}	1.46 A	1.43 A	0.03 A	2.05%
	P_{mpp}	37.13 W	35.29 W	1.84 W	4.96%

TABLA VI
COMPARACION ENTRE DATOS PROVISTOS POR EL FABRICANTE Y DATOS OBTENIDOS DEL MODELO PARA T = 50°C

G		Fabricante	Modelo	E.abs.	Error %
1000 W/m ²	V_{oc}	29.86V	30.15 V	0.29 V	0.97%
	I_{sc}	8.29 A	8.28 A	0.01 A	0.12%
	V_{mpp}	23.91 V	23.75 V	0.16 V	0.67%
	I_{mpp}	7.57 A	7.52 A	0.05 A	0.66%
	P_{mpp}	181.04 W	178.59 W	2.45 W	1.35%

TABLA VII
COMPARACIÓN ENTRE DATOS PROVISTOS POR EL FABRICANTE Y DATOS OBTENIDOS DEL MODELO PARA T = 75°C

G		Fabricante	Modelo	E.abs.	Error %
1000 W/m ²	V_{oc}	26.88 V	27.35 V	0.47 V	1.74%
	I_{sc}	8.36 A	8.36 A	0.00 A	0.00%
	V_{mpp}	20.14 V	21.00 V	0.86 V	4.27%
	I_{mpp}	7.75 A	7.46 A	0.29 A	3.74%
	P_{mpp}	156.06 W	156.72 W	0.66 W	0.42%

Los resultados obtenidos reflejan la adecuación del modelo para todas las curvas provistas por el fabricante, presentando mayor error a bajas irradiancias. Esta situación puede ser explicada teniendo en cuenta que el fabricante del panel admite una reducción en la eficiencia del mismo para bajos niveles de irradiancia, concluyendo que, en esa situación pueden aparecer fenómenos físicos que no han sido contemplados en el modelo de un diodo.

VI. CONCLUSIÓN

En este trabajo se propuso un método de extracción de parámetros del modelo de un diodo, a partir de la técnica de algoritmos genéticos. En el método propuesto se buscó una minimización global del error exigiendo, además, una alta correspondencia de la información modelada respecto de la medida en puntos particulares, como la tensión a circuito abierto, la corriente de cortocircuito y el punto de máxima potencia. Además, se generó un método capaz de ser aplicado ya sea, a información proveniente de mediciones en condiciones estándar, o bien a mediciones en cualquier otra situación de temperatura e irradiancia. Haciendo uso de las ventajas de la técnica de optimización basada en *AG* y teniendo en cuenta la correcta elección de la función de evaluación del mismo, se logró converger a una solución adecuada de manera sencilla.

La validación del método se llevó a cabo mediante la extracción de los parámetros del modelo de un diodo para el panel de la empresa Kyocera. Una vez encontrados, se evaluó cuan adecuado era el modelo obtenido comparando las curvas modeladas con las provistas por el fabricante. En estos ensayos se observó un error relativo inferior al 5% para todos los casos analizados.

Teniendo en cuenta lo expuesto en los párrafos anteriores se puede concluir que el método de extracción de parámetros propuesto brindó resultados muy satisfactorios en cuanto a adecuación del modelo obtenido al comparar los resultados con los datos del fabricante, aplicabilidad y complejidad de cálculo.

REFERENCIAS

- [1] M. S. Ismail, M. Moghavvemi, and T. M. I. Mahlia, "Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm," *Energy Convers. Manag.*, vol. 73, pp. 10–25, 2013.
- [2] C. Riordan and R. Hulstron, "What is an air mass 1.5 spectrum?," *IEEE Conf. Photovolt. Spec.*, pp. 1085–1088, 1990.
- [3] M. Ahmad, A. A. Talukder, and M. A. Tanni, "Estimation of important parameters of photovoltaic modules from manufacturer's datasheet," *2012 Int. Conf. Informatics, Electron. Vision, ICIEV 2012*, pp. 571–576, 2012.
- [4] M. Ye, X. Wang, and Y. Xu, "Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization," *J. Appl. Phys.*, vol. 105, no. 9, pp. 0–8, 2009.
- [5] Y. Li, W. Huang, H. Huang, C. Hewitt, Y. Chen, G. Fang, and D. L. Carroll, "Evaluation of methods to extract parameters from current – voltage characteristics of solar cells," *Sol. Energy*, vol. 90, pp. 51–57, 2013.
- [6] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.
- [7] S. Lineykin, M. Averbukh, and A. Kuperman, "An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell / panel," *Renew. Energy*, vol. 30, pp. 282–289, 2014.
- [8] M. Zagrouba, a. Sellami, M. Bouaïcha, and M. Ksourî, "Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms:

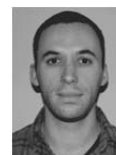
- Application to maximum power extraction," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 860–866, May 2010.
- [9] V. Lo Brano, A. Orioli, G. Ciulla, and A. Di Gangi, "An improved five-parameter model for photovoltaic modules," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 8, pp. 1358–1370, Aug. 2010.
 - [10] T. Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi, Y. Yamagata, and K. Ebihara, "Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 67, pp. 389–395, 2001.
 - [11] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," *Ind. Electron. 2007. ISIE 2007. IEEE Int. Symp.*, pp. 2392–2396, 2007.
 - [12] M. R. Alrashidi, K. M. El-Naggar, and M. F. Alhajri, "Parameters Estimation of Double Diode Solar Cell Model," *Int. J. Electr. Robot. Electron. Commun. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 98–101, 2013.
 - [13] K. Ishaque, Z. Salam, and H. Taheri, "Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 2, pp. 586–594, Feb. 2011.
 - [14] J. A. Jervase, H. Bourdoucen, and A. Al-Lawati, "Solar cell parameter extraction using genetic algorithms," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 11, pp. 1922–1925, 2001.
 - [15] B. K. Nayak, a. Mohapatra, and K. B. Mohanty, "Parameters estimation of photovoltaic module using nonlinear least square algorithm: A comparative study," *2013 Annu. IEEE India Conf.*, pp. 1–6, 2013.
 - [16] A. Sellai and Z. Ouennoughi, "Extraction of illuminated solar cell and schottky diode parameters using genetic algorithm," *Int. J. Mod. Phys. C*, vol. 16, no. 7, pp. 1043–1050, 2005.
 - [17] A. Sellami and M. Bouaïcha, "Application of the Genetic Algorithms for Identifying the Electrical Parameters of PV Solar Generators," *INTECH Open Access Publ.*, 2010.
 - [18] A. Jain and A. Kapoor, "Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 81, no. 2, pp. 269–277, 2004.
 - [19] H. A. B. Siddique, P. Xu, and R. W. De Doncker, "Parameter extraction algorithm for one-diode model of PV panels based on datasheet values," *4th Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2013*, pp. 7–13, 2013.
 - [20] P. Wolf and V. Benda, "Identification of PV solar cells and modules parameters by combining statistical and analytical methods," *Sol. Energy*, vol. 93, pp. 151–157, Jul. 2013.
 - [21] <http://www.kyocera.com/sg/products/solar/pdf/kc200gt.pdf>.2009



María Paula Cervellini, nació en Santa Rosa, La Pampa, Argentina, en 1985. En el año 2014 recibió el título de Ingeniera en Electrónica, otorgado por la Facultad de Ingeniería (UNMDP). Actualmente se desempeña como becario doctoral del CONICET.



Noelia Inés Echeverría, nació en Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina, en 1982. En el año 2012 recibió el título de Ingeniera en Electrónica, otorgado por la Facultad de Ingeniería (UNMDP). Actualmente se desempeña como becario doctoral del CONICET.



Pablo Daniel Antoszczuk, nació en Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina, en 1985. En el año 2010 recibió el título de Ingeniero en Electrónica, otorgado por la Facultad de Ingeniería (UNMDP). En el año 2015 recibió el título de Doctor en Ingeniería, orientación electrónica. Actualmente se desempeña como becario posdoctoral del CONICET.



Rogelio Adrián García Retegui, nació en Tandil, Buenos Aires, Argentina, en 1977. En el año 2002 recibió el título de Ingeniero en Electrónica, otorgado por la Facultad de Ingeniería (UNMDP). En el año 2009 recibió el título de Doctor en Ingeniería, orientación electrónica. Actualmente se desempeña como investigador adjunto del CONICET.



Marcos Alan Funes, nació en Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina, en 1974. En el año 1999 recibió el título de Ingeniero en Electrónica, otorgado por la Facultad de Ingeniería (UNMDP). En el año 2007 recibió el título de Doctor en Ingeniería, orientación electrónica. Actualmente se desempeña como investigador adjunto del CONICET.



Sergio Alejandro González, nació en Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina, en 1972. En el año 1999 recibió el título de Ingeniero en Electrónica, otorgado por la Facultad de Ingeniería (UNMDP). En el año 2006 recibió el título de Doctor en Ingeniería, orientación electrónica. Actualmente se desempeña como investigador adjunto del CONICET.