Ingeniantes

# Caracterización de un panel solar por resistencia de carga



#### Colaboración

Mario Espinosa Tlaxcaltecatl; Jacob Javier Vásquez Sanjuan; Marco Antonio Alonso Pérez, Universidad Politécnica de Puebla

Fecha de recepción: 25 de noviembre del 2021 Fecha de aceptación: 07 de diciembre del 2021

RESUMEN: La propuesta de caracterización del panel solar utiliza una resistencia eléctrica variable como elemento de control de la corriente. Este método representa una alternativa para estimar la evolución de los parámetros eléctricos y de rendimiento. El proceso de caracterización requiere obtener las curvas experimentales de corriente-voltaje (IV) y de potencia-voltaje (PV). También es necesario calcular los valores de la resistencia eléctrica a partir de expresiones teóricas basadas en los parámetros eléctricos del fabricante. Los resultados muestran un 40% en la eficiencia de conversión de potencia con respecto a los valores indicados por el fabricante, esta caída es explicada a través del comportamiento de la corriente y voltaje en el punto de máxima potencia eléctrica y es asociado a la resistencia de carga empleada. Además, se identifica una influencia asimétrica de la resistencia de carda sobre la forma de la curva I-V. esto al comparar los valores de corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto proporcionados por el fabricante y los obtenidos con la resistencia variable.

PALABRAS CLAVE: Curva IV, caracterización fotovoltaica, parámetros de desempeño, parámetros eléctricos, resistencia eléctrica. ABSTRACT: The solar panel characterization proposal uses a variable electrical resistance as a current control element. This method represents an alternative to estimate the evolution of electrical and performance parameters. The characterization process requires obtaining the experimental current-voltage (IV) and power-voltage (PV). It is also necessary to calculate the electrical resistance values from theoretical expressions based on the electrical parameters of the manufacturer. The results show a 40% in the power conversion efficiency with respect to the values indicated by the manufacturer, this drop is explained through the behavior of the current and voltage at the point of maximum electrical power and is associated with the resistance load used. In addition, an asymmetric influence of the load resistance on the shape of the IV curve is identified, when comparing the short-circuit current and open-circuit voltage values provided by the manufacturer and those obtained with the variable resistance.

KEYWORDS: IV curve, photovoltaic characterization, performance parameters, electrical parameters, electrical resistance.

#### INTRODUCCIÓN

Los paneles solares comerciales muestran una disminución en su rendimiento, debido a múltiples factores como la degradación de la película fotoactiva por la constante exposición de radiación [1], por la degradación de los parámetros eléctricos debido a condiciones externas por procesos de interacción con el medio ambiente [2] y en forma constante por la disminución de la intensidad de iluminación por ángulo de inclinación [3]. Aunado a esto, los procesos de caracterización requieren de equipo especializado, por ejemplo, el equipo Sun Simulator – SPI 240A. Estos equipos de laboratorio determinan las curvas IV, los parámetros eléctricos (voltaje de corto circuito, voltaje de circuito eléctrico, resistencia en serie y paralelo) y los parámetros de desempeño (factor de llenado y eficiencia de conver-

## Ingeniantes Revista In

sión de potencia) [4]. Y aunque la investigación puede profundizarse a diversos niveles, como estimar la resistencia de carga optima [5][6], la corriente de saturación [7], entre otras. Uno de los principales puntos de interés en aplicación real consiste en el monitoreo permanente de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos [8][9]. Por lo tanto, en este trabajo se propone el proceso de caracterización con elementos simples, que no requieren circuitos electrónicos complejos como en la caracterización capacitiva [10][11], usando solamente una resistencia variable y un módulo para controlar la intensidad de iluminación. Esta resistencia permite la variación de carga a lo largo de cuarto cuadrante de la curva experimental IV y limita la respuesta en corriente del panel solar, por lo tanto, los valores de amplitud de los parámetros de desempeño se ven reducidos. Finalmente, se interpreta y relaciona la respuesta obtenida con los parámetros proporcionados por el fabricante.

#### MATERIAL Y MÉTODOS Equipo Empleado

El equipo utilizado en la investigación pertenece al laboratorio de energías renovables de la Universidad Politécnica de Puebla. El panel solar es de la marca Eco Green modelo EGP-40P-36, tiene 36 células, con dimensiones de 350x790x30mm [12]. La Tabla 1 muestra los principales parámetros proporcionados del panel solar. La eficiencia de conversión de energía del 14.47% y está formado por celdas poli cristalinas.

Tabla 1. Resumen de parámetros del panel solar proporcionados por el fabricante Eco Green Energy Group Ltd. 2018. Condiciones de prueba estándar: 1000W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente a 25°C y masa de aire AM=1.5.

Características	Símbolo	Valores
Caracteristicas	S	
Potencia máxima	P <sub>MPP</sub>	40 W
Voltaje en el punto de máxima potencia	V <sub>MPP</sub>	18.43 V
Corriente en el punto de máxima potencia	Impp	2.17 A
Voltaje de circuito abierto	Voc	22.63 V
Corriente de corto circuito	lsc	2.32 A

Fuente Elaboración propia

El panel solar es iluminado por un módulo estudio de energía solar DIDATEC ERS 300, cuenta con lámparas de xenón, con variaciones de intensidad constantes a 100 mW/cm<sup>2</sup> y con ajuste de altura de la lámpara para ampliar el área de iluminación. La homogeneidad del área de radiación sobre el panel solar es detectada por un medidor solar marca Anaheim Scientific H117 (ver Figura 1), con función de auto rango, precisión de lectura de 3 ¾ dígitos, con un sensor de energía solar con una resolución de 1 W/m<sup>2</sup> a un rango de irradiancia de 2000 W/m<sup>2</sup> y una precisión de detección  $\pm$ 5%.



Figura 1. Imagen del panel solar Eco Green modelo EGP-40P-36 y el medidor solar Anaheim Scientific H117, en la esquina superior izquierda.

Fuente Elaboración propia.

#### Curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje

Para analizar el comportamiento eléctrico de un panel sola, la metodología propuesta conste en tres fases: primero, determinar los puntos característicos sobre la curva IV; segundo, determinar la curva PV y tercero, determinar los parámetros de desempeño del panel solar.

## Fase 1. Determinar los puntos característicos sobre la curva IV.

La curva I-V (ver Figura 2), permite observan los puntos característicos: corriente de corto circuito (I<sub>sc</sub>), voltaje de circuito abierto (V<sub>oc</sub>) y el punto de máxima potencia (P<sub>MPP</sub>). Para determinar con exactitud este último punto se plantea el siguiente paso.



Figura 2. Representación de la curva I-V teórica con sus puntos característicos.

Fuente Elaboración propia.

### Fase 2. Determinar los puntos característicos sobre la curva PV.

La curva P-V está determinada a través de la consideración, que la potencia es obtenida del producto de la corriente y el voltaje, observando el comportamiento resultante en la Figura 3, donde el voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{MPP}$ ) debe coincidir con la amplitud más alta de la curva, el punto  $P_{MPP}$ .



Figura 3. Representación de la curva P-V teórica con la ubicación de la  $P_{MPP}$ .

Fuente Elaboración propia.

La utilidad de la curva P-V es la localización del voltaje  $V_{MPP}$ , pero también permite identificar la corriente el punto de máxima potencia ( $I_{MPP}$ ).

#### Fase 3. Determinar parámetros de desempeño.

Finalmente, usando los puntos característicos se puede calcular dos parámetros: a) el factor de llenado (FF), a partir de la Ecuación (1), que representa la propiedad rectificadora del dispositivo, y en forma gráfica indica la relación entre dos áreas, la del rectángulo formado por los puntos de V<sub>MPP</sub> y I<sub>MPP</sub> y la del rectángulo formado por los puntos de I<sub>SC</sub> y V<sub>OC</sub>, y b) la eficiencia de conversión de potencia (η), a partir de la Ecuación (2), que indica la cantidad de potencia eléctrica generada por la celda solar en relación con la potencia óptica recibida [13].

$$FF = \frac{V_{MPP} I_{MPP}}{V_{OC} I_{SC}}$$
 Ec. (1)

Donde,  $A_c$  es el área superficial de la celda o panel solar en m<sup>2</sup> y S es la irradiancia dada en W/m<sup>2</sup>.

## Procedimiento para determinar el rango de valores de la resistencia variable.

Para caracterizar el panel fotovoltaico, se utiliza una resistencia eléctrica externa (100  $\Omega$ , 220W). La forma de calcular los valores extremos de esta resistencia, es primero determinar la resistencia mínima R<sub>min</sub>= V<sub>oc</sub>/4 I<sub>sc</sub> y después la resistencia mayor R<sub>may</sub> = 4 V<sub>oc</sub>/ISC. El

factor de 4 se determinó experimentalmente buscando garantizar el completo escaneo eléctrico, es decir, que se encuentren los valores de la resistencia lo más cercanos a los puntos de voltaje de circuito abierto (22.63 V) y de corto circuito (2.32 A).

Ingeniantes

Las resistencias para el escaneo de la curva IV (usando los datos proporcionados en la Tabla 1) son:  $R_{min} = 2.43$   $\Omega$  y  $R_{may} = 39 \Omega$ .

El procedimiento para medir la curva I-V consiste en incrementar el valor de la resistencia de la carga (Rext), desde  $R_{min}$  hasta  $R_{may}$ , midiendo con un multímetro (digital BK Precision 2712) la corriente (A) y el voltaje en la resistencia de carga (V). El esquema experimental se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Esquema experimental para medir la corriente y voltaje del panel solar.

Fuente Elaboración propia.

Para validar los valores de corriente y voltaje medidos, se realizó un promedio de tres muestras a cada uno de ellos, bajo las mismas condiciones de iluminación, temperatura y utilizando los mismos instrumentos de medición.

#### RESULTADOS

La Figura 5a muestra la curva experimental IV obtenida del panel solar, que permite identificar los puntos característicos de V<sub>oc</sub> y I<sub>Sc</sub>. Se observa que el registro de voltajes va desde los 3 volts y hasta los 15.5 V debido a las limitaciones de precisión para desplazamientos pequeños de la resistencia variable. En la Figura 5b se muestra la curva experimental PV que identifica la posición del punto de máxima potencia.

El valor de iluminación sobre la superficie del panel solar fue ajustado y medido con una amplitud de 1000 W/  $m_2$ , lo cual representa un producto S A<sub>C</sub> = 276 W, este valor fue el utilizado en la estimación de la eficiencia de conversión de potencia. Además, a través de la curva IV se puede estimar el valor de la resistencia en serie (R<sub>s</sub>) mediante la pendiente inversa de la recta tangente cerca del punto de V<sub>oc</sub> [14], como se muestra en la Figura 6. Encontrando un valor de Rs = 3.41  $\Omega$ .



Ingeniantes

Figura 5. Curvas experimentales,a) curva I-V y b) curva P-V, del panel solar con Irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup> y resistencia eléctrica variable de 100  $\Omega$ , 220W. Fuente Elaboración propia.



Figura 6. Línea tangente cercano al punto de circuito abierto, para la estimación de la resistencia serie del panel solar. Fuente Elaboración propia.

Con los puntos característicos se estimó los parámetros de desempeño, el factor de llenado y la eficiencia de conversión de potencia. En la Tabla 2 se resumen todos los puntos característicos y parámetros estimados a partir de las curvas experimentales, así como el porcentaje alcanzado de cada parámetro respecto a los valores proporcionados por el fabricante.

Tabla 2. Valores de los parámetros eléctricos y de desempeño estimados con el método de resistencia eléctrica variable, así como el % de la relación del valor encontrado en relación al valor del fabricante.

Parámetro	Valor encontrado	Valor encontrado / Valor del fabricante
Voc	17.7 V	78 %
lsc	1.36 A	59 %
Vmpp	13 V	70 %
IMPP	1.25 A	58 %
FF	0.67	72 %

#### Fuente Elaboración propia

De la comparación de los parámetros de desempeño identificados en la Tabla 2 es importante resaltar el parámetro de eficiencia de conversión de potencia, el cual representa solo un 40% con respecto al reportado por el fabricante. Es claro que este parámetro depende de condiciones experimentales, como método de escaneo, en particular el control y medición de la corriente. En este sentido, en el trabajo se utiliza una resistencia de carga variable que influye en los parámetros eléctricos de salida al limitar la corriente e interaccionar con las resistencias internas del panel solar. La explicación de esta caída en la eficiencia la podemos encontrar al analizar la expresión teórica de este parámetro, el cual depende de la potencia óptica de la fuente de luz (considerada una condición constante), y de la corriente y voltaje en el punto de máxima potencia eléctrica. Al considerar el valor porcentual de la corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia y considerando que se encuentran multiplicando en la expresión teórica de la eficiencia  $V_{MPP}$  X  $I_{MPP}$ , es posible determinar que el porcentaje obtenido de esta operación es del 40%, idéntico al valor alcanzado de la eficiencia.

Del resultado del factor de llenado, es posible deducir que la forma rectificada de la curva IV se ve comprometida en forma asimétrica por la resistencia de carga, es decir, afecta en mayor medida a un extremo de la curva, en particular cerca del punto de corriente corto circuito, esto se demuestra con el 19% de diferencia que es alcanzado por la I<sub>SC</sub> en comparación del porcentaje alcanzado por el V<sub>oC</sub>. Finalmente, es posible deducir el voltaje de circuito abierto de cada célula del panel solar al considerar que múltiples células se combinan eléctricamente (serie, paralelo y serie-paralelo) para producir un voltaje o una corriente más alta. La propuesta es considerar al panel en una configuración en serie de las células (N<sub>s</sub>=36). En esta configuración, el voltaje de circuito abierto del panel V<sub>oc</sub> permite deducir el voltaje de circuito abierto de cada célula V<sub>ocn</sub>, a partir de V<sub>ocn</sub> = V<sub>oc</sub> / n, siendo n el número de células (36 en este caso). El resultado encontrando es V<sub>ocn</sub> = 0.49 V.

#### CONCLUSIONES

El desempeño de un panel solar es reflejo de las condiciones intrínsecas del dispositivo, pero también de las condiciones externas, como iluminación y carga eléctrica. En este trabajo se presenta un procedimiento para estimar las curvas I-V utilizando una carga eléctrica resistiva externa.

Encontramos que es posible justificar una eficiencia al 40% con respecto a lo que reporta el fabricante, solo por su dependencia con los parámetros eléctricos de salida en el punto de máxima potencia, es decir, la multiplicación de V<sub>MPP</sub> y I<sub>MPP</sub>, los cuales están asociados a las limitaciones que implican el uso de resistencia eléctrica variable. Además de hallar la relación asimétrica que guarda el uso de la resistencia externa con los puntos V<sub>oc</sub> e I<sub>SC</sub>.

Por lo tanto, si requerimos un estudio más extenso de la influencia de la carga utilizada en el proceso de caracterización, o de la influencia sobre la forma rectificada de la curva IV es necesario mejorar el método de caracterización. El método propuesto en este trabajo cumple con la identificación básica de parámetros de desempeño solo como una alternativa de monitoreo constante, por ejemplo, para identificar el proceso de degradación del panel solar.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Politécnica de Puebla por facilitar sus instalaciones y equipo para realizar los experimentos reportados en este trabajo.

#### **BIBLIOGRAFÍ A**

[1] T. B. Kohen, "Diseño de un laboratorio para módulos fotovoltaicos por radiación ultravioleta," Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2020.

[2] M. T. Montero and C. Cadena, "Pérdida de potencia en módulos fotovoltaicos por degradación de sus parámetros eléctricos," Av. en Energías Renov. y Medio Ambient., vol. 12, pp. 39–45, 2008.

[3] M. Arrieta Paternina, L. Olmos Villalba, J. Izquierdo Nuñez, and R. Álvarez López, "Diseño de prototipo de sistema solar fotovoltaico optimizando el ángulo de inclinación de los paneles solares," Prospectiva, vol. 10, no. 1, pp. 97–107, 2012.

Ingeniantes

[4] J. Fernández, "Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil," 2009.

[5] D. Li and P. H. Chou, "Maximizing Efficiency of Solar-Powered Systems by Load Matching," Proc. Int. Symp. Low Power Electron. Des., vol. 2004-Janua, no. January, pp. 162–167, 2004.

[6] J. E. Martinez Tibaduiza, "Diseño e implementación de un cargador de baterías controlado por el algoritmo de MPPT y alimentado por paneles solares," Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, 2021.

[7] E. L. Meyer, "Extraction of Saturation Current and Ideality Factor from Measuring Voc and Isc of Photovoltaic Modules," Int. J. Photoenergy, vol. 2017, 2017.

[8] O. S. E. O, "Monitoreo de la eficiencia de paneles fotovoltaicos bajo condiciones de lluvia y polvo," Universidad de Antioquia, Colombia, 2020.

[9] A. D. Perdomo Garavito, D. M, Venegas Garzón, "Sistema de monitoreo de paneles solares por medio del paradigma del internet de las cosas," Pontificia Universidad JAVERIANA, Colombia, 2019.

[10] M. . E. Febres Flores, "Diseño de un módulo didáctico para el estudio de las curvas I-V de paneles solares para el laboratorio de circuitos eléctricos en la Universidad señor de Sipán," Universidad Señor de Sipán, Perú, 2021.

[11] P. S. N. Javed K. Sayyad, "Capacitor Load Based I-V Curve Tracer for Performance Characterisation of the Solar Photovoltaic System," Appl. Sol. Energy, vol. 56, pp. 168–177, 2020.

[12] L. Group Eco Green Energy, "Building a Greener World EGE-100P-36." p. 2, 2018, [Online]. Available: https://es.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/ crystalline/48362?utm\_source=ENF&utm\_medium=panel\_profile&utm\_campaign=enquiry\_company\_directory&utm\_content=29525.

[13] J. Nelson, The physics of solar cells. London: Imperial College Press, 2003.

[14] F. M. González-Longatt, "Model of Photovoltaic Module in Matlab," in 2DO Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, electrónica y Computación, 2005, vol. 1, no. 1, pp. 1–5.