

CARACTERIZACIÓN Y EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN MÓDULOS DE LÁMINA DELGADA

Firman, Andrés D. – afirman@ger-unne.com.ar

Cáceres, Manuel – mcaceres@ger-unne.com.ar

Vera, Luis H. – lvera@ger-unne.com.ar

González Mayans, Alexis Raúl – rmayans@ger-unne.com.ar

Universidad Nacional del Nordeste, FaCENA. Grupo en Energías Renovables. Argentina.

de la Casa Higuera, Juan – delacasa@ujaen.es

Universidad de Jaén. Grupo IDEA. España.

Resumen. *En el mercado mundial se observa un incremento, desde hace ya varios años, de los módulos fotovoltaicos (FV) de segunda generación o de lámina delgada. Con el objeto de analizarlos eléctricamente, el presente trabajo desarrolla y analiza en condiciones experimentales, una metodología destinada a la caracterización y extracción de parámetros eléctricos orientada a este tipo de módulos. Se describe la metodología para llevarlo a cabo de manera detallada y se realizan ajustes de tres tecnologías FV diferentes en base al trazado de su curva IV experimental, y se realiza la comparación entre ellas. Se analizan los resultados obtenidos y se los relaciona con el modelo equivalente eléctrico. Se presentan los desvíos entre el modelo logrado y los datos experimentales. Como conclusión, se obtiene que la metodología de extracción de parámetros representa y ajusta adecuadamente los módulos de segunda generación y que la misma puede ser empleada como primera etapa en una metodología de traslación a condiciones estándar de medida.*

Palabras-clave: *Energía solar, fotovoltaica, caracterización eléctrica.*

1. INTRODUCCIÓN

En el mercado mundial se observa un incremento, desde hace ya varios años, de los módulos conocidos como módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada, también conocidos como de segunda generación (Sinha et al, 2019), impulsados por la continua búsqueda de disminuir costos, asociados a las mejoras de eficiencia logradas que en algunos casos, anuncian eficiencias de conversión mayores al 23 % (Kamada et al, 2016) (Zhao et al, 2018). Es por ello que llevar a cabo la caracterización eléctrica y extracción de parámetros, con el objeto de obtener su circuito equivalente eléctrico presenta utilidad; para realizar estudios de degradación en el tiempo (Masuda et al, 2017) y como primera etapa de una metodología de traslación a condiciones normales de operación.

En la bibliografía existen diferentes formas de lograr la extracción de parámetros. Principalmente podemos citar; el modelo de un diodo de 3, 4 o 5 parámetros, también el modelo de dos diodos y hasta de siete parámetros (Wang et al, 2017) (Elbaset et al, 2016) (Yahya-Khotbehsara et al, 2018), cada uno de ellos aumentando la precisión y la carga computacional requerida.

La intención del presente estudio es la de realizar el análisis de si las metodologías de ajuste y modelos utilizados, típicamente en módulos de primera generación, se pueden aplicar de manera razonable y adecuada en los módulos de segunda generación, buscando un ajuste adecuado y a la vez que el modelo no se remita a realizar un simple ajuste matemático sobre el perfil de la curva corriente vs tensión (IV) experimental, si no que sea físicamente representativo de los procesos que se llevan a cabo en el dispositivos FV.

1.1 Extracción de parámetros

Desde los primeros usos espaciales de los dispositivos fotovoltaicos (FV) se tornó necesario conocer la performance de los mismos en distintas condiciones de irradiancia y temperatura. El científico de la NASA Sandstrom en el año 1967, desarrolló una metodología capaz de realizar dicha traslación a partir de la obtención de curvas corriente vs tensión (IV) experimentales.

Entre las ecuaciones que propone el autor, define el factor de corrección de curva K (*curve correction factor*) que tiene en cuenta el cambio de resistencia con la temperatura ($\Omega/^\circ\text{C}$), el cual requiere la medición de distintos parámetros a irradiancia constante para ser determinado. Esta metodología fue reforzada con la determinación de una resistencia de pérdidas, resistencia serie (R_s) cuya metodología para obtenerla fue establecida por Wolf – Rauschenbach (Wolf y Rauschenbach, 1961).

La metodología destinada a determinar R_s , requiere de dos curvas IV a exactamente igual temperatura. Este método junto con ecuaciones de variación con la temperatura de la corriente de corto circuito (I_{cc}) y de la tensión de circuito abierto (V_{ca}), derivó, de manera prácticamente invariable, en las normas de traslación para uso terrestre vigentes hasta

hoy en día, como por ejemplo la IEC 60891 y la ASTM 1036 (ASTM 1036, 1985) (IEC 60891, 1987) entre otras, convirtiéndose en la primera metodología desarrollada de extracción de parámetros eléctricos.

En la tierra al igual que en el uso espacial de la tecnología FV, la importancia de trasladar a una condición distinta de las encontradas, radica fundamentalmente en la necesidad de determinar la performance de dispositivos FV en distintas condiciones, siendo de especial interés las conocidas como *Standard Test Conditions* (STC).

Por la dificultad de lograr, fuera del laboratorio, condiciones de irradiancia o temperatura de celda constantes necesarias, muchos investigadores, desarrollaron sus propios métodos de traslación, con la finalidad de mejorar o simplificar lo que se presenta en las normas (Hishikawa et al, 2017) (Di Piazza et al, 2017) (Drouiche et al, 2018) (Chin et al, 2015) (Firman et al, 2018).

Otros autores con el propósito de conocer los parámetros del modelo equivalente eléctrico del dispositivo FV bajo ensayo, recurren a métodos de ajuste iterativos sobre la curva característica experimental (Anderson, 1996) (Papaioannou and Purvins, 2012). El modelo más ampliamente usado para tal fin, es el modelo equivalente eléctrico denominado de un diodo de cinco parámetros (Luque and Hegedus, 2011) (Villalva and Gazoli, 2009) (Laudani et al, 2014), cuya ecuación es implícita lo que dificulta la tarea de determinar los parámetros que la componen (Saloux et al, 2011) (Siddiqui et al, 2013). La principal ventaja radica que mediante el modelo equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros se logra un adecuado ajuste a lo largo de todo el perfil de la curva IV, además no requiere elevada carga computacional como en los modelos más complejos y puede ser fácilmente descrito desde el punto de vista eléctrico, por lo cual, será el que se revisará y aplicará en profundidad en este artículo.

1.2 Modelo equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros

El modelo equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros se encuentra representado en la Fig. 1. En este, I_{ph} es la corriente fotogenerada que representa la corriente que genera el dispositivo FV cuando incide la radiación solar sobre la misma, por lo tanto esta es la fuente que proporciona la energía eléctrica de acuerdo con el efecto fotovoltaico (Tiwari y Dubey, 2009). El diodo D , por el que circula la corriente I_d , representa la juntura PN necesaria para establecer el campo eléctrico propio del efecto fotovoltaico, del que depende el principio de funcionamiento de cualquiera de los tipos de tecnologías FV actualmente usadas. La resistencia paralelo R_p por la que circula la I_{rp} , representa la parte que se deriva de la corriente fotogenerada, y que se interpreta como circuitos de conducción dentro de la celda produciendo una caída en la eficiencia. Por último, la resistencia serie R_s , representa todas las caídas que se producen en la interconexión serie entre celdas; cableado, conducción de paso dentro de la misma celda, etc. Por la R_s circula la corriente de salida I y se establece el voltaje V en bornes del dispositivo FV.

Establecido el modelo equivalente eléctrico, podemos deducir que la corriente de salida $I = I_{ph} - I_d - I_{rp}$, entonces, reemplazando I_d por la ecuación del diodo (según el modelo de Shockley, 1949) y la I_{rp} por aplicación de la ley de Ohm, nos queda la Ec. (1).

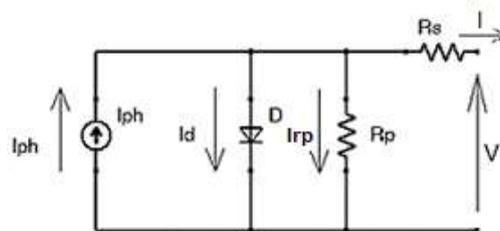


Figura 1- Modelo equivalente eléctrico de un dispositivo FV de un diodo de cinco parámetros.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V + I.R_s}{m.N.V_t}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (1)$$

Dónde: I es la corriente de salida que corresponde a la tensión V , I_{ph} es la corriente fotogenerada, I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo, m es el índice de idealidad del diodo, N es el número de celdas conectadas eléctricamente en serie, V_t es el potencial térmico y R_s y R_p son respectivamente la resistencia serie y la resistencia paralelo. A su vez el potencial térmico se encuentra definido por $V_t = k.T/q$ siendo k la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta de celda y q la carga del electrón.

Esta ecuación es implícita en I , y es válida tanto para celdas como para módulo o generadores FV. Esto se consigue considerando tantos diodos interconectados en serie (N) como posea el dispositivo a modelar (Luque y Hegedus, 2011) (Firman et al, 2013) (Firman et al, 2014).

A partir de la Ec. (1), varios autores concentran sus esfuerzos en métodos destinados a simplificar el proceso de ajuste. Esto impacta en la carga computacional requerida (Laudani et al, 2014). A su vez, otros se enfocan en realizar un ajuste preciso a lo largo de toda la curva característica (Villalva and Gazoli, 2009).

Este artículo, se basará en la extracción de los parámetros eléctricos en base al ajuste del modelo de cinco parámetros de un diodo, explicando en el proceso la metodología de ajuste diseñada y pensada para que represente eléctricamente a módulos de segunda tecnología, además, se pretende que el modelo hallado sea físicamente fundamentado y no un mero ajuste matemático sobre el perfil de la curva IV.

En este sentido, se presenta una metodología destinada a ajustar la curva IV de dispositivos FV de lámina delgada y se comparará los ajustes obtenidos con dispositivos de tecnología cristalina a modo de establecer diferencias desde el punto de vista eléctrico. El método desarrollado, se basa en una forma modificada de la Ec. (1), cuya finalidad es disminuir la cantidad de parámetros a determinar. Resultando que de los cinco parámetros, tres son determinados directamente trabajando sobre el perfil de la curva IV experimental en una condición dada y los otros dos son determinados en base a su comportamiento físico, hasta lograr un ajuste adecuado, teniendo en cuenta el punto de máxima potencia (Firman et al, 2013) (Osterwald, 2003). El modelo resultante es físicamente explicable y en consecuencia no solo pretende conseguir valores óptimos de ajuste desde un punto de vista geométrico.

A su vez, se simplifica el proceso iterativo por ajuste en el entorno del punto de máxima potencia. La metodología se comprueba, mediante caracterización eléctrica por curva IV experimental de diversos módulos FV de diferentes tecnologías, realizada bajo la luz solar natural.

2. METODOLOGÍA

Para realizar la caracterización desde el punto de vista de los componentes del modelo equivalente eléctrico, se parte del trazado de la curva IV experimental. Una vez trazada la curva característica, se procede a realizar el ajuste del modelo físico sobre los valores experimentales de la curva IV y, en consecuencia, encontrar los valores de los parámetros eléctricos del circuito equivalente.

Para el caso de la caracterización eléctrica de dispositivos FV conviene manipular la ecuación del modelo equivalente de un diodo de cinco parámetros, con la intención de evitar la corriente de saturación inversa (I_o), ya que este parámetro es difícil de determinar de manera práctica y además, establecer dicha ecuación en función de otros parámetros que puedan ser leídos directamente del trazado de la curva IV, resultando en un proceso de ajuste de menor carga computacional. Lo mismo ocurre, aunque en menor medida con la I_{ph} .

Por ello, partiendo del circuito equivalente eléctrico de la Fig. 1, considerando la condición de cortocircuito en sus bornes de salida; en tales condiciones, el voltaje que se establece por R_s , no es suficiente para que se produzca conducción directa por el diodo, por lo que la I_d que tiende a ser nula en comparación con el resto. Por lo tanto, se puede aproximar que la $I \approx I_{cc}$, esto conduce a que $I_{cc} = I_{ph} - I_{rp}$. Reemplazando por aplicación directa de la ley de Ohm, operando y despejando I_{ph} , se obtiene la Ec. (2).

$$I_{ph} = I_{cc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) \quad (2)$$

La Ec. (2), permite conocer la corriente fotogenerada, a partir de la I_{cc} y de las resistencias de pérdidas que posee el modelo considerado.

Por otro lado, si se considera el estado de circuito abierto; en tales condiciones $V = V_{ca}$ y $I = 0$, por lo que a partir de la Ec. (1) se puede escribir la Ec. (3).

$$0 = I_{ph} - I_o \left[e^{\left(\frac{V_{ca}}{m \cdot N \cdot V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{ca}}{R_p} \quad (3)$$

Observando y evaluando la exponencial, se llega a la conclusión que ese término es mucho mayor a la unidad (del orden de e^{20} para dispositivos FV), entonces operando se obtiene la Ec. (4).

$$I_o = \left(I_{ph} - \frac{V_{ca}}{R_p} \right) \left[e^{\left(\frac{-V_{ca}}{m \cdot N \cdot V_t} \right)} \right] \quad (4)$$

Ahora, si reemplazamos directamente la Ec. (2), en la Ec. (4), se obtiene la Ec. (5), la cual nos presenta una forma de determinar la corriente de saturación inversa en función de la I_{cc} y de las resistencias presentes en el circuito, conocida la V_{ca} .

$$I_o = \left[\frac{I_{cc}(R_s + R_p) - V_{ca}}{R_p} \right] \left[e^{\left(\frac{-V_{ca}}{m \cdot N \cdot V_t} \right)} \right] \quad (5)$$

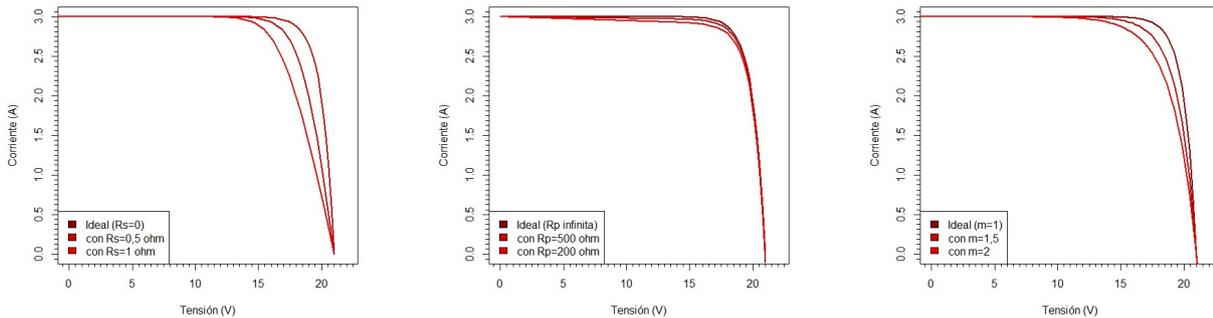
Por lo tanto, la Ec. (2) y la Ec. (5), permiten independizarnos de dos corrientes que son difíciles de determinar de forma práctica. Por lo que reemplazándolas en la Ec. (1), operando y eliminando la exponencial negativa que queda (del orden de $1/e^{20}$) en comparación, mucho menor a la exponencial positiva. Permite escribir una ecuación independiente de I_o y I_{ph} ; Ec. (6).

$$I = I_{cc} \left(\frac{R_s + R_p}{R_p} \right) - \frac{I_{cc}(R_s + R_p) - V_{ca}}{R_p} \left[e^{\left(\frac{V - V_{ca} + I \cdot R_s}{m \cdot N \cdot V_t} \right)} \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (6)$$

La ecuación 6 resulta más conveniente para ser utilizada en el caso de ajuste de los parámetros sobre una curva IV, buscando lograr ajustes aceptables sobre la característica IV de un dispositivo FV en condiciones de trabajo. Esto resulta beneficioso para hallar su modelo equivalente eléctrico, debido a que de los cinco parámetros variables que contiene dicho modelo, dos son determinados directamente, como es el caso de la I_{cc} y de la V_{ca} . Entonces el ajuste se reduce a encontrar los valores de m , R_p y R_s .

Para comprender como se comporta cada parámetro del modelo equivalente en el perfil de la curva IV se recurre a las Figs. 2 a, b y c. En estas se indica cómo afecta cada uno de los tres parámetros a determinar sobre el perfil de una curva IV ideal. En estas, se aprecian gráficamente los resultados obtenidos al alterar los parámetros de la Ec. (1). En la Fig. 2 a y 2 c, se visualiza que el efecto de la R_s y m , presentan un efecto de similares características en el entorno de la V_{ca} , y en la pendiente en esa zona, siendo el efecto del parámetro m mayormente localizado en la curva, que es la zona donde se halla el punto de potencia máxima (P_m).

En cambio R_p , Fig. 2 b, presenta sus efectos en la zona entorno de la I_{cc} , alterando la pendiente de la meseta. Lo indicado en las figuras puede ser extrapolado a diagramas del tipo PV (potencia-voltaje).



a) Efecto de la R_s de 0 a 1 Ω b) Efecto de la R_p de ∞ a 200 Ω c) Efecto del m de 1 a 2
 Figura 2 - Efecto de la R_s , R_p , y el m , sobre el perfil de una curva IV.

Conocidos sus efectos, para el caso determinar la R_p , se evalúa la pendiente que presenta la curva IV en el entorno de la I_{cc} , es decir en la condición de corto circuito, por medio de la Ec. (1), queda en este estado que la corriente de salida $I = I_{ph} - (V + I.R_s)/R_p$, y si derivamos esta con respecto a V , obtenemos la Ec. (7).

$$\frac{\partial I}{\partial V} = -\frac{1}{(R_p + R_s)} \quad (7)$$

En tales condiciones podemos escribir la Ec. (8), considerando, que para dispositivos FV funcionando correctamente se verifica que la relación $R_s \ll R_p$ (orden 100). Por lo que la inversa de la pendiente cambiada de signo en el entorno de la corriente de corto circuito, es aproximadamente igual a la resistencia paralelo, esto nos posibilita determinarla directamente midiendo la pendiente de la curva IV en dicho entorno. Resultado de acuerdo a lo expresado por (Rusirawan and Farkas, 2014).

$$-\frac{1}{\frac{\partial I}{\partial V}} \Big|_{I_{cc}} \approx R_p \quad (8)$$

Ahora bien, analizando el caso de polarización en el entorno en circuito abierto, partiendo nuevamente de la Ec. (1), pero en esta ocasión se desprecian los efectos producidos por R_p , para una mayor simplicidad y debido a que como se mostró, que sus efectos no son notorios en dicha zona, de acuerdo a lo indicado por el estudio llevado a cabo en la observación de la Fig. 2 b. Por lo tanto, se puede escribir entonces que la corriente $I = I_{ph} - I_d$, de esta manera, para analizar el entorno de la tensión de circuito abierto, derivamos con respecto al voltaje, resultando la Ec. (9).

$$\frac{\partial I}{\partial V} = -I_o \left(\frac{1 + \frac{\partial I}{\partial V} R_s}{m \cdot N \cdot V t} \right) \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot N \cdot V t} \right)} \right] \quad (9)$$

Despejando y analizando la inversa de la pendiente cambiada de signo evaluada en el entorno de V_{ca} queda, la Ec. (10). Esta ecuación indica que la pendiente en el entorno próximo a la V_{ca} se encuentra compartida por los efectos de las dos variables m y R_s , y cuyo aumento desplazarán la pendiente en el mismo sentido.

$$-\left. \frac{1}{\frac{\partial I}{\partial V}} \right|_{V_{ca}} = \frac{m \cdot N \cdot Vt}{I_0 \cdot e^{\left(\frac{V_{ca}}{m \cdot N \cdot Vt}\right)}} + R_s \quad (10)$$

En definitiva, de la Ec. (8), se infiere que la R_p puede ser fácilmente determinada en base a la pendiente de la curva IV en el entorno de la I_{cc} . De la Ec. (10), se infiere que en el entorno próximo de la V_{ca} , la pendiente de la curva IV resulta proporcional a la R_s y al índice m . Esto permite estimar un valor de R_s en función de un valor de m “semilla”, como por ejemplo $m = 1$ (Shockey, 1949) (Yordanov et al, 2012) (Khalid and Abido, 2014) (Bashahu and Nkundabakura, 2007), de esta manera hallar un valor máximo de R_s , que luego puede ser ajustado (reducido) en la determinación posterior de m , hasta lograr un ajuste óptimo sobre el punto de máxima potencia.

3. RESULTADOS

Para la aplicación práctica de la metodología desarrollada en los apartados anteriores, se recurre al trazado experimental de las curvas IV a sol real. Para establecer comparaciones, se recurre a tecnologías diferentes de módulos FV totalizando un total de 3 tecnologías distintas (PC, CIS y HIT), siendo uno de ellas cristalina utilizada a modo de comprobación experimental.

Las curvas IV son adquiridas en momentos sin presencia de nubes. En las curvas se utilizaron dos trazadores diferentes según el caso y dependiendo de la región donde se tomaron las curvas. Por un lado se utilizó un trazador compuesto por dos instrumentos Agilent de 6 y ½ dígitos trabajando en simultáneo. Donde se utilizó una carga capacitiva para la excursión de los estados de polarización. La curva completa es adquirida en un intervalo menor de los 100 ms, con una densidad de puntos útiles de alrededor de los 1000. Por otro lado, se ha utilizado un trazador de curvas IV comercial PVE modelo PVP1000C40. Con excelentes características de medición pero con una densidad de puntos adquiridos mucho menor. Dicho instrumento funciona en base a una carga capacitiva. También para este caso, se verifica que el trazado se realizó en tiempos inferiores a los 100 ms. Las curvas fueron tomadas en el rango de los 900 a 1000 W/m² y con temperaturas del rango de los 34 a 48 °C. Las curvas IV obtenidas se presentan normalizadas para poder compararlas a simple vista, en el gráfico de la Fig. 3. Donde se aprecia menor factor de llenado en los CIS a diferencia de los PC y el HIT.

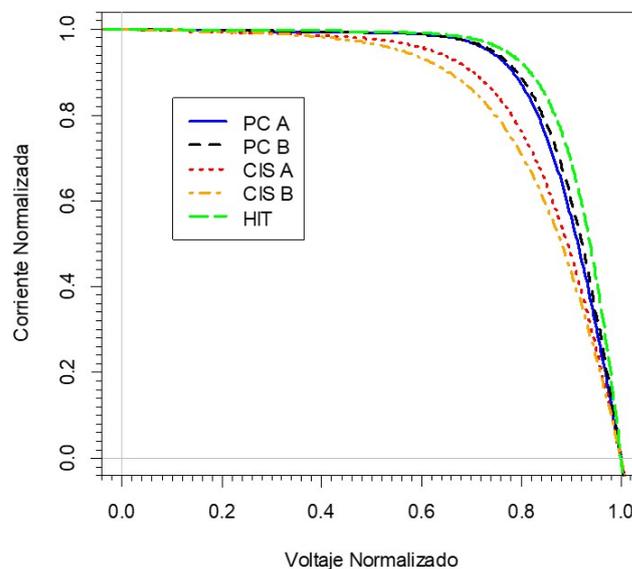


Figura 3 - Curvas IV normalizadas de los módulos ensayados.

Una vez trazadas las curvas IV, para llevar a cabo el ajuste, se obtiene por lectura directa la I_{cc} , y la V_{ca} de cada curva. De la inversa de la pendiente cambiada de signo del entorno de la I_{cc} , se obtiene R_p , y de la inversa de la pendiente cambiada de signo en el entorno de la V_{ca} se obtiene una R_s máxima. Luego, se ajusta el valor de m por método iterativo, hasta lograr una diferencia mínima con respecto al punto de máxima potencia.

Para determinar la diferencia que existe entre la curva ajustada y la experimental se recurre a la utilización de la Ec. (11), Donde P_i son los datos de potencia experimentales y P'_i los datos de potencia ajustados. Por medio de dicha ecuación, se evalúa a lo largo de toda la curva la diferencia de potencia que existe entre las mismas con respecto a la potencia máxima P_m . Se utiliza P_m y no P_i , por el hecho de evitar indeterminaciones en los extremos del trazado.

$$\varepsilon\% = \left(\frac{P_i - P'_i}{P_m} \right) 100 \quad (11)$$

La verificación experimental se realizó con 5 módulos distintos. Los parámetros ajustados de cada módulo FV ensayado se listan en la Tab. 1. A modo de comparación entre los módulos de lámina delgada se incorporan dos módulos poli-cristalinos (PC A y PC B). En la misma tabla se presentan dos módulos de lámina delgada Cobre Indio Selenio (CIS A y CIS B) y uno con celdas denominadas de hetero-juntura (HIT). Las siglas de este último provienen de *Heterojunction with Intrinsic Thin layer*, en el cual se deposita una capa ultra fina de lámina delgada amorfa sobre una celda mono-cristalina.

Tab. 1 – Parámetros extraídos en base al ajuste del modelo equivalente eléctrico sobre la curva IV experimental, además se indica en cada caso la I_o y la I_{ph} calculadas junto con el N utilizado.

Módulo	R_p	R_s	m	I_o	I_{ph}	N
PC A	261.3 Ω	0.33 Ω	1.25	8.274e-08 A	10.5 A	60
PC B	613.2 Ω	0.57 Ω	1.27	2.296e-07 A	5.12 A	72
CIS A	601.7 Ω	1.66 Ω	1.82	2.210e-05 A	3.26 A	104
CIS B	404.4 Ω	0.67 Ω	2.62	3.375e-04 A	2.57 A	36
HIT	748.1 Ω	0.23 Ω	1.40	8.254e-07 A	6.73 A	72

Los resultados del ajuste logrado, se presentan en forma gráfica, indicado en diagramas potencia vs tensión (PV) para cada módulo. Estas figuras representan los datos experimentales con círculos para cada punto tomado con el trazador de curvas. Superpuestos a los datos experimentales, se presenta la curva ajustada, siguiendo el procedimiento descrito en la metodología. Además se presenta la curva de diferencia que resulta comparando las mismas, calculada mediante la expresión indicada en la Ec. (11), cuyos valores porcentuales se establecen en el eje secundario de la derecha. Conjuntamente se traza con una línea horizontal de referencia para el valor cero de diferencia. La línea punteada vertical indica el punto de voltaje máximo (V_m) que intercepta al punto de máxima potencia.

La Fig. 4, muestra los resultados obtenidos para el módulo policristalino PC A. La curva experimental fue obtenida a través del trazador basado en multímetros de 6 y $\frac{1}{2}$ dígitos, descrito en la presente sección. En la misma, se aprecia una excelente concordancia entre los datos experimentales y la curva ajustada, apoyado en el hecho de que se manifiesta una diferencia $\epsilon\%$ menor al 0.42% a lo largo de toda la curva obtenida. Puede apreciarse también, como la metodología de ajuste trabaja sobre el punto de potencia máxima, ya que la diferencia en su entorno tiende a cero, incluso cambia de signo en esta región. Ya que la iteración se programó de manera de ajustar hasta que la diferencia de potencia máxima se encuentre por debajo de los 50 mW.

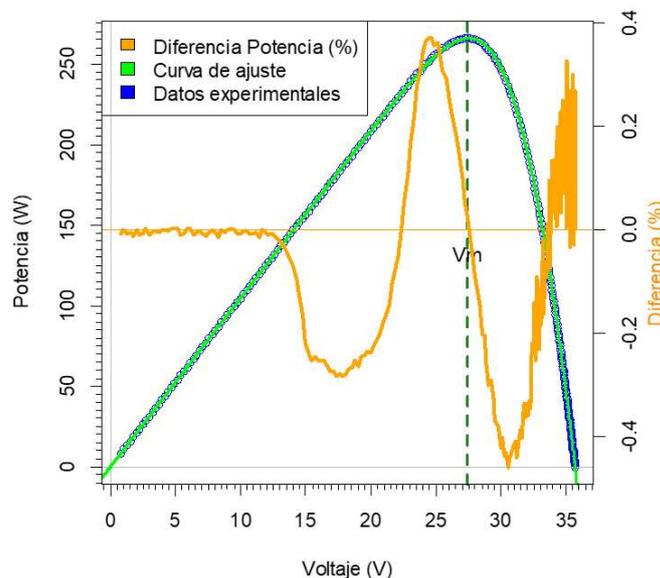


Figura 4 - Curva PV, curva ajustada y curva de diferencia porcentual del módulo PC A.

Los parámetros extraídos del ajuste de la curva de este módulo arrojan valores típicos de la tecnología empleada. El índice m de 1.25 (Tab. 1), indica un alto grado de ordenamiento en el cristal que conforma el diodo y a la vez cierto grado de simetría eléctrica entre las 60 celdas interconectadas.

Por otra parte, la Fig. 5, presenta una curva experimental realizada con los multímetros de 6 $\frac{1}{2}$ dígitos del módulo PC B. Se aprecia también en esta oportunidad elevado grado de ajuste, según la información que nos otorga la gráfica de diferencia porcentual mostrada, que en este caso se extiende hasta el 0.6%. Los valores ajustados de m arrojan un valor de 1.27, cercano al anterior y típicos para este tipo de tecnología tan difundido en el mercado nacional en la actualidad. El punto de máxima potencia se encuentra dentro del entorno definido en la iteración de ajuste de m y R_s , dando una diferencia de P_m menor a 50 mW.

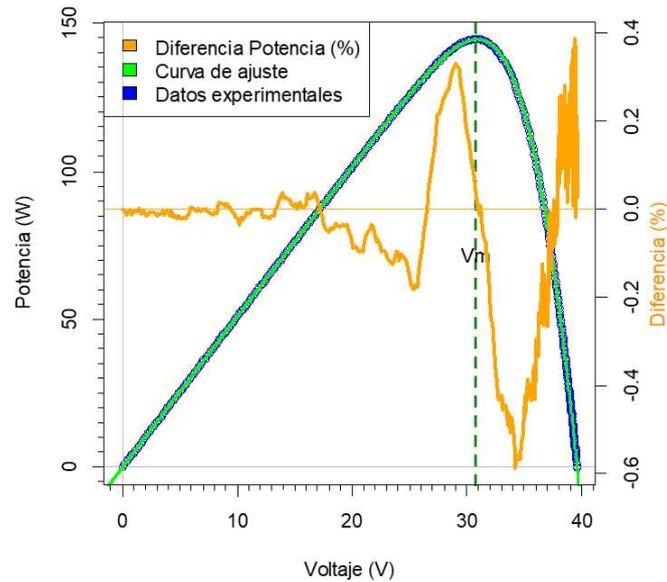


Figura 5 - Curva PV, curva ajustada y curva de diferencia porcentual del módulo PC B.

En la Fig. 6 se presenta la gráfica PV del primero de los módulos de lámina delgada ensayados, el módulo de cobre indio selenio, CIS A. La curva fue obtenida con los multímetros de 6 y $\frac{1}{2}$ dígitos, trabajando en forma sincronizada, con una densidad de puntos del orden de los 900 valores graficados. Se visualiza que el ajuste logrado en este caso es incluso similar al logrado en los casos anteriores y de gran concordancia con la gráfica experimental fundada en el hecho de que la diferencia es menor de 0.4%, aun presentado cierto nivel de dispersión en los datos a lo largo de toda la curva de $\epsilon\%$. De todas formas se logra un ajuste adecuado sobre el punto P_m .

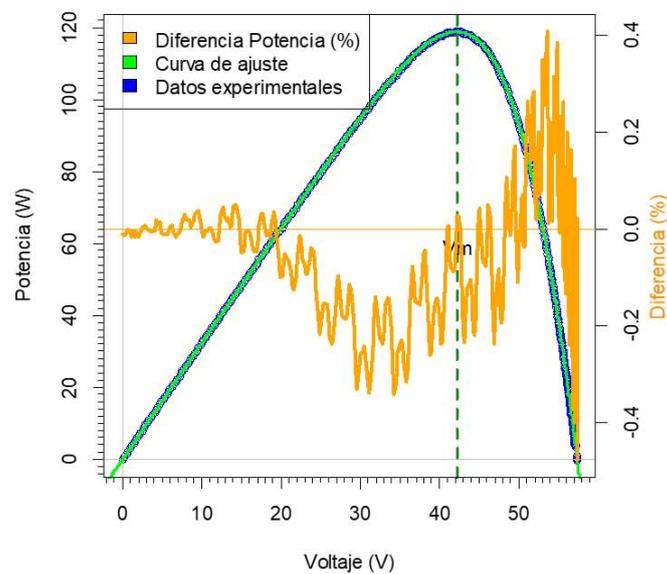


Fig. 5, Curva PV, curva ajustada y curva de diferencia porcentual del módulo CIS A.

Los valores ajustados indicados en la Tab. 1 en el caso CIS A, presentan valores similares en cuanto a R_p que los módulos poli-cristalinos, con valores que se consideran típicos o incluso elevados, lo que suele relacionarse con bajo nivel de fugas en la celda y con elevada calidad constructiva (Ahmed et al, 2016). Sin embargo, los valores de R_s y m van en aumento en detrimento de P_m , mayormente relacionado a la cantidad de celdas en serie N que en este caso son 104. Dicho comportamiento es típico y esperado para este tipo de tecnología. En cuanto al valor de m de 1.82 mayor que en el caso de los PC. Esto indica diferencias constructivas en el proceso de deposición sobre el sustrato de las celdas, donde cobran más importancia las corrientes de recombinación (Sze y Kwok, 2006), asociado a diodos de menor eficacia constructiva y de menor costo constructivo. Como por su parte incide en el valor de I_0 , que resulta dos órdenes mayor que en el caso de los módulos cristalinos, lo que descarta variaciones producidas por temperatura las cuales se esperarían dentro de un orden de diferencia para temperaturas en los rangos trabajados.

Las curvas PV del módulo CIS B se muestran en la Fig. 6, en ella se aprecia una menor densidad de puntos experimentales, debido a que esta fue adquirida con el equipo comercial PVE. Al igual que en los casos anteriores se logra un ajuste adecuado, con diferencias menores al 0.4% en la mayor parte de la curva, pero que presenta hacia la zona de V_{ca} , mayor dispersión. Principalmente debido al cambio abrupto de la curva que se produce para pequeños intervalos de voltaje, los cuales cobran mayor importancia a medida que la potencia disminuye hacia cero.

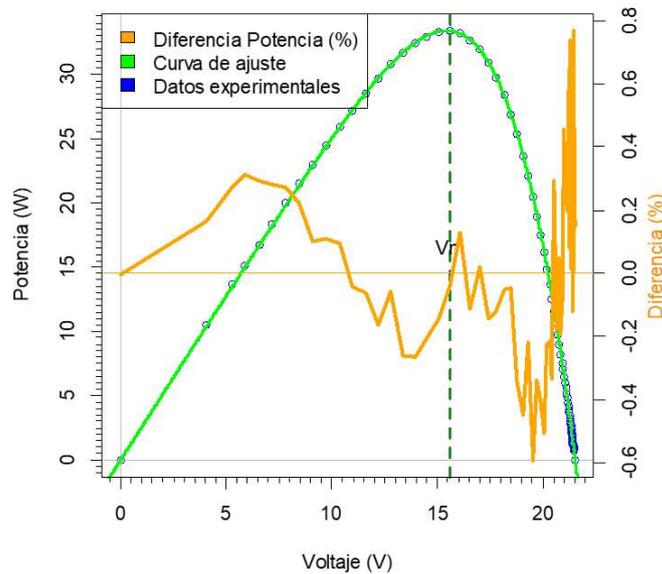


Figura 6 - Curva PV, curva ajustada y curva de diferencia porcentual del módulo CIS B.

Los valores ajustados para este módulo presentan, al igual que el caso anterior, valores previstos para este tipo de tecnología con un aumento de m , evidenciando mayor diferencia constructiva en las celdas lo que provoca una mayor curvatura en la zona de la tensión umbral del dispositivo. Alejándose cada vez más del modelo ideal del diodo planteado por Shockley.

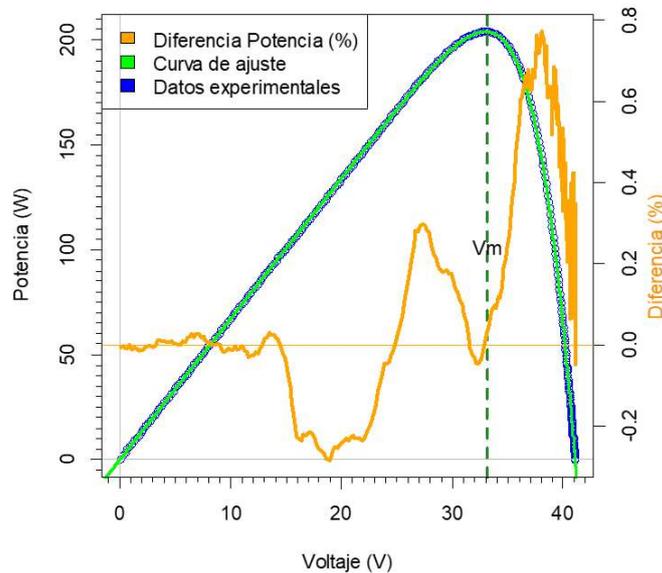


Figura 7 - Curva PV, curva ajustada y curva de diferencia porcentual del módulo HIT.

Las curvas obtenidas del módulo de heterojuntura HIT, se presentan en la Fig. 7, en ella se demuestra nuevamente un adecuado ajuste a lo largo de la curva evidenciado por el valor de diferencia porcentual del orden del 0.8%, donde se ve mayormente comprometido el ajuste en la zona entorno a V_{ca} . Esto puede deberse a que el modelo no lo representa con suficiente exactitud. De todas maneras se logra ajustar y extraer sus parámetros y ajustar el punto de máxima potencia, logrando un excelente resultado en los puntos de mayor interés, la I_{cc} , la V_{ca} y la P_m .

Este módulo demuestra gran calidad constructiva en base a los valores elevados de R_p y bajos de R_s , y el índice de idealidad del diodo m con un valor intermedio entre PC y CIS. Para su ajuste se utilizó $N=72$ aunque presente solo 36 celdas, debido al hecho de que cada celda está recubierta por otra de lámina delgada.

4. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar una metodología basada en el modelo equivalente eléctrico de un diodo de cinco parámetros con el fin de emplearlo en el ajuste y extracción de parámetros, con especial interés en módulos de lámina delgada.

Se establece un modelo matemático equivalente y representativo del modelo eléctrico, con la ventaja de que de los cinco parámetros necesarios para caracterizarlo completamente, tres pueden ser obtenidos de manera prácticamente directa de la curva IV experimental del dispositivo bajo prueba.

Se define un modelo que permite explicar el comportamiento eléctrico de las celdas FV de lámina delgada con precisión, basado en el hecho de que el modelo representa adecuadamente al circuito equivalente eléctrico y que las diferencias porcentuales halladas en las pruebas experimentales de ajuste, en ningún caso evidencian desvíos mayores al 0.6% excepto para el módulo de celdas de heterojuntura (HIT), llegando a valores de hasta 0.8%, perdiendo cierto grado de precisión pero, en todos los casos, logrando ajustar al punto de máxima potencia definido dentro de un entorno de 50 mW fijado.

Se consigue explicar eléctricamente el comportamiento en base a la evaluación de los resultados obtenidos en los ajustes, cumpliendo otro de los objetivos de la investigación.

La metodología desarrollada permite proseguir con el estudio de traslación a condiciones estándar de medida si se determinan los índices de variación con la temperatura e irradiancia, de la I_{cc} y de la V_{ca} , aplicando los modelos correspondientes, junto con los datos de irradiancia y temperatura al momento de trazado de la curva IV experimental, utilizando los valores que se consiguen determinar de R_s , R_p y m como en los presentes casos.

REFERENCIAS

- Ahmed, M. T., Gonçalves, T., & Tlemcani, M. (2016). Single diode model parameters analysis of photovoltaic cell. In 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) (pp. 396-400). IEEE.
- Almonacid, F., Rus, C., Hontoria, L., Fuentes, M., & Nofuentes, G. (2009). Characterisation of Si-crystalline PV modules by artificial neural networks. *Renewable Energy*, 34(4), 941-949.
- Anderson, A. (1996). PV translation equations a new approach. In AIP Conference Proceedings, volume 353.
- ASTM E1036-85 (1985). Standard test methods for electrical performance of nonconcentrator terrestrial photovoltaic modules and arrays using reference cells. In Norma ASTM E1036 - 85. ASTM.
- Bashahu, M., & Nkundabakura, P. (2007). Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors. *Solar energy*, 81(7), 856-863.
- Chan, D. and Phang, J. (1987). Analytical methods for the extraction of solar-cell single-and double-diode model parameters from IV characteristics. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 34(2):286–293.
- Chin, V. J., Salam, Z., & Ishaque, K. (2015). Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. *Applied Energy*, 154, 500-519.
- d’Alessandro, V., Guerriero, P., Daliento, S. & Gargiulo, M. (2011). A straightforward method to extract the shunt resistance of photovoltaic cells from current–voltage characteristics of mounted arrays. *Solid-State Electronics*, 63(1), 130-136.
- Di Piazza, M. C., Luna, M., Petrone, G., & Spagnuolo, G. (2017, June). Parameter translation for single-diode PV models based on explicit identification. In 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (pp. 1-5). IEEE.
- Drouiche, I., Harrouni, S., & Arab, A. H. (2018). A new approach for modelling the aging PV module upon experimental I–V curves by combining translation method and five-parameters model. *Electric Power Systems Research*, 163, 231-241.
- Elbaset, A. A., Ali, H., & El Sattar, M. A. (2016). New seven parameters model for amorphous silicon and thin film PV modules based on solar irradiance. *Solar energy*, 138, 26-35.
- Firman, A. (2014). “Determination and study of the electric generation capacity of grid connected PV systems in real operating conditions”, PhD thesis UNSa.
- Firman, A., Toranzos, V., Busso, A., Vera, L., De la Casa, J. (2013). Qualitative Analysis of Electrical Mismatch Losses in Photovoltaic Devices. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.
- Firman, A., Toranzos, V., Vera, L., Busso, A., & de la Casa, J. (2014). Passive Monitoring of the Power Generated in Grid Connected PV Systems. *Energy Procedia*, 57, 235-244.
- Firman, A., Cáceres, M. Vera, González Mayans, A. (2018). Método discreto de traslación de parámetros de curvas I-V a sol natural. VII Congreso Brasileiro de Energia Solar – Gramado.
- Hishikawa, Y., Doi, T., Higa, M., Yamagoe, K., Ohshima, H., Takenouchi, T., & Yoshita, M. (2017). Voltage-dependent temperature coefficient of the I–V curves of crystalline silicon photovoltaic modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(1), 48-53.
- IEC-60891 (1987). Procedures for Temperature and Irradiance Corrections to Measured IV Characteristics of Crystalline Silicon PV Devices (1st edition). IEC Central Office: Geneva, Switzerland.
- Ishaque, K. and Salam Z. (2011). An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution. *Solar Energy*, 85(9):2349–2359.

- Kamada, R., Yagioka, T., Adachi, S., Handa, A., Tai, K. F., Kato, T., & Sugimoto, H. (2016, June). New world record Cu (In, Ga)(Se, S) 2 thin film solar cell efficiency beyond 22%. In 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) (pp. 1287-1291). IEEE.
- Khalid, M. S., & Abido, M. A. (2014). A novel and accurate photovoltaic simulator based on seven-parameter model. *Electric Power Systems Research*, 116, 243-251.
- Laudani, A., Riganti Fulginei, F., & Salvini, A. (2014). High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental IV curves by using reduced forms. *Solar Energy*, 103, 316-326.
- Luque, A. and Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley.com.
- Masuda, A., & Hara, Y. (2017). Potential-induced degradation of thin-film Si photovoltaic modules. *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(4S), 04CS04.
- Marion, B., Rummel, S., & Anderberg, A. (2004). Current–voltage curve translation by bilinear interpolation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(8), 593-607.
- Osterwald, C. R. (2003). Standards, calibration and testing of PV modules and solar cells. *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*.
- Papaioannou, I. and Purvins A. (2012). Mathematical and graphical approach for maximum power point modelling. *Applied Energy*, 91(1):59–66.
- Rusirawan, D., & Farkas, I. (2014). Identification of Model Parameters of the Photovoltaic Solar Cells. *Energy Procedia*, 57, 39-46.
- Saloux, E., Teyssedou, A., & Sorin, M. (2011). Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point. *Solar Energy*, 85(5), 713-722.
- Sandstrom, J. (1967). A method for predicting solar cell current-voltage curve characteristics as a function of incident solar intensity and cell temperature. *IEEE VOL. II*, 199.
- Shockley, W. (1949). *The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors*. Bell System Technical Journal, 28(3), 435-489.
- Siddiqui, M. U., Arif, A. F. M., Bilton, A. M., Dubowsky, S., & Elshafei, M. (2013). An improved electric circuit model for photovoltaic modules based on sensitivity analysis. *Solar Energy*, 90, 29-42.
- Sinha, T., Lihare, D., & Khare, A. (2019). A review on the improvement in performance of CdTe/CdS thin-film solar cells through optimization of structural parameters. *Journal of Materials Science*, 1-17.
- Sze, S. M., & Kwok, K. (2006). *Physics of semiconductor devices*. John wiley & sons.
- Tiwari, G. N., & Dubey, S. (2009). *Fundamentals of photovoltaic modules and their applications*. Royal Society of Chemistry.
- Toranzos, V. (2010). Field measurement of IV curves of PV modules and arrays. Master's thesis, UNSa.
- Tsuno, Y., Hishikawa, Y., & Kurokawa, K. (2009). Modeling of the IV curves of the PV modules using linear interpolation/extrapolation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(6), 1070-1073.
- Villalva, M. G., & Gazoli, J. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 24(5), 1198-1208.
- Wang, G., Zhao, K., Shi, J., Chen, W., Zhang, H., Yang, X., & Zhao, Y. (2017). An iterative approach for modeling photovoltaic modules without implicit equations. *Applied energy*, 202, 189-198.
- Wolf, M. and Rauschenbach, H. (1961). Series resistance effects on solar cell measurements. *Advanced Energy Conversion*, 3:455–479.
- Yahya-Khotbehsara, A., & Shahhoseini, A. (2018). A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach. *Solar Energy*, 162, 403-409.
- Yordanov, G. Midtgård, O. and Saetre, T. (2012). Series resistance determination and further characterization of c-Si PV modules. *Renewable Energy*, 46:72–80.
- Zhao, D., Wang, C., Song, Z., Yu, Y., Chen, C., Zhao, X., & Yan, Y. (2018). Four-terminal all-perovskite tandem solar cells achieving power conversion efficiencies exceeding 23%. *ACS Energy Letters*, 3(2), 305-306.

THIN FILM MODULE ELECTRICAL CHARACTERIZATION AND PARAMETERS EXTRACTION

Abstract. *In last years, thin-film technology has shown a regular increase in the photovoltaic global market. In this paper we present analytically a simple method to be applied for thin-film PV module characterization with electrical model parameters extraction. Experimentally, we set out three different types of modules to retrieve experimental IV curves and compared the results with p-crystalline technology as reference. Taking together our results, we conclude that this method adjusts properly to every case tested and thus can be easily used to carry out translations to standard test conditions.*

Key words: *Solar Energy, Photovoltaic, Electrical Characterization.*