

MEDICIÓN DE LAS CURVAS I-V A OSCURAS DE LAS CELDAS DE UN MÓDULO FOTVOLTAICO

L. De Bernardez¹, R.H. Buitrago^{2,3}, M. Battioni², M. Cutrera², G. Risso³, B. Gottlieb².

(1) Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral, Campo Universitario, El Pozo, 3000 Santa Fe. Tel 0342-457-5244/46. E-mail : ldeberna@pilar-ciudad.com.ar.

(2) Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), Universidad Nacional del Litoral – CONICET, Güemes 3450, 3000 Santa Fe. Tel/Fax: 0342-455-9174/77, E-mail: rbuitre@intec.unl.edu.ar.

(3) Departamento de Física, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Sgo. Del Estero 2829, 3000 Santa Fe. Tel.:0342-457-1164. E-mail: rbuitre@intec.unl.edu.ar.

RESUMEN: Se desarrolló un método de medición directa para obtener las curvas I-V a oscuras de celdas individuales de un módulo fotovoltaico sin necesidad de desarmarlo. Se verificó experimentalmente la validez del método y se utilizó un modelo de circuito eléctrico de simulación, que permite analizar el efecto de los diferentes parámetros de las celdas sobre las características eléctricas de los módulos y vincular los mismos con los posibles mecanismos de degradación.

Palabras claves: Curva I-V a oscuras – Degradación – Modelos eléctricos – Módulo fotovoltaico

1. INTRODUCCIÓN

La conversión fotovoltaica es uno de los métodos de aprovechamiento de la energía solar más utilizados en la actualidad. Las celdas solares son los elementos básicos que conectados en serie constituyen los módulos o paneles fotovoltaicos. Algunas empresas fabricantes de dispositivos aseguran una vida útil de más de 25 años, por lo que resulta de fundamental importancia predecir su vida media antes de la falla (MLBF) a fin de poder conocer el tiempo en servicio para cada elemento de una instalación generadora y por lo tanto el costo real del kW-h producido.

La pérdida en la eficiencia de generación, o degradación de los paneles fotovoltaicos, puede considerarse asociada a diversos factores. La interpretación de la mayor parte de los procesos de degradación puede hacerse planteando un modelo eléctrico para la celda como el de la figura 1. En este modelo se incluye una fuente de corriente, una resistencia serie, una resistencia paralelo, y dos diodos. Uno de estos diodos tiene en cuenta la corriente de difusión y el otro la de recombinación en la juntura. Los procesos de degradación de los paneles pueden asociarse a uno o varios de los siguientes factores:

1. Pérdidas ópticas y laminaciones en el polímero encapsulante (Glick, 2001; King et al., 1999)
2. Incremento de las resistencias serie debido a fallas de contacto (King et al., 1999; Meyer y Dyk, 2003)
3. Disminución de las resistencias paralelo de las celdas (Meyer y Dyk, 2003; Meyer y Dyk, 2000)
4. Variación de los factores de idealidad de diodo (El-Tahchi et al., 2000)
5. Variación de las corrientes de saturación de los términos de diodo (Dadu et al., 2001)

En un trabajo previo se estudió y desarrolló un método para la medición de las resistencias paralelo de cada celda, de un módulo instalado en campo, verificándose que la disminución del valor de las resistencias afecta sensiblemente la potencia del mismo (De Bernardez y Buitrago, 2004). En este trabajo se presenta un método novedoso para la medición de las curvas I-V a oscuras de las celdas integrantes de un módulo fotovoltaico, sin producir daño alguno al módulo. A partir de estas curvas se calculan los parámetros característicos de los diodos que representan a la celda y se predice mediante la simulación con un circuito eléctrico la dependencia que tendrían el Factor de Llenado y la eficiencia de conversión de un módulo en relación a estos parámetros.

2. MODELO ELÉCTRICO

2.1 FORMALISMO MATEMÁTICO

El flujo de fotones que inciden sobre una celda solar genera pares electrón-hueco que son separados por el campo eléctrico en la juntura del semiconductor produciendo una corriente eléctrica. Esta corriente estará dada por la intensidad de la radiación luminosa y la eficiencia cuántica del dispositivo y disminuirá con las pérdidas de radiación por absorción y reflexión en la capa protectora, por las pérdidas por recombinación de portadores y por la existencia de resistencias parásitas en serie y paralelo con la juntura.

Como modelo de una celda solar, que considera la mayoría de estos procesos, se adoptó el circuito eléctrico que se muestra en la figura 1. Este modelo permite obtener una excelente aproximación de las características eléctricas de una celda fotovoltaica (Wagner, 2000).

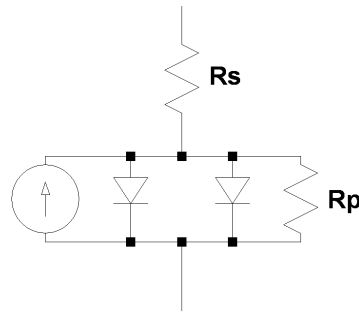


Fig. 1: Modelo eléctrico de una celda solar

La corriente producida por una celda se expresa entonces por la ecuación:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(e \frac{V + IR_s}{n_d k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(e \frac{V + IR_s}{n_r k T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

Siendo:

I:	Corriente que circula por Rs	n_r :	Factor de idealidad del diodo de recombinación
V:	Tensión externa de la celda	e:	Carga del electrón $e = 1,60217733 \cdot 10^{-19}$ Cb
I_{ph} :	Fotocorriente de la celda	k:	Constante de Boltzman $k = 1,380658 \cdot 10^{-23}$ JK ⁻¹
I_{s1} :	Corriente inversa de saturación por difusión	T:	Temperatura absoluta
n_d :	Factor de idealidad del diodo de difusión	R_p :	Resistencia paralelo
I_{s2} :	Corriente inversa de saturación por recombinación	R_s :	Resistencia serie

Obsérvese que en esta ecuación el primer término es una fuente de corriente, que corresponde a la fotocorriente I_{ph} generada por la celda. El segundo y tercero representan a los términos de difusión y recombinación de los diodos, tanto en la región de carga espacial como en las interfases y superficie. También se incluyen las resistencias serie y paralelo que representan las pérdidas parásitas adicionales.

Para formar un módulo de “m” celdas, se planteó como modelo eléctrico la conexión en serie de “m” circuitos como el mostrado en la figura 1. Para resolver el circuito eléctrico se utilizó el conocido modelo SPICE (Krč et al, 2002). Se obtienen así las curvas características I-V y se pueden analizar los efectos de cada uno de los parámetros utilizados.

2.2 EFECTO DE LA DIFUSIÓN Y RECOMBINACIÓN

Entre los factores que se han relacionado con la degradación de celdas o paneles fotovoltaicos se encuentra el factor de idealidad de diodo (Meyer y Dyk, 2003; El-Tahchi et al., 2000). Cuando se plantea un modelo de dos diodos para ajustar las curvas I-V de una celda, es usual considerar que uno de ellos tiene un factor de idealidad de diodo igual a 1 que, de acuerdo a la teoría de Shockley basada en la difusión de portadores minoritarios, implica una juntura casi ideal (Shockley, 1949). Si el otro diodo tiene en cuenta la recombinación en la región de carga espacial, su factor de idealidad debiera ser igual a 2. Sin embargo éste último es el utilizado para el ajuste, y por lo tanto puede tomar valores diferentes de acuerdo a la posible degradación de la celda. Se ha reportado que valores altos del factor de idealidad están relacionados con la degradación de las propiedades eléctricas de la juntura. (El-Tahchi, 2000).

Para determinar el efecto de las variaciones del factor de idealidad de diodo sobre la eficiencia y el Factor de Llenado (FF) de un módulo se resolvió el modelo eléctrico del panel, mediante el programa SPICE, considerando un factor de diodo $n_d = 1$ para la corriente de difusión y variando el correspondiente a la corriente de recombinación (n_r).

Se configuró un módulo compuesto por 33 celdas conectadas en serie con los siguientes valores iniciales:

$R_p = 400 \Omega$ para cada celda	$n_r = 2$
$I_{ph} = 3.0$ A	$I_{s2} = 1.0 \times 10^{-4}$ A
$n_d = 1$	$T = 315$ °K
$I_{s1} = 1.0 \times 10^{-9}$ A	

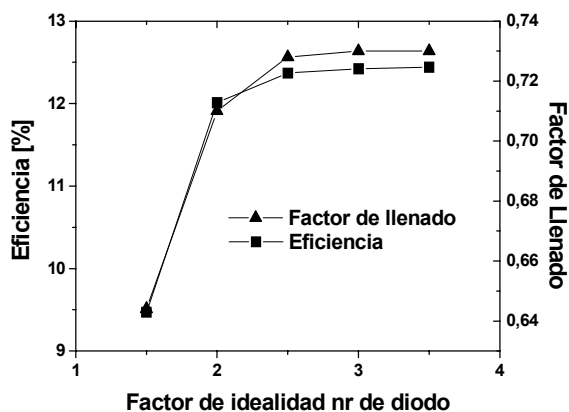


Figura 2: Variación del Factor de Llenado y la eficiencia con el incremento del factor de idealidad de diodo

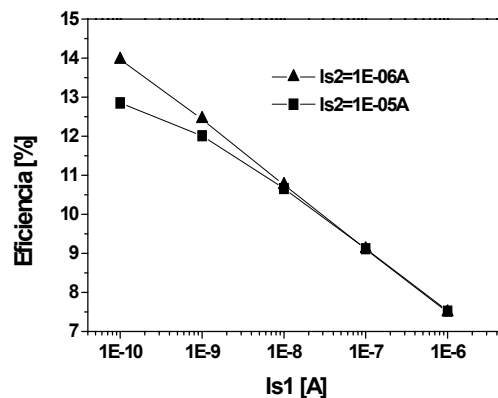


Figura 3: Variación de la eficiencia con el incremento de Is1 para dos valores de Is2

En la figura 2 se muestra la variación de la eficiencia y el Factor de Llenado correspondientes al módulo en función del factor de idealidad n_r del diodo. Como puede verse, a medida que se incrementa n_r , tanto la eficiencia como el FF aumentan, resultado contrario al esperado. Este resultado implica que, a pesar de que el factor de idealidad de diodo se incrementa con la degradación de las celdas (El-Tahchi et al., 2000) su efecto directo sería un incremento de la eficiencia y el FF.

Sin embargo, una posible explicación de la disminución de la eficiencia y el FF que aparecen vinculados a los procesos de degradación podría encontrarse en la variación de las corrientes de saturación de diodo, que por otra parte están físicamente relacionadas a los factores de idealidad (El-Tahchi et al., 2000). Se utilizó nuevamente el modelo eléctrico para simular la correlación entre la eficiencia y el FF con las corrientes de saturación. En la figura 3 se muestra la variación de la eficiencia con la corriente de saturación de difusión (I_{s1}) para dos valores de corriente de recombinación (I_{s2}) según los resultados obtenidos del modelo eléctrico. Como puede verse, a medida que I_{s1} aumenta la eficiencia disminuye. Para bajos valores de I_{s1} es más marcado el efecto de la variación de I_{s2} . Estos resultados muestran que la degradación de una celda o panel estaría vinculada con el incremento de las corrientes de saturación antes que con el factor de idealidad de diodo. Para el FF se encuentra una variación similar.

El modelo planteado permite tratar en forma independiente cada uno de los parámetros de la ecuación 1, aún cuando éstos puedan estar físicamente vinculados, y encontrar su relación con las características eléctricas del panel.

3. METODO DE OBTENCION DE LAS CURVAS I-V DE CADA CELDA

3.1 CURVA I-V PARTE DIRECTA

Debido a la importancia de conocer los parámetros característicos de las celdas, ya que influyen sensiblemente sobre la eficiencia y el Factor de Llenado del panel, se ha desarrollado un método simple para obtener las curvas I-V de cada celda individual de un panel fotovoltaico sin necesidad de desmontarlo. A partir de estas curvas I-V se puede obtener tanto el factor de idealidad como las corrientes de saturación de diodo. Estos parámetros, junto a la resistencia paralelo, permiten definir completamente a cada una de las celdas de un panel. Además, el estudio de su evolución en el tiempo permitiría encontrar los principales mecanismos de degradación y en principio predecir cual sería la vida media del panel. Si la evolución temporal de estos parámetros permite extrapolarlos, resultaría posible con los valores extrapolados predecir el momento en que la eficiencia o el FF caerán por debajo de un valor económicamente aceptable.

Para obtener la curva I-V de una celda individual de un panel se requiere efectuar los siguientes pasos:

1. Medir la curva I-V del panel iluminado para valores de tensión superiores a V_{oc} . Para ello debe utilizarse una fuente de tensión variable conectada en serie con el panel e ir incrementando la tensión, con polaridad en oposición a la del módulo, hasta una corriente medida del orden de 500 mA.
2. Efectuar el ajuste de la curva Tensión-Corriente con una función cuadrática o cúbica (figura 4) y registrar los valores de las constantes del ajuste. El ajuste con una función cuadrática sería:

$$V = aI^2 + bI + c \quad (2)$$

Donde a, b y c son constantes. El valor de b corresponde a la resistencia serie del panel iluminado. La curva V-I no es lineal debido a los términos de diodo (ver figura 1 y ecuación 1). La desviación de la linealidad puede ser ajustada por una función cuadrática o cúbica que permiten una aproximación suficiente.

3. Cubrir una de las celdas del panel y medir la curva I-V para valores superiores a V_{oc} , en forma igual al punto 1 hasta que la corriente sea del orden de 500 mA.
4. Calcular la tensión aplicada sobre la celda con la siguiente expresión

$$V_c = V - \left[\frac{(m-1)a}{m} I^2 + \frac{(m-1)b}{m} I + Voc' \right] \quad (3)$$

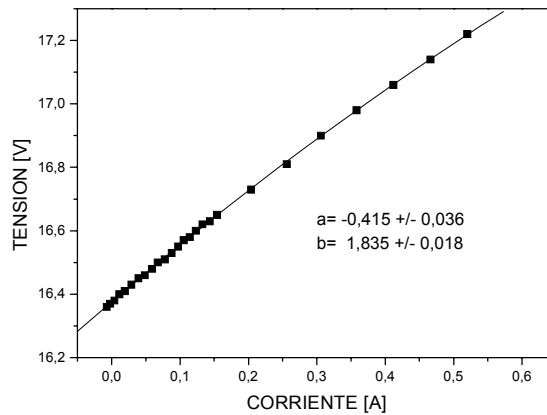
Siendo:

V_c : Tensión corregida

V : Tensión medida sobre el panel

Voc' : Tensión de circuito abierto con la celda tapada medida en el cruce por cero de la corriente

m : Número de celdas del módulo



4: Curva V-I de un módulo iluminado para tensiones mayores a Voc . Los parámetros de ajuste a y b son los correspondientes a la ecuación 3

La ecuación 3 considera que todas las celdas iluminadas del panel contribuyen con una resistencia serie promedio, pero no necesariamente implica el resto de los parámetros de la ecuación 1 tenga valores similares para cada celda, ya que la corrección cuadrática es pequeña según puede verse en la figura 4. El factor $(m-1)/m$ tiene en cuenta que las celdas activas en el panel son ahora $m-1$, ya que hemos cubierto una de ellas. A partir de la tensión calculada y la corriente medida se obtiene la parte de la curva I-V correspondiente a tensiones positivas (diodo en directa) de la celda a oscuras.

3.2 CURVA I-V PARTE INVERSA

Esta parte corresponde a la corriente obtenida en un diodo cuando la polaridad de la tensión aplicada es inversa a la de éste. Para determinarla en una celda integrada en un módulo, basta simplemente con tapar completamente la celda y medir la curva I-V normal del panel. Estas curvas corresponden a la corriente inversa de diodo, ya que cuando se cubre una celda en un panel iluminado, ésta se polariza en forma inversa, siendo la tensión aplicada a la celda igual a la tensión generada por el resto de las celdas del panel (Kawamura 2003).

Recordemos que como se explicó en el punto anterior si aplicamos potenciales mayores a Voc entramos en la parte directa de la curva del diodo.

La curva inversa de un diodo puede representarse con la siguiente expresión (Quaschnig, 1995)

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{n k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{n k T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} - \alpha (V + IR_s) \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_{Br}} \right)^{-\gamma} \quad (4)$$

El último término en la expresión (4) corresponde a la ruptura por avalancha para altos valores negativos de V .

Los nuevos parámetros respecto a la ecuación 1 son

V_{Br} : tensión de ruptura V_{Br} varía entre 15 y 50 V

α : factor de corrección

γ : Exponente para la ruptura de avalancha

Resumiendo, si a un panel iluminado con una celda cubierta se le toma su curva I-V, tanto para valores de tensión menores como mayores a Voc' , se obtiene una curva como la de la figura 5, donde la parte $V < Voc'$ se corresponde con la inversa del diodo de la celda y la parte $V > Voc'$, a la directa con las correcciones descriptas en este trabajo.

4. RESULTADOS

Para verificar experimentalmente la validez del método propuesto se tomaron las curvas I-V de un panel con una celda adicional en serie (N° 34), de iguales características a las que integraban el panel. En primer lugar se tomaron las mediciones con la celda 34 cubierta para diferentes condiciones de insolación del panel (normal y media sombra).

En la figura 6 se presentan las curvas escaladas, incluyendo la curva I-V a oscuras de la celda 34 medida independientemente, de forma tal que la corriente medida sea cero a la misma tensión, correspondiente a V_{oc} del panel expuesto a insolación normal.

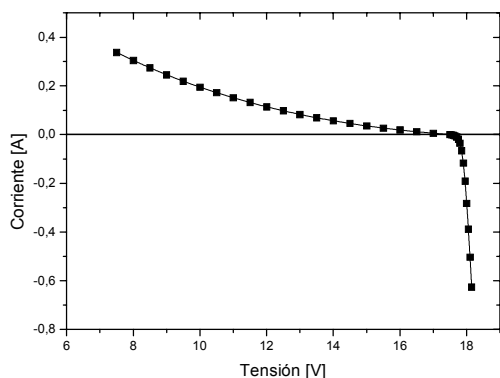


Figura 5: Curvas I-V de un módulo con una celda cubierta. La tensión para $I=0$ corresponde a V_{oc}

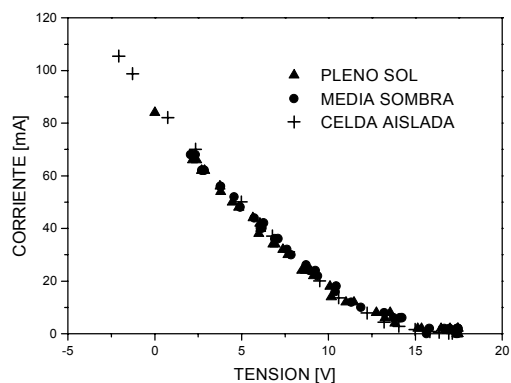


Figura 6: Curvas I-V de celda 34 cubierta en serie con el panel. Se incluye la curva para la celda aislada

La coincidencia de las tres curvas prueba claramente que la forma de la curva I-V de un módulo con una celda tapada corresponde a la parte inversa de la curva I-V de la celda.

Con la ecuación (3) se pueden calcular los valores de tensión sobre la celda y reconstruir su curva I-V directa a oscuras. El valor de V_{oc} a utilizar en la ecuación es el del cruce por cero de la corriente correspondiente a cada celda tapada.

En la figura 7 se presenta la curva I-V calculada de acuerdo al método propuesto y la medida para la celda 34 a oscuras. La línea llena corresponde al ajuste de la curva calculada de acuerdo a la ecuación (1) con $I_{ph}=0$ y despreciando los términos I_{Rs} ya que la corriente es pequeña (menor a 500 mA) y R_s es típicamente del orden de 0.03Ω . Los valores de los parámetros obtenidos del ajuste también se incluyen en la figura. Como puede verse, las curvas I-V calculada y medida son prácticamente coincidentes, lo cual muestra la validez del método planteado.

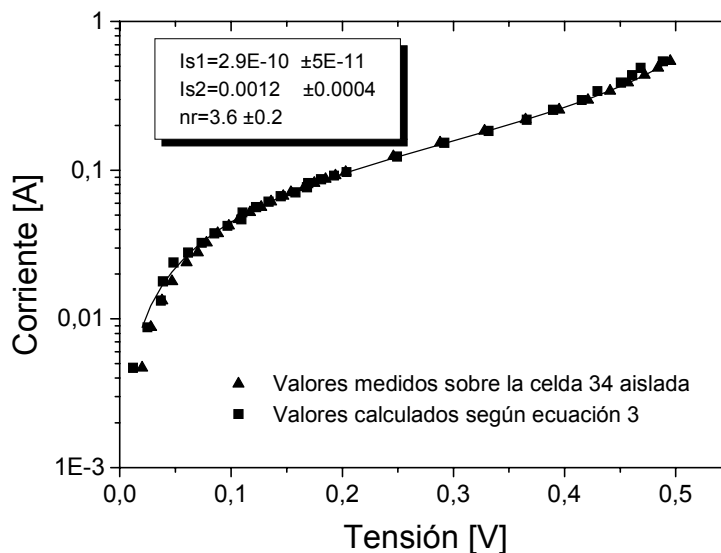


Figura 7: Comparación entre la curva I-V obtenida según el método propuesto para la celda 34 en serie con el panel 6 y la medida sobre la celda aislada

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método simple que permite la determinación de la curva I-V a oscuras de celdas individuales de un panel fotovoltaico sin necesidad de desmontarlo. Se verificó el método experimentalmente conectando una celda externa

calibrada en serie con el módulo. Se encontró que la curva I-V obtenida por el método propuesto coincide con la obtenida midiendo la tensión y la corriente sobre la celda.

A partir de las curvas I-V a oscuras se pueden obtener tanto el factor de idealidad como las corrientes de saturación de diodo. Estos parámetros, sumados a la resistencia paralelo, permiten caracterizar a las celdas de un panel y observar su degradación en servicio a través del tiempo.

6. REFERENCIAS

- Dadu M., Kapoor A. y Tripathi K.N. (2001). Effect of variation of I_{o1}/I_{o2} on short-circuit current and fill factor of a real solar cell having resistive and current leakage losses. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 69, 353.
- De Bernardes L.S y Buitrago R.H. (2004). Enviado para su publicación en *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
- El-Tahchi M., Khoury A., De Labardonnie M., Mialhe P. y Pelanchon F. (2000). Degradation of the diode ideality factor of silicon n-p junctions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 62, 393.
- Glick S.H. (2001). NCPV Program Review Meeting October 21st.
- Kawamura H., Naka K, Yonekura N., Yamanaka S., Kawamura H., Ohno H. y Naito K. (2003). Simulation of I-V characteristics of PV modules with PV shaded cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 75, 613.
- King D.L, Quintana M. A., Kratochvil J. A., Ellibee D. E. y Hansen B. R. (1999). Photovoltaic Module Performance and Durability following long-term field exposure. Sandia National Laboratories report, Albuquerque, NM.
- Krč J., Stiebig H., Smole F. y Topič M. (2002). Examination of transient behavior and design of dynamic SPICE model of a-Si:H PIN structure. *Journal of Non-Crystalline Solids* 299–302, 1295–1299.
- Meyer E.L. y Dyk E.E. van. (2003). Characterization of degradation in thin-film photovoltaic module performance parameters. *Renewable Energy* 28, 1455.
- Meyer E.L. y Dyk E.E. van. (2000). Degradation analysis of silicon photovoltaic modules. 16th EPVSEC, Glasgow, UK, May 10th.
- Quaschnig V. y Hanitsch R. (1995). Numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells. 30th Universities Power Engineering Conference, Greenwich, Sept. 5-7, 583-586
- Shockley W. (1949). *Bell Systems Tech. J.* 28 435.
- Wagner A. (2000). Peak-power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions. EuroSun 2000, Copenhagen Jun 19-22.

DARK I-V MEASUREMENT OF PHOTOVOLTAIC MODULE CELLS

ABSTRACT: A simple method of obtaining the dark I-V curves of a single cell in a photovoltaic module was developed. The method does not require disassembling the module and was experimentally verified. A simulation model was used to analyze the cell parameters effects on the module electrical characteristics and relate them with possible degradation mechanisms

Keywords: Dark I-V curve – Degradation – Electric models – Photovoltaic module