

## ESTUDIO DE LA CURVA I-V DE CELDAS INDIVIDUALES EN PANELES FOTOVOLTAICOS

L. De Bernardez<sup>1</sup>, R.H. Buitrago<sup>2,3</sup>, M. Battioni<sup>2</sup>, M. Cutrera<sup>2</sup>, G. Risso<sup>3</sup>.

(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](mailto: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](mailto: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](mailto:rbuitre@intec.unl.edu.ar).

**RESUMEN:** Se desarrolló un método para la obtención de las curvas IV de cada una de las celdas de un panel solar fotovoltaico sin necesidad de desarmar el mismo. A partir de dichas curvas se determinaron parámetros físicos: corrientes de saturación y factor de idealidad de diodo de las celdas mediante el ajuste a un modelo teórico. Se verificó el método midiendo en forma directa las curvas IV a oscuras de las celdas de un panel accediendo a las mismas a través del laminado.

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

### 1. INTRODUCCIÓN

La detección temprana de evidencias de degradación en las celdas que constituyen un Módulo Fotovoltaico, es de gran interés para determinar la Vida Media antes de la Falla o la Vida Media en Servicio del Panel, de modo que se pueda establecer con mayor seguridad el verdadero costo del Kw-h generado.

La degradación de los paneles fotovoltaicos se puede asociar a diversos factores, algunos se originan en el proceso de armado, como la polimerización del encapsulante o fallas en los contactos (Glick, 2001; King et al., 1999; Meyer y Dyk, 2003). Otros factores se originan en las celdas (Meyer y Dyk, 2000; Tahchi et al., 2000) e incluyen los factores de idealidad de diodo (El-Tahchi et al., 2000) y las corrientes de saturación de los términos de diodo (Dadu et al., 2001)

Un cambio en el tiempo de estos parámetros podría significar el comienzo de la degradación del módulo y permitiría correlacionarlo con la Vida Media antes de la Falla

En un trabajo previo (De Bernardez et al. 2004) se desarrolló un método para obtener los parámetros eléctricos de cada celda individual de un panel mediante un ensayo no destructivo. En este trabajo se verifica este método comparando las curvas I-V de celdas individuales obtenidas con el método propuesto con las obtenidas accediendo en forma directa a las celdas a través del laminado. También se obtuvieron de las curvas los parámetros eléctricos de las celdas.

### 2. MODELO ELÉCTRICO

El modelo eléctrico de una celda fotovoltaica se muestra en 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.

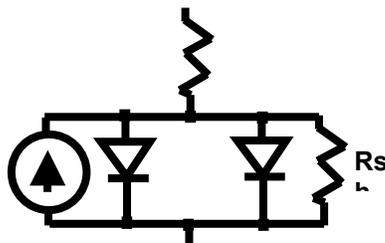


Fig. 1: Modelo eléctrico de una celda solar

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

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left[ \exp \left( \frac{e(V + IR_s)}{n_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{S2} \left[ \exp \left( \frac{e(V + IR_s)}{n_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

donde I: corriente eléctrica que circula a través de  $R_s$ ; V: tensión sobre la celda;  $I_{ph}$ : fotocorriente;  $I_{S1}$ : corriente de difusión de diodo;  $n_1$ : factor de idealidad de diodo de difusión;  $I_{S2}$ : corriente de recombinación de diodo;  $n_2$ : factor de idealidad de diodo de

recombinación; e: carga del electrón  $1.60217733 \times 10^{-19}$  Cb; k: constante de Boltzmann  $k=1.380658 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>; T: temperatura absoluta; Rsh: resistencia shunt; Rs: resistencia serie. Para formar un módulo de “m” celdas, el modelo eléctrico es simplemente la conexión en serie de “m” circuitos como el mostrado en la figura 1. Mediante este modelo se pueden simular las características de un módulo fotovoltaico. Para resolver el circuito eléctrico se utilizó el conocido modelo SPICE [Krč 2002]. De esta forma se obtienen las curvas características I-V y se pueden analizar los efectos de cada uno de los parámetros utilizados.

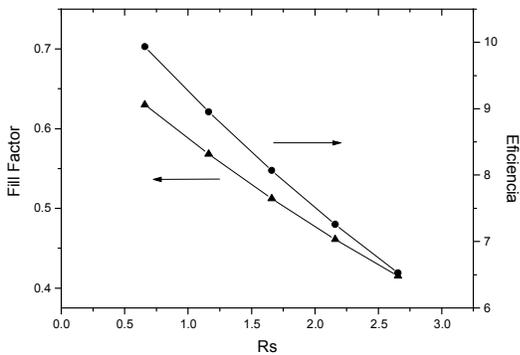


Figura 2: Variación de la eficiencia y el FF de un módulo en función de la resistencia serie

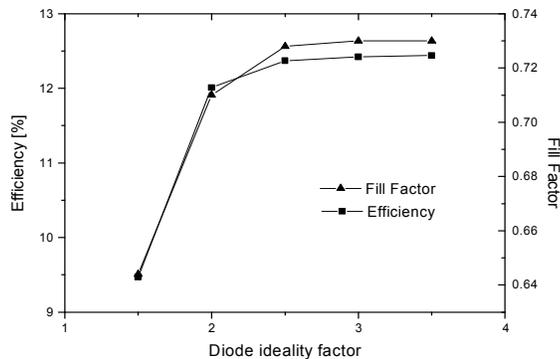


Figura 3: Variación del Fill Factor y la eficiencia con el incremento del factor de idealidad de diodo

Para determinar el efecto de la variación de la resistencia serie, el valor de Rs de una de las celdas se fue modificando en incrementos de 0.5 Ω y el valor de la resistencia serie total del panel se calculó entonces según: [Stutenbaeumer y Mesfin 1999]

$$R_s = \frac{(V - V_{oc})}{I_{sc}} \quad (2)$$

siendo V: Tensión aplicada al panel a oscuras que produce una corriente igual a la de cortocircuito con el panel iluminado; Voc: Tensión de circuito abierto del panel iluminado; Isc: Corriente de cortocircuito del panel iluminado. Con el modelo eléctrico se obtuvo el valor de la potencia máxima generada y la eficiencia del módulo.

En la figura 3 se muestra la variación de la eficiencia y el Fill Factor en función del factor de idealidad de diodo de recombinación, ya que se considera que  $n_d=1$ . Como puede verse, a medida que se incrementa  $n_r$ , tanto la eficiencia como el FF aumentan pero por encima de 2.5 se mantienen prácticamente constantes.

Los términos de diodo podrían ser responsables de la disminución de la eficiencia y el FF a través de las corrientes de saturación  $I_{s1}$  e  $I_{s2}$ . Para verificarlo se utilizó nuevamente el modelo eléctrico para encontrar las variaciones de la eficiencia y el FF en función de las corrientes de saturación de difusión y recombinación ( $I_{s1}$  e  $I_{s2}$ ).

En las figuras 4 a 7 se muestran las variaciones de la eficiencia y el Fill Factor con las corrientes de saturación de difusión ( $I_{s1}$ ) y recombinación ( $I_{s2}$ ) según los resultados obtenidos del modelo eléctrico.

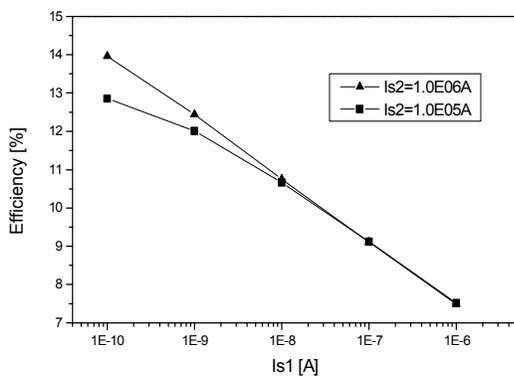


Figura 4: Variación de la eficiencia con  $I_{s1}$

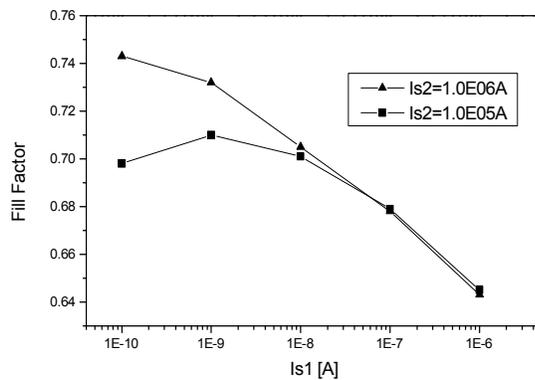


Figura 5: Variación del Fill Factor con el incremento de  $I_{s1}$

Como puede verse, a medida que las corrientes de saturación y recombinación aumentan, tanto la eficiencia como el Fill Factor disminuyen. Para bajos valores de  $I_{S1}$  es más marcado el efecto de la variación de  $I_{S2}$ . Estos resultados indican que la degradación de una celda o panel estaría vinculada con el incremento de las corrientes de difusión y recombinación de los términos de diodo

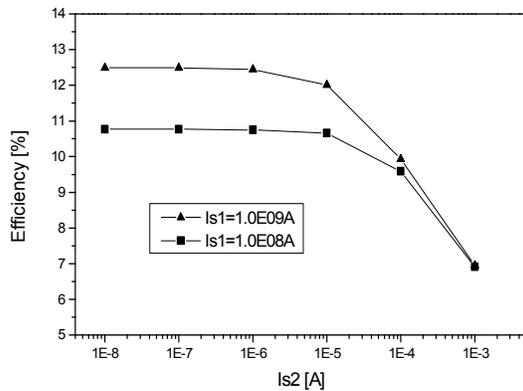


Figura 6: Variación de la eficiencia con  $I_{S2}$

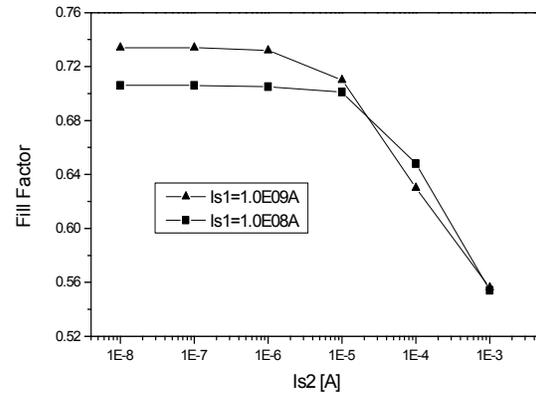


Figura 7: Variación del Fill Factor  $I_{S2}$

### 3. CURVA I-V A OSCURAS

Las curvas I-V de cada celda de un panel pueden obtenerse utilizando un método sencillo sin necesidad de desarmarlo [De Bernardez y Buitrago 2005] El método permite corregir las curvas I-V a oscuras obtenidas para una celda individual (figura 8) y puede utilizarse para obtener las curvas I-V de cada una de las celdas del panel. De las curvas I-V se obtiene el factor de idealidad del diodo y las corrientes de saturación mediante el ajuste de la curva medida con el modelo antes mencionado.

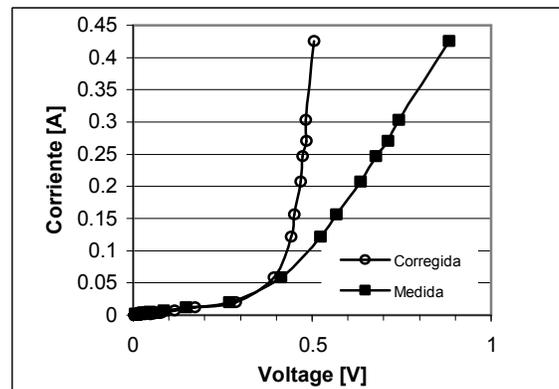


Figura 8: Curva IV a oscuras para una celda individual. a) según se mide, b) corregida.

### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se efectuaron medidas experimentales sobre un panel cristalino de 33 celdas de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Se usó un Simulador Solar Estacionario clase A.

Las curvas IV se obtuvieron mediante un sistema electrónico de adquisición que necesita solo 5 segundos para adquirir más de 50 puntos.

Antes de ser expuestos a la luz, los paneles se mantuvieron a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La figura 9 verifica la coincidencia de las curvas IV de las celdas obtenidas con el método propuesto y las medidas en forma directa a través del laminado.

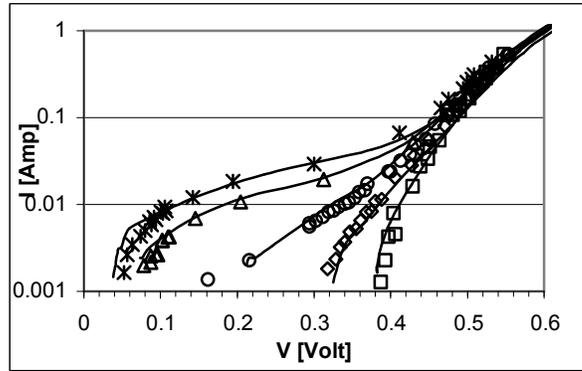


Figura 9: Líneas sólidas: curvas IV medidas, Símbolos: curvas IV determinadas por el método propuesto.

Las curvas obtenidas mediante el método propuesto fueron ajustadas con la ecuación 1. A partir de las curvas I-V se obtuvieron los valores de la tabla 1.

Celdas del panel	11	33	15	1	18	23	19
$I_{S1}$ [A]	1.1E-10	1.2E-09	1.8E-09	5.0E-10	1.5E-09	4.6E-10	5.4E-10
nd	1	1	1	1	1	1	1
$I_{S2}$ [A]	1.0E-05	8.0E-06	2.6E-04	1.0E-05	6.0E-05	1.0E-05	4.3E-06
nr	2.2	2.3	4.1	2.4	3.7	2.4	2.1
Rsh [ohm]	433	16	34	11	297	426	2694

Tabla 1: Parámetros obtenidos del modelo.

En la figura 10 se presenta la relación entre los valores de  $I_{S1}$  e  $I_{S2}$  de la Tabla 1, lo que parece indicar también una relación entre los mecanismos que producen la variación de estos parámetros.

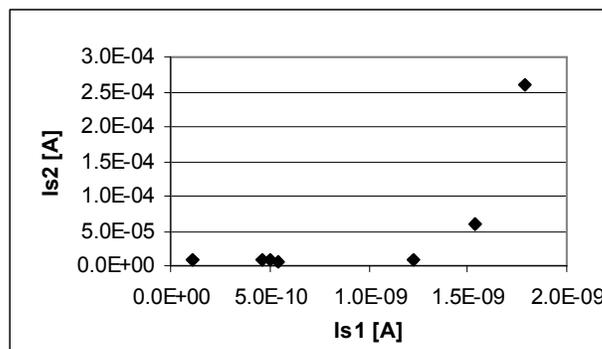


Figura 10: Relación entre  $I_{S2}$  e  $I_{S1}$

El seguimiento en el tiempo de la variación de las curvas I-V de las celdas individuales de un panel y por lo tanto de los parámetros característicos permitiría conocer su evolución y determinar la Vida Media antes de la Falla.

## 5. CONCLUSIONES

Se verificó la factibilidad de un método que permite la obtención de parámetros físicos que caracterizan las celdas fotovoltaicas, mediante un ensayo no destructivo de módulos.

La determinación de la variación de estos parámetros con el tiempo de exposición a las condiciones ambientales y su posible correlación con la eficiencia de los módulos es de suma importancia ya que un cambio en el tiempo de los parámetros podría significar el comienzo de la degradación del módulo y permitiría correlacionarlo con la Vida Media antes de la Falla

## 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 Bernardez LS, Buitrago RH., Cutrera M., Battioni M., Risso G., Gottlieb B. (2004). Método para la evaluación y control de la degradación de paneles fotovoltaicos. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 7
- De Bernardez LS, Buitrago RH., Battioni M., Cutrera M., Risso G., Gottlieb B. (2004). Medición de las curvas I-V a oscuras de las celdas de un módulo fotovoltaico AVERMA Vol 8, Nro 1. pag. 04.07
- De Bernardez LS, Buitrago RH (2005) Dark I-V Curve Measurement of Single Cells in a Photovoltaic Module. Aceptado para su publicación en *Progress in Photovoltaics*
- 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
- Stutenbaeumer U y Mesfin B. (1999) Equivalent model of monocrystalline, polycrystalline, and amorphous silicon solar cells. *Renewable energy*, 18, 501

**ABSTRACT:** a method for obtaining the individual IV curves of the solar cells of a photovoltaic module without disassembling it was developed. Physical parameters: Diode ideality factor and Saturation currents were determined by fitting with a theoretical model. The method was verified by direct determination of the individual dark IV curves through the module laminate