

# ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE CELDAS Y PANELES FOTOVOLTAICOS CON PC1D Y MODELO DE DOS DIODOS

L.S. 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 analizaron las curvas I-V a oscuras de celdas solares y módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino, expuestos a la intemperie por 8 años, mediante el modelo de dos diodos y la simulación con PC1D. Si bien las curvas IV presentaban diferencias notables, en el conjunto de parámetros analizados se encontró que el incremento de la corriente de saturación de recombinación, obtenida ajustando las curvas con el modelo de dos diodos, está relacionado a la disminución de la vida media de recombinación de portadores en la zona de la juntura, estimada por PC1D.

**Palabras claves:** Curva I-V – Degradación – Modelos de simulación – Módulo fotovoltaico

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la Industria Fotovoltaica ha alcanzado un nivel de desarrollo, en cuanto a calidad de los módulos, tal que los períodos de garantía se extendieron en algunos casos ya hasta 30 años. La posibilidad de detectar tempranamente la degradación de la potencia de un módulo fotovoltaico se hace muy importante no solo para predecir su vida media en servicio y por lo tanto estimar la energía generada y calcular el costo del Kw-h producido, sino también para proteger al usuario de posibles fraudes.

Numerosos trabajos se han publicado analizando los factores asociados a la degradación de las celdas fotovoltaicas y de los módulos (Glick, 2001; King et al., 1999; Meyer y Dyk, 2003; El-Tahchi et al., 2000; Dadu et al., 2001).

La caracterización eléctrica de las celdas en forma individual de un panel es dificultosa porque requiere de su desarmado para efectuar las mediciones. Recientemente fue desarrollado un método para la obtención de las curvas I-V a oscuras de las celdas de un módulo fotovoltaico sin necesidad de desarmarlo (De Bernardez et al. 2004 y 2006). Con este método se pueden encontrar diferencias entre las celdas de un panel y seguir su evolución en el tiempo, lo que permitiría predecir la vida media antes de la falla.

En este trabajo se analiza la correlación de los parámetros obtenidos por ajuste de las curvas I-V de celdas individuales de paneles de silicio monocristalino, entre un panel expuesto a la intemperie y funcionando por 8 años y otro de igual marca y calidad producido contemporáneamente por la misma empresa y que no había estado expuesto. Se utilizó el modelo de dos diodos (Stutenbaeumer y Mesfin, 1999) y la simulación numérica con el conocido software PC1D (Basore y Clugston, 1998)

## 2. MODELOS UTILIZADOS Y RESULTADOS

Se configuró el modelo PC1D con los parámetros de diseño de la figura 1. Se utilizaron tres zonas diferenciadas para poder simular adecuadamente todos los factores involucrados, dejando para la región intermedia los efectos vinculados a la juntura pn.

Para comparar las diferentes celdas elegidas, dado que fueron producidas por el mismo fabricante en condiciones similares, se consideró que los perfiles de concentración de dopantes y los espesores de capa son idénticos, planteando sólo la variación de los valores de recombinación en la juntura y superficies. Se simularon entonces las celdas con el modelo PC1D y se ajustaron las curvas I-V a oscuras modificando los valores de recombinación de portadores. Los resultados se presentan en la figura 2. El ajuste de las curvas experimentales y las teóricas es muy bueno.

Se utilizó a continuación el modelo eléctrico de representar a una celda solar como un circuito eléctrico integrado por dos diodos, un generador, una resistencia serie y una en paralelo, con el objetivo de analizar cuál de las propiedades de transporte contempladas por el programa PC1D, determina los cambios en las características eléctricas de las celdas. En la tabla 1 se presentan los valores encontrados para los componentes del circuito. Se puede observar una importante variación entre celdas de la resistencia paralelo  $R_p$ , de las corrientes de diodo y del factor de idealidad de recombinación. Se puede ver en la tabla que la recombinación de portadores en la juntura está relacionada con la corriente y el factor de idealidad de recombinación.

Se ensayaron diversas correlaciones, encontrándose principalmente que la variación de la vida media de recombinación de portadores en la juntura es el factor que más influye, particularmente sobre la corriente de recombinación. En la figura 3 se puede ver la variación de la corriente de recombinación con la vida media de portadores en la juntura, que muestra una variación exponencial.

Area: 100 cm<sup>2</sup> Temperatura: 298 K  
 Contacto de la base: 0.027 Ω  
 Conductor Interno: 1.89x10<sup>-3</sup> S

**REGION 1**

Espesor: 1.2 μm Material de Si.mat  
 Dopaje de la base tipo N: 1x10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>  
 Difusión Frontal Tipo N: 1x10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> (Pico)  
 Recombinación volumen: τ<sub>n</sub> = τ<sub>p</sub> = 0.5 μs  
 Recombinación sup frontal: S modelo S<sub>n</sub> = S<sub>p</sub> = 30000 cm/s

**REGION 2**

Espesor: 0.5 μm Material de Si.mat  
 Dopaje de la base tipo P: 1x10<sup>10</sup> cm<sup>-3</sup>  
 Difusión Frontal Tipo N: 1x10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> (Pico)  
 Difusión Trasera Tipo P: 4x10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup> (Pico)  
 Recombinación volumen: τ<sub>n</sub> = τ<sub>p</sub> = 0.055 μs

**REGION 3**

Espesor: 398 μm Material de Si.mat  
 Dopaje de la base tipo P: 4x10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>  
 Sin Difusión frontal Dif. trasera Tipo P: 1x10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> (Pico)  
 Recombinación volumen: τ<sub>n</sub> = τ<sub>p</sub> = 10 μs  
 Sin Rec. Sup. front. Rec. sup trasera: S<sub>n</sub> = S<sub>p</sub> = 30000 cm/s

Figura 1: Configuración del modelo de simulación PCID

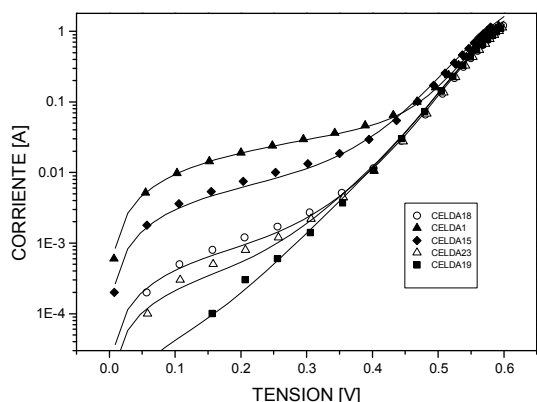


Figura 2: Curvas I-V a oscuras de varias celdas solares. Los símbolos corresponden a valores experimentales y las líneas llenas a la simulación con PCID

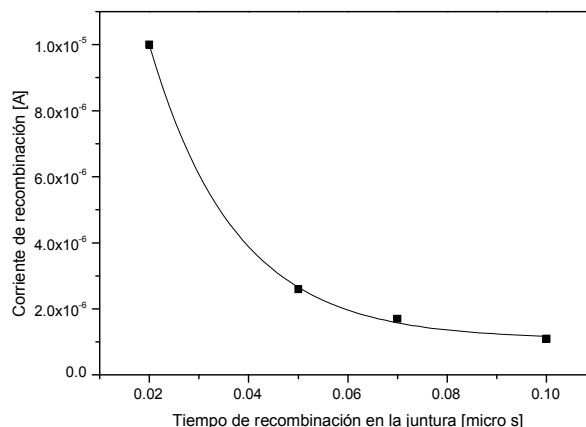


Figura 3: Relación entre la corriente de diodo de recombinación y la vida media de portadores en la junta obtenida de PCID para una celda modelo

Celdas	15	1	18	23	19
I <sub>S1</sub> [A]	1.8E-09	5.0E-10	1.5E-09	4.6E-10	5.4E-10
Nd	1	1	1	1	1
I <sub>S2</sub> [A]	2.6E-04	1.0E-05	6.0E-05	1.0E-05	4.3E-06
Nr	4.1	2.4	3.7	2.4	2.1
Rp [ohm]	34	11	297	426	2694
Tau [micro s]	0.025	0.06	0.06	0.05	0.05

Tabla 1: Parámetros obtenidos de modelos, los primeros 5 del modelo de dos diodos y los tiempos de recombinación del PCID.

Se estudiaron luego dos módulos utilizando los mismos modelos. Se eligió uno que había estado expuesto en un sistema instalado en una escuela rural por 8 años y presentaba una disminución del 20 % en su potencia respecto a un segundo módulo, producido por la misma compañía en el mismo período de tiempo, y que nunca había sido expuesto al sol, ni conectado a carga alguna. Se utilizaron esos módulos esperando encontrar las mayores diferencias, considerando los varios factores involucrados en la pérdida de potencia. Dado que se analizan las curvas I-V a oscuras, no se considera en la comparación el efecto de la pérdida de transmitancia del encapsulado, que también tiene influencia sobre la potencia generada. Al trabajar con valores relativamente bajos de tensión tampoco influyen significativamente los efectos de la variación de resistencia serie. El estudio se orientó a verificar si las correlaciones encontradas en celdas con distinto grado de degradación se daban también en los módulos. Las curvas I-V se presentan en la figura 4 para una celda equivalente de cada módulo. Los valores de ajuste obtenidos por los dos métodos se muestran en la tabla 2, donde se observa que el panel con 8 años de servicio tiene una mayor corriente de recombinación, la cual en principio estaría relacionada a una menor vida media de los portadores en la región de la interfase pn de las celdas. Otra posible contribución podría deberse a la variación de la vida media de portadores en sustratos dopados con boro. Los efectos relativos de algunos de los parámetros, como las corrientes de saturación, sobre la eficiencia y el fill factor fueron analizados en una publicación anterior. (De Bernardes et al. 2005)

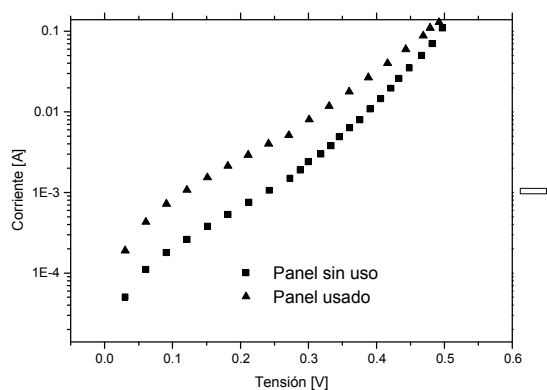


Figura 4: Curvas IV a oscuras de una celda equivalente de un panel sin uso y de uno con 8 años de servicio

Panel	Sin uso	En servicio 8 años
$I_{S1}$ [A]	2.1E-10	7.0E-11
nd	1	1
$I_{S2}$ [A]	2.0E-5	9.0E-05
nr	2.4	2.7
$R_p$ [ohms]	590	173

Tabla 2: Valores de ajuste con modelo de dos diodos de una celda de un panel sin uso y de uno en servicio por 8 años

### 3. CONCLUSIONES

Del análisis de las curvas I-V a oscuras de celdas de un panel fotovoltaico efectuado mediante el modelo de dos diodos y la simulación con PC1D se encontró que el incremento de la corriente de recombinación está relacionado a la disminución de la vida media de recombinación de portadores en la zona de la juntura. Podríamos decir que uno de los mecanismos de degradación de los módulos se relaciona con la disminución en el tiempo de la vida media de recombinación de los portadores en la región de la interfase pn de una celda solar. El seguimiento de la evolución de las curvas I-V a oscuras de celdas, particularmente la variación de la corriente de recombinación en el modelo de dos diodos, sería un parámetro interesante de monitorear en el tiempo, para predecir tempranamente la degradación de las celdas.

### 4. REFERENCIAS

- Basore P.A., Clugston DA. PC1D.5.3.1998- [www.pv.unsw.edu.au/pc1d](http://www.pv.unsw.edu.au/pc1d).
- 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 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 Bernardes LS, Buitrago RH., Battioni M., Cutrera M., Risso G (2005). Estudio de la curva I-V de celdas individuales en paneles fotovoltaicos AVERMA Vol 9. pag. 04.43
- De Bernardes LS, Buitrago RH (2006) Dark I-V Curve Measurement of Single Cells in a Photovoltaic Module. *Progress in Photovoltaics*, 14, 321
- 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.
- 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.
- Meyer E.L. y Dyk E.E. van. (2003). Characterization of degradation in thin-film photovoltaic module performance parameters. *Renewable Energy* 28, 1455.
- Stutenbaeumer U y Mesfin B. (1999) Equivalent model of monocrystalline, polycrystalline, and amorphous silicon solar cells. *Renewable energy*, 18, 501

**ABSTRACT:** Using the two diode model and simulated with PC1D software, dark I-V curves of the solar cells and photovoltaic modules exposed 8 years to the sun were analyzed. Although the I-V curves showed pronounced differences, from the lot of parameters studied, just one correlation was clear. The increase of the saturation recombination current, obtained by fitting of I-V curves using the two diode model, correlate with the decrease of recombination mean life of carrier at the pn interfase estimated by the PC1D method..