

## **EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA SERIE Y PARALELO Y SU INFLUENCIA EN LA PÉRDIDA DE POTENCIA EN UN MÓDULO CON 12 AÑOS DE EXPOSICIÓN**

**M. T. Montero, H. F. Bárcena, F. R. Farfán, C. A. Cadena**  
Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO - CONICET)  
Facultad de Ciencias Exactas – Dpto. de Física  
Consejo de Investigación de la U.N.Sa - CIUNSA  
Universidad Nacional de Salta – Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta  
Tel - Fax 0387-4255489 e-mail: marite@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** En este trabajo se analiza el incremento de la resistencia serie y la disminución de la resistencia paralelo de un módulo que estuvo expuesto por 12 años a la intemperie. Estas medidas son comparadas con las realizadas a un módulo de igual tecnología que no fue expuesto. La metodología utilizada para la medida de estas resistencias se basa en datos que normalmente son otorgados por el fabricante o que se miden en cualquier condición arbitraria sin necesidad que sean los estándares. Del análisis de los resultados se observa que el incremento de la resistencia serie es significativo mientras que el decrecimiento de la resistencia paralelo no lo es.

**Palabras clave:** energía solar, paneles fotovoltaicos, degradación, resistencia serie paralelo.

### **INTRODUCCIÓN**

Un módulo fotovoltaico es diseñado para que su vida útil sea superior a 20 años, pero factores como temperatura, radiación incidente y otros medioambientales, influyen en el rendimiento del mismo.

Además de estos factores existen otros que también afectan el rendimiento de estos dispositivos, ellos son resistencias parásitas que su efecto es tenido en cuenta en el circuito equivalente por una resistencia serie y una paralelo y que son inherentes a los medioambientales.

La resistencia serie tiene en cuenta resistencia en las cadenas de soldadura de las celdas, regiones emisoras y base, metalización de la celda, interconexión en las barras colectoras de las celdas y resistencias en la terminación de la caja de juntura. Aunque los diseñadores de celdas y módulos tratan de minimizar las pérdidas por resistencia serie, los ciclos térmicos diarios de los módulos instalados resulta en un incremento gradual de la misma. El incremento de esta reduce tensión de salida y por consiguiente el factor de forma y por lo tanto su rendimiento.

La resistencia paralelo representa cualquier camino paralelo de alta conductividad a través de la juntura p-n de la celda o en el borde de la misma debido a daños en el cristal e impurezas internas y cerca de la juntura obteniendo como consecuencia caminos paralelos que conducen constantemente corrientes. El decrecimiento de la resistencia paralelo trae como efecto una disminución en el rendimiento del módulo, teniendo su mayor influencia en la zona de bajas tensiones.

### **FUNDAMENTOS**

La corriente entregada a una carga por un diodo semiconductor iluminado es el resultado de dos componentes internas de corriente que se oponen:

- La corriente foto generada o fotocorriente  $I_L$  debida a la generación de portadores que produce la iluminación.
- La corriente de diodo o corriente de oscuridad  $I_D$  debida a la recombinación de portadores que produce la tensión externa necesaria para poder entregar energía a la carga.

Por lo que la corriente neta que circula por el exterior será la suma algebraica de las dos componentes de corriente, si tomamos como hipótesis que el comportamiento de las excitaciones de iluminación y tensión es lineal.

Tomando como positivas las corrientes de generación, podemos escribir la ecuación característica de la celda, la cual es válida en todos los intervalos de funcionamiento.

$$I = I_L - I_D \quad (1)$$

Esta ecuación describe el comportamiento de la corriente de una celda en forma analítica.

Si se considera que la corriente de diodo, en forma simplificada, se la puede expresar mediante el modelo de una exponencial, la ecuación nos queda:

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right) \quad (2)$$

Donde:

- $I$  corriente que entrega la celda solar
- $I_L$  corriente generada o fotocorriente
- $I_D$  corriente de diodo o de oscuridad
- $I_0$  corriente inversa de saturación de una celda solar
- $q$  carga del electrón ( $1,602 \times 10^{-19}$  C)
- $V$  tensión entre los extremos de la celda
- $m$  factor de idealidad ( $1 \leq m \leq 2$ )
- $k$  constante de Boltzman ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K)
- $T$  temperatura absoluta (grados K)

Pero resulta conveniente en la práctica describir este comportamiento en términos de un circuito equivalente, especialmente cuando se trata de estudiar el comportamiento de muchas celdas interconectadas en serie y paralelo, como es el caso de los módulos fotovoltaicos.

Un circuito compuesto por un diodo de unión p-n ideal de corriente de saturación  $I_0$  y factor de idealidad  $m$  y un generador de corriente  $I_L$  se comporta eléctricamente como una celda solar como la descrita por la ecuación (2) y mostrada en la figura 1, siendo este un circuito equivalente del dispositivo intrínseco.

Sin embargo, en una celda solar real existen otros efectos, que no fueron tenidos en cuenta en la ecuación (2) que afectan el comportamiento externo de la misma. Se pueden considerar al menos dos de estos comportamientos (Figura 2):

- los de resistencia serie
- los de fugas de corriente proporcionales a la tensión que suelen caracterizarse por una resistencia paralelo.

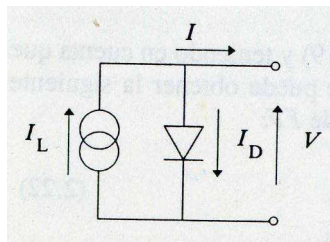


Figura 1: Circuito equivalente del modelo eléctrico para la celda fotovoltaica

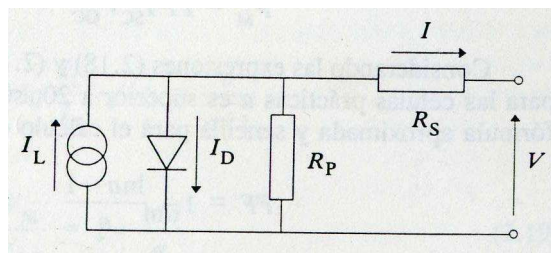


Figura 2: Circuito de una celda en el que se consideran algunas pérdidas intrínsecas

Siendo la ecuación que lo representa

$$I = I_L - I_0 \left( \exp \frac{q(V + IR_S)}{mkT} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (3)$$

Donde:

- $R_S$  resistencia serie
- $R_p$  resistencia paralelo

## EXPERIENCIAS

Los dos módulos en estudio fueron adquiridos en los años 80 por el INENCO, uno de ellos fue instalado primeramente en la Puna y luego se lo reinstaló en el campo experimental que posee el instituto en la Universidad Nacional de Salta. El otro permaneció en un depósito y no llegó a instalarse. Son módulos cuya potencia es 43 Wp, poseen 36 celdas de silicio monocristalino conectadas en serie. Estos módulos están siendo objeto de estudio desde hace varios años.



Figura 3: Vista general de los módulos en estudio

## RESISTENCIA SERIE

El incremento de la resistencia serie reduce la tensión de salida (indicado en la Figura 4 por  $\Delta V$ ) y el factor de forma lo cual hace que el rendimiento del módulo sea menor. Si la resistencia serie se incrementa 5 veces la potencia máxima y el factor de forma se reducen alrededor de un 25% (E.E. van Dyk et al, 2004). Es evidente que una variación en la resistencia serie produce efectos negativos en el rendimiento del dispositivo.

Para evaluarla se pueden utilizar distintas metodologías. La norma argentina IRAM 210013 utiliza el método aproximado de Wolf y Rauschenbach utilizando dos curvas I-V para dos irradiancias distintas, cuyas magnitudes no necesitan ser conocidas, y a la misma temperatura. Este método generalmente da resultados buenos y es independiente de  $I_0$ ,  $m$  y  $R_p$  que son valores que normalmente no se poseen. La curva I-V en oscuridad también se puede utilizar para evaluar cualitativamente ésta (E.E. van Dyk et al, 2004).

En este trabajo se obtuvo el valor de la resistencia serie utilizando la ecuación empírica propuesta por M. Green (M. Green, 1982) a partir de las siguientes ecuaciones:

$$FF = \left( \frac{I_M V_M}{I_{sc} V_{oc}} \right) = \frac{P_M}{I_{sc} V_{oc}} = FF_0 (1 - r_s) \quad (4)$$

Donde:

- FF factor de forma
- $I_M$  y  $V_M$  corriente y tensión del punto de máxima potencia
- $I_{SC}$  corriente de corto circuito
- $V_{OC}$  tensión de circuito abierto
- $P_M$  potencia máxima
- $v_{OC}$  tensión de circuito abierto normalizado
- $r_S$  resistencia serie normalizada

$$FF_0 = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0,72)}{v_{OC} + 1} \quad (5)$$

$$v_{OC} = \frac{V_{OC}}{V_t} ; \quad r_S = \frac{R_S}{(V_{OC}/I_{SC})} ; \quad V_t = \frac{mKT}{q} \quad (6)$$

$$R_S = \left(1 - \frac{FF}{FF_0}\right) \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (7)$$

Los valores de  $V_M$  e  $I_M$  se pueden obtener siguiendo el procedimiento desarrollado por J. M. Ruiz Pérez (2005)

$$\frac{I_M}{I_{SC}} = 1 - \frac{D_M}{v_{OC}} \quad (8)$$

$$\frac{V_M}{V_{OC}} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{v_{OC}}{D_M}\right)}{v_{OC} - r_S \left(\frac{I_M}{I_{SC}}\right)} \quad (9)$$

$$D_M = D_{M0} + 2r_S D_{M0}^2 \quad (10)$$

$$D_{M0} = \left(\frac{v_{OC} - 1}{v_{OC} - \ln v_{OC}}\right) \quad (11)$$

Este conjunto de expresiones es valido para el rango de valores definidos por  $v_{OC} > 10$  y  $r_S < 0,4$ .

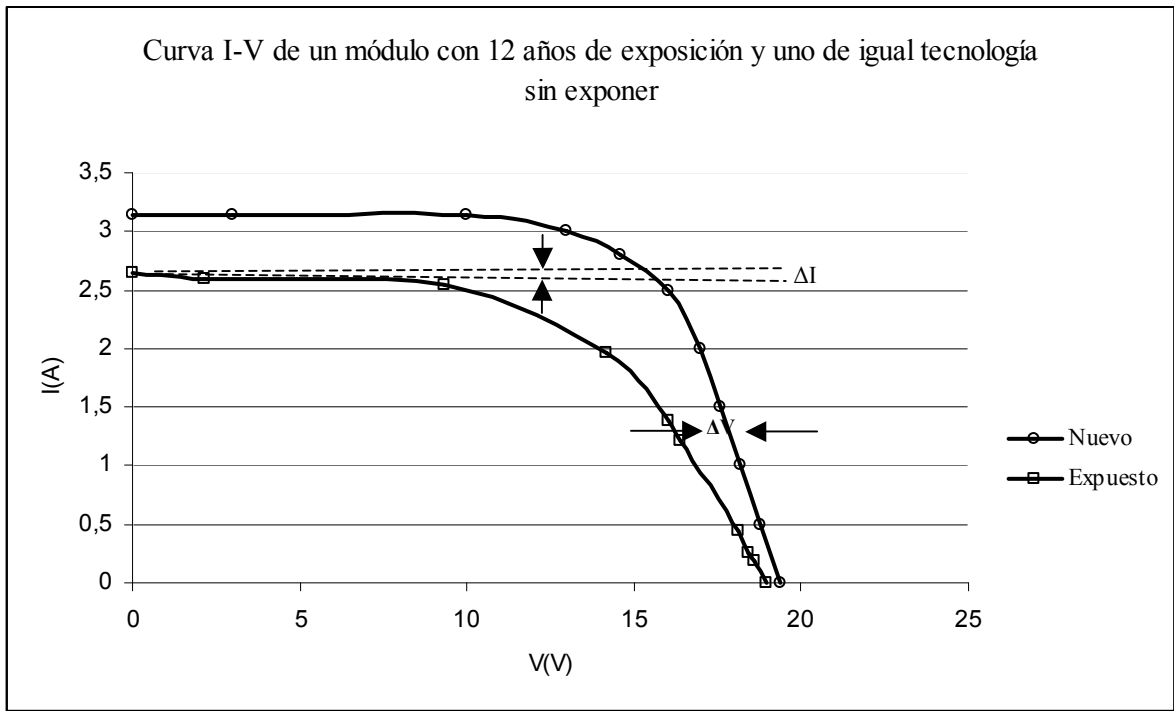


Figura 4: Curvas característica de dos módulos de la misma tecnología uno expuesto por 12 años y el otro sin exponer



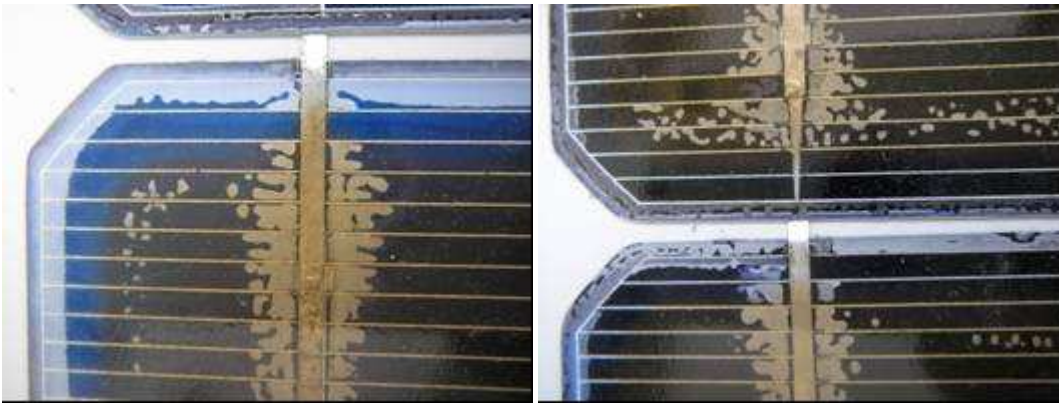


Figura 5: Fotografías de celdas nuevas y deterioradas

Es una herramienta muy valiosa el poder evaluar la resistencia serie, a partir de datos que proporciona el fabricante o en cualquier condición de operación, partiendo de las características en condiciones estándar ( $1000 \text{ W/m}^2$  y  $25^\circ\text{C}$ ) (Lorenzo, 2006). Esta es la metodología que se siguió en este trabajo para evaluar las resistencias serie de los dos módulos.

Para seguirla deben aceptarse las siguientes hipótesis:

- La corriente de cortocircuito depende exclusiva y linealmente de la irradiancia.
- La tensión de circuito abierto depende exclusivamente de la temperatura de celda y decrece linealmente con ella
- La temperatura de operación de la celda depende exclusivamente de la irradiancia y de la temperatura ambiente
- La resistencia serie es una característica independiente de las condiciones de operación.
- Se supone que todas las celdas son idénticas y que la caída de tensión en los cables de conexión es despreciable.

Se midieron las características I-V de los dos módulos, estos resultados se muestran en la figura 4. De estas curvas se obtuvieron los parámetros necesarios para el cálculo, haciendo las correcciones pertinentes para obtener los datos en condiciones estándar de operación ( $1000 \text{ W/m}^2$  y  $25^\circ\text{C}$ ). Se efectuaron los cálculos utilizando las ecuaciones presentadas anteriormente.

El resultado del cálculo de la resistencia serie para una celda de ambos módulos como así también de la potencia que entregan se presenta en la tabla siguiente:

	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$V_M$ (V)	$I_M$ (A)	$R_{S \text{ celda}}$ ( $\Omega$ )	$P_{\text{celda}}$ (W)
Módulo nuevo	3.14	19.4	14.6	2.8	0.019	1.31
Módulo viejo	2.65	18.98	14.17	1.96	0.054	1.03

Tabla 1: Resultado de las experiencias realizadas y cálculo de la resistencia serie

Las resistencias se midieron también siguiendo el método de la norma argentina IRAM 210013, el incremento que se obtuvo de la resistencia serie para el módulo deteriorado fue 2,9 veces respecto a la del módulo nuevo, valor similar al obtenido en la tabla de 2,84. Este incremento produce una pérdida de potencia de la celda tal como se muestra en la tabla 1 en la última columna.

Cabe aclarar que esa pérdida de potencia no solo se debe al aumento de la resistencia serie sino que también involucra pérdidas por otras degradaciones.

## RESISTENCIA PARALELO

El decrecimiento de la resistencia paralelo reduce la potencia y el factor de forma del módulo, una resistencia baja para el dispositivo tiene un fuerte impacto en su rendimiento para niveles de irradiancia reducidos (E.E. van Dyk et al, 2004). Para determinar la resistencia paralelo también se puede utilizar la curva característica I-V del módulo en oscuridad, es decir que se elimina de esta manera el término de la corriente fotogenerada de la ecuación (2). La tensión externa necesaria para poder entregar energía a la carga produce una polarización de la celda solar que da lugar a las corrientes habituales de un diodo de unión p-n, aun en ausencia de cualquier tipo de iluminación (módulo en oscuridad). Pero determinar la resistencia paralelo siguiendo estos procedimientos trae como consecuencia el tener que conocer y estimar algunos parámetros que no son sencillos de determinar ( $I_0$ , m) y adoptar un valor para  $R_s$  o  $R_p$  y por iteraciones sucesivas ir ajustando este valor (E.E. van Dyk et al, 2004) (Priyanka, 2007).

Despreciar  $R_p$  en las actuales celdas de Si cristalino es equivalente a despreciar un componente de corriente interna que no supera el 1% del valor de  $I_{sc}$  en condiciones de operación estándar (Lorenzo, 2006). A pesar de lo expuesto si se desea aún calcular esta resistencia se lo puede llevar a cabo partiendo de valores no muy complicados de determinar.

Las ecuaciones que nos permiten conocer la resistencia paralelo son:

$$FF = FF_0(1 - r_s) \left[ 1 - \left( \frac{v_{OC} + 0,7}{v_{OC}} \right) \right] \left[ \frac{FF_0(1 - r_s)}{r_p} \right] \quad (12)$$

$$r_p = \frac{R_p}{(V_{OC} / I_{SC})} \quad (13)$$

Donde:

- $r_p$  resistencia paralelo normalizada

El punto de máxima potencia se puede determinar con las siguientes ecuaciones:

$$D_M = D_{M0} + 2r_s D_{M0}^2 - 2g_p \quad (14)$$

$$i_s = \frac{1 - g_p(1 - r_s)}{1 - \exp[-v_{OC}(1 - r_s)]} \quad (15)$$

$$i_s' = 1 + i_s \exp[-v_{OC}(1 - r_s)] \quad (16)$$

$$v_s = 1 - \frac{1}{v_{OC}} \ln(v_{OC} i_s) \quad (17)$$

$$i_M = i_s - \frac{D_M}{v_{OC}} \quad (18)$$

$$v_M = v_s + \frac{1}{v_{OC}} \ln D_M \quad (19)$$

$$\frac{I_M}{I_{SC}} = i_M - g_p(v_M - r_s) \quad (20)$$

$$\frac{V_M}{V_{OC}} = v_M - \frac{I_M}{I_{SC}} r_s \quad (21)$$

Los resultados obtenidos del cálculo de resistencia paralelo se resumen en la tabla 2.

	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$V_M(V)$	$I_M(A)$	$R_{p\ celda}(\Omega)$	$P_{celda}(W)$
Módulo nuevo	3.14	19.4	14.6	2.8	98.97	1,23
Módulo viejo	2.65	18.98	14.17	1.96	80.64	0,96

Tabla 2: Resultado de las experiencias realizadas y cálculo de la resistencia paralelo

Como se dijo anteriormente la resistencia paralelo tiene su mayor influencia en la zona de bajas tensiones lo cual se ve reflejado en la curva caracteriza I-V, de la Figura 4, en la cual la pendiente de la curva en esa zona es muy pequeña. Esta resistencia también se midió utilizando la curva I-V medida en oscuridad, siendo los valores obtenidos por ambos métodos muy similares.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el efecto de las resistencias parásitas en módulos fotovoltaicos. Se utilizó el modelo de circuito equivalente de un diodo en el cual éstas están representadas por una resistencia serie y una paralelo. Para las medidas se utilizaron dos módulos de la misma tecnología uno con 12 años de exposición y otro sin exponer.

Se pudieron contrastar métodos diferentes para la medida de estas resistencias obteniéndose valores muy similares entre ellos.

Uno de estos métodos utiliza ecuaciones empíricas lo que lo hace sumamente interesante ya que permite calcular ambas resistencias a partir de datos proporcionados por el fabricante o a partir de valores medidos que no necesariamente se los obtuvieron en condiciones estándares, que muchas veces son difíciles de conseguir y controlar.

Del análisis de estos resultados se desprende que, para este caso, la pérdida de potencia provocada por el incremento de la resistencia serie es significativa y llamativamente la ocasionada por la disminución de la resistencia paralelo, es despreciable.

Conviene insistir en el hecho que en el presente trabajo no se consideran los efectos degradativos, como los provocados por los defectos del material encapsulante.

## REFERENCIAS

- Ewa Radziemska (2005) "Dark I-U-T measurements of single crystalline silicon cells". *Energy Conversion & Management* 46 (2005) 1485-1494
- Green M, "Solar Cells", prentice Hall, Kensigton (1982), capitulo 5, pag. 95.98.
- Kaminski A, Marchand J.J., Laugier A. (1998) "Non lineal dark I-V curves behavior of silicon solar cells". *Solar Energy Materials & Solar Cells* 51(1998) 221-231.
- Lorenzo E. (2006) "Electricidad Solar Fotovoltaica" Vol. II "Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos". Progensa, primera edición, diciembre, 2006.
- Priyanka, Mohan Lal, S.N. Singh (2007) "A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells". *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91(2007) 137-142.
- Van Dyk E.E., Meyer E.L. (2004) "Analysis of the effect of parasitic resistance on the performance of photovoltaic modules". *Renewable Energy* 29 (2004) 333-344.

## ABSTRACT:

The present paper studies the series-shunt resistance variations obtained in a photovoltaic device exposed to the outside environment for twelve years. The measures made with this device are compared with those of a same technology new device which was not exposed. The methodology employed for the resistance measurements uses data provided by the manufacturers or any other data obtained in arbitrary conditions, not necessarily the standard ones. From the result's analysis it is concluded that the series resistance increment is more significant than the shunt resistance decrease.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic modules, degradation, series and shunt resistances.