

PÉRDIDA DE POTENCIA EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS POR DEGRADACIÓN DE SUS PARÁMETROS ELÉCTRICOS^I

M. T. Montero^{II}, C. Cadena^{III}

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO - CONICET)
 Facultad de Ciencias Exactas – Departamento de Física
 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 presenta el análisis de la degradación de un conjunto de módulos fotovoltaicos desde el punto de vista de los parámetros eléctricos del circuito equivalente. Todos los módulos en cuestión, tuvieron una prolongada exposición al sol, bajo condiciones de clima adverso. Se trata para este caso, de la evaluación de la resistencia serie y paralelo, utilizando las curvas características $I-V$, medidas bajo condiciones de iluminación natural y en la oscuridad. Del análisis de estas curvas se puede observar, que con algunos matices, para todos los módulos ensayados aparece una notoria degradación de sus propiedades. En todos los casos (aunque más en los de algún grupo), se observa un importante aumento de la resistencia serie, a la vez que la resistencia paralelo, disminuyó en forma similar en todos. Los módulos se comparan contra las características de otros no expuestos, que a los efectos prácticos pueden ser considerados como de referencia.

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

INTRODUCCION

Un módulo fotovoltaico es diseñado para que tenga una vida útil aproximada de 20 años, pero su prolongada exposición a los factores climáticos y medioambientales hacen que su producción de energía decrezca básicamente en función del tiempo de exposición, lo que se ve reflejado en la pérdida de rendimiento de los mismos.

La degradación de los módulos se ve reflejada fundamentalmente en el cambio de los siguientes factores:

- Los materiales de la cubierta transparente, dado que a simple vista, figura 1, se observa un cambio en la coloración del material encapsulante y en menor medida, la rugosidad del vidrio de la cubierta (Montero, 2003). Estos efectos provocan que la radiación efectiva que llega a la celda fotovoltaica propiamente dicha, sea menor que la que



Figura 1. Fotografías de módulos no degradado y degradado

- alcanza la superficie del módulo.
- Aumento en el valor de resistencia serie del circuito equivalente del módulo debido a cambios producidos en las resistencias 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 junta, etc.

^I Parcialmente financiado por CIUNSA.

^{II} Facultad de Ciencias Exactas

^{III} CONICET

- Disminución de la resistencia paralelo del circuito equivalente del módulo debido a fugas de corriente por superficie de los bordes de las celdas, a caminos de difusión a lo largo de dislocaciones o fronteras de grano (cuando existan), a pequeños cortocircuitos metálicos, etc.
- Cambios producidos en las celdas por efectos de la temperatura.
- Otros efectos, como por ejemplo, los corrosivos.

Este trabajo pretende mostrar los resultados obtenidos de los ensayos y posterior análisis de los parámetros eléctricos, resistencia serie y paralelo, en un conjunto de módulos fotovoltaicos.

Se ensayaron un conjunto de módulos que el INENCO (Instituto de Investigación en Energías no Convencionales) adquirió en la década de los '80. El conjunto está compuesto por dos grupos de módulos de *Si-monocristalino*: uno de 40 Wp y el otro de 53 Wp de marcas diferentes. El primero tiene cinco módulos, uno de los cuales nunca fue expuesto y los cuatro restantes estuvieron expuestos a una radiación importante, mientras que el segundo grupo está conformado por ocho módulos, los cuales estuvieron expuestos a una radiación solar aún mayor, y de estos últimos, dos de ellos estuvieron casi siempre conectados a baterías y mientras que los seis restantes a una motobomba.

FUNDAMENTOS

Para poder analizar los efectos mencionados, se estudia el comportamiento de los módulos a través de modelos que los representan. Existen varias modelizaciones, en este trabajo se ha elegido el representado en la figura 2, que está constituido por un diodo de unión *p-n ideal*, de corriente de saturación I_0 y factor de idealidad m , y por un generador de corriente de valor I_L .

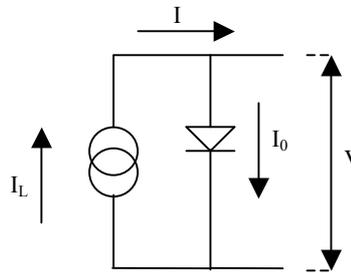


Figura 2. Circuito equivalente del modelo eléctrico para el panel fotovoltaico

Siendo la ecuación característica simplificada considerando que la corriente del diodo puede expresarse mediante el modelo de una sola exponencial

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right) \quad (1)$$

Sin embargo, en un dispositivo fotovoltaico real existen otros efectos, que no están considerados en la ecuación (1) que afectan el comportamiento externo del mismo. De los efectos intrínsecos se consideraran dos representados por una resistencia serie y una paralelo.

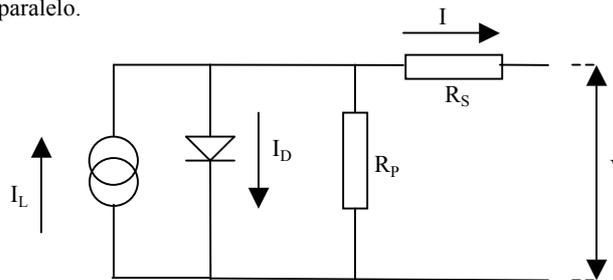


Figura 3. Circuito de un módulo en el que se consideran algunas pérdidas intrínsecas

Siendo la ecuación que lo representa

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{e(V + IR_s)}{mkT} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2)$$

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 junta. 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 el voltaje de salida y por consiguiente el factor de forma por lo que se ve afectado el rendimiento del mismo.

La resistencia paralelo representa cualquier camino paralelo de alta conductividad a través de la junta 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 junta dando 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.

Resistencia serie

El cálculo de la resistencia serie se puede llevar a cabo por diferentes métodos, alguno de los cuales se presentan a continuación:

- El método de Wolf y Rauschenbach aproximado utilizado por la norma argentina IRAM 210013 para la determinación de la resistencia serie de los módulos en base a la medición de la curva I-V del dispositivo bajo ensayo para dos niveles de irradiancia. Consiste en trazar la curva I-V del dispositivo bajo ensayo, para dos irradiancias distintas (cuyas magnitudes no necesitan ser conocidas) y a la misma temperatura en el intervalo de 23°C a 27°C. Luego, se elige un punto en cada curva característica, preferiblemente cerca del "codo" de la misma, donde cada corriente se reduzca una misma cantidad ΔI a partir de cada una de las corrientes de cortocircuito. Se mide el desplazamiento ΔV entre dos puntos y se calcula R_S como sigue:

$$R_S = \frac{\Delta V}{|I_{SC1} - I_{SC2}|} \quad (3)$$

donde I_{SC1} y I_{SC2} son las dos corrientes de cortocircuito.

Se repiten los pasos anteriores y utilizando una tercera curva I-V medida a una tercera irradiancia y a la misma temperatura, en combinación con cada una de las curvas anteriores.

Finalmente, se promedian los tres valores de R_S calculados y así queda determinada la resistencia serie del módulo en estudio.

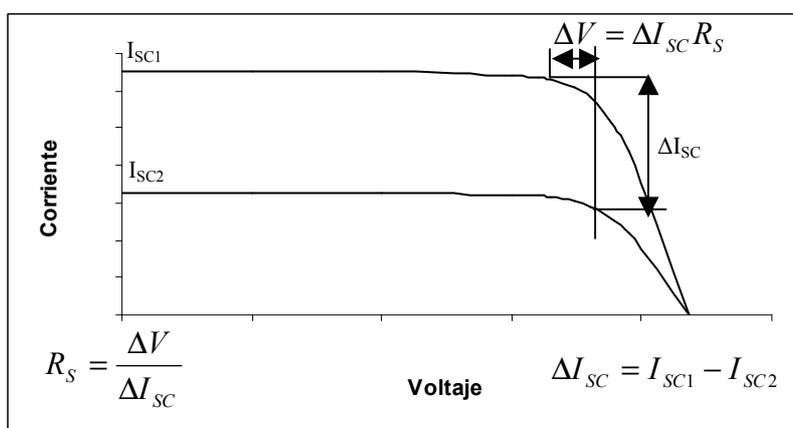


Figura 4. Determinación de la resistencia serie por el método de Wolf y Rauschenbach

- El método propuesto por Imamura o "método de la curva de oscuridad" se basa en la medición de la curva I-V del dispositivo bajo ensayo con iluminación y en oscuridad. La ecuación que se utiliza para la determinación de la resistencia serie (Imamura et al, 1992):

$$R_S = \frac{V_D - V_L}{I_{SC}} = \frac{\Delta V}{I_{SC}} \quad (4)$$

Donde V_D y V_L voltajes medidos sobre la curva en oscuridad e iluminada respectivamente.

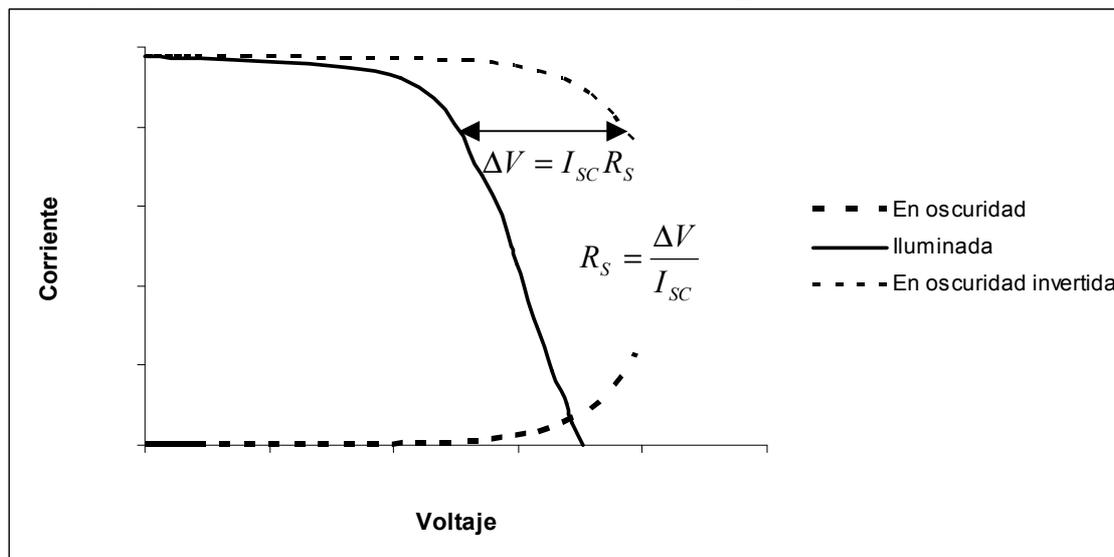


Figura 5. Determinación de la resistencia serie por el método de la curva de oscuridad

- La ecuación de la celda real en función de datos proporcionados por el fabricante presentado por Lorenzo (Lorenzo, 2006)

$$R_S^* = \frac{\left[V_{OC}^* - V_M^* + V_t \ln\left(1 - \frac{I_M^*}{I_{SC}^*}\right) \right]}{I_M^*} \quad (5)$$

Donde todos estos valores son parámetros que el fabricante provee en la hoja técnica de los módulos siendo tensión de circuito abierto, corriente de corto circuito, tensión y corriente del punto de máxima potencia y el valor del voltaje térmico.

Resistencia paralelo

El cálculo de la resistencia paralelo puede realizarse por varios métodos aquí mostramos el que utiliza la determinación de la pendiente de la curva característica I-V ya sea en condiciones de oscuridad o de iluminación (Imamura et al, 1992).

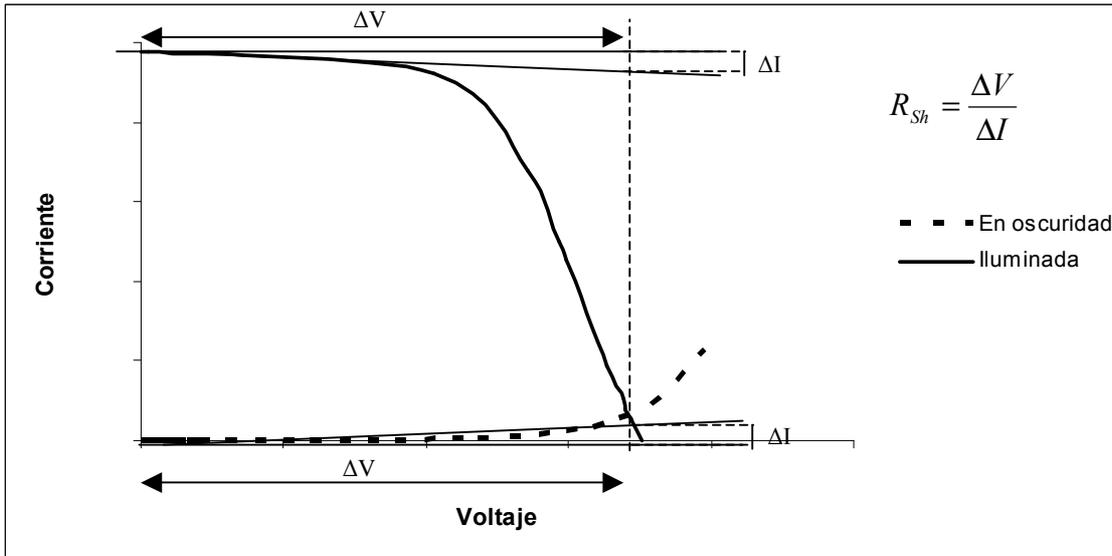


Figura 6. Determinación de la resistencia paralelo

CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS

Se midieron las curvas características $I-V$ bajo iluminación de los dos conjuntos de módulos. Dentro del conjunto de 4 módulos de 40 Wp el comportamiento de los mismos fue similar, siendo sus curvas similares, es por ello que se decidió trabajar solo con uno de estas. Dentro del conjunto de 8 módulos de 53 Wp el comportamiento de los seis que no estuvieron conectados a baterías (terracea), fue muy similar entre ellos, pero ligeramente diferente al de los dos que estuvieron conectados a las baterías. El comportamiento entre ellos a su vez fue similar, es por este motivo que en este grupo de módulos se decidió trabajar con los dos que se conectaron a las baterías y dos del otro grupo de 6 para realizar los ensayos y comparar. Cabe aclarar que en el grupo de los de 53 Wp no se posee un módulo que no se haya expuesto pero sí se cuenta con la hoja técnica que proporciona el fabricante a partir de la cual se reconstruyó la curva I-V en condiciones de trabajo a 1000W/m^2 y a 25°C con la cual se calculó la resistencia paralelo. La resistencia serie se la obtuvo con la ecuación (5) que tiene en cuenta los datos de fábrica que se entregan con los módulos.

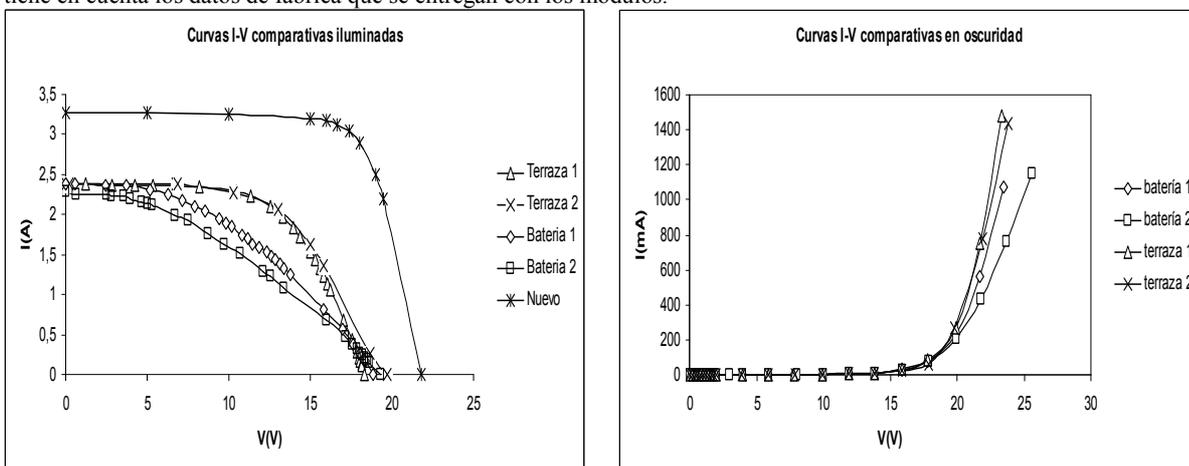


Figura 7. Curvas I-V bajo iluminación y en oscuridad del conjunto de módulos de 53 Wp

La figura 7 muestra las curvas características $I-V$ medidas bajo condiciones de iluminación a 1000 W/m^2 y en oscuridad de los módulos de 53 Wp. Se observa claramente la diferencia en el comportamiento de los dos módulos conectados a baterías, con los que no permanecieron conectados a ellas (terracea 1 y terraza 2), y la notable pérdida de potencia de estos con respecto a la curva original.

Otra característica notable que se desprende a simple vista de la gráfica, es la mayor degradación que han sufrido los módulos conectados a las baterías respecto de los otros, en lo que a las resistencias se refiere. Se observa en las pendientes de las curvas características, que la resistencia serie se ha incrementado considerablemente respecto de los otros, mientras que la disminución de la resistencia paralelo es similar al resto de los módulos. Esta situación también se ve reflejada en las curvas características $I-V$ en condiciones de oscuridad.

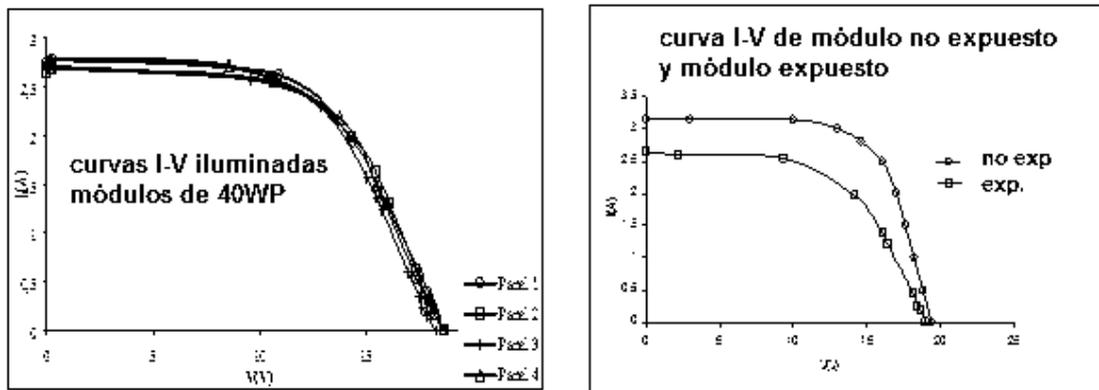


Figura 8. Curvas $I-V$ bajo iluminación de módulos expuestos de 40 Wp, uno de ellos comparados con el módulo no expuesto

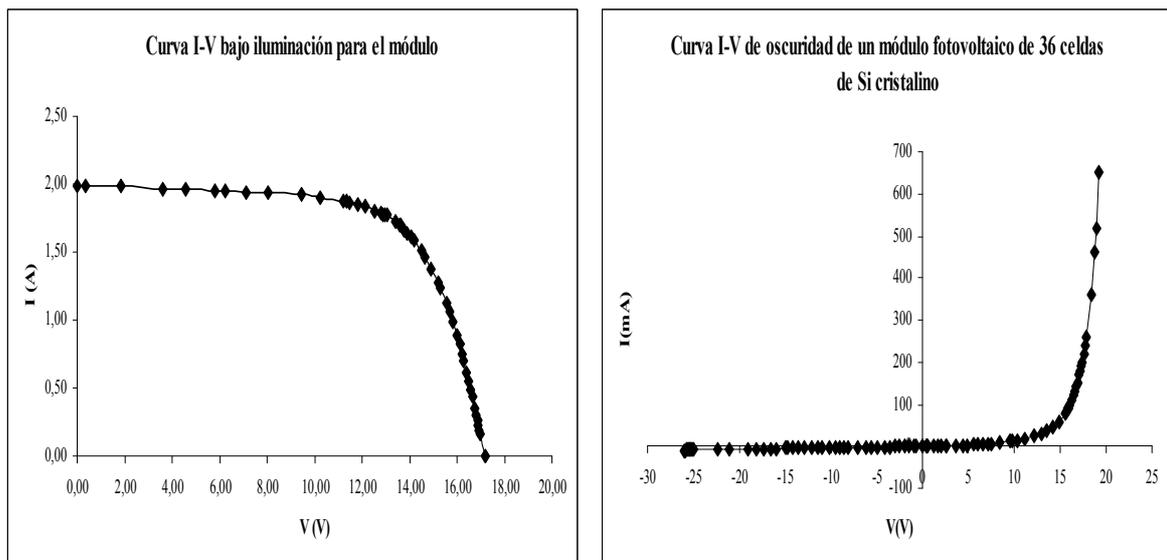


Figura 9. Curvas $I-V$ bajo iluminación y en oscuridad del conjunto de módulos degradados de 40 Wp

La figura 8 muestra en la gráfica de la izquierda los ensayos que se realizaron bajo condiciones de iluminación, 1000 W/m^2 , los módulos expuestos de 40 Wp con lo cual se justifica por su similitud, el haber trabajado con uno de ellos (se poseen las curvas similares a estas medidas a los de 53 Wp). En la gráfica de la derecha de la misma figura, se muestra la comparación de una de las curvas anteriores, con la medida para el módulo no expuesto. Se observan los efectos de degradación que han sufrido, reflejados en la disminución de la potencia entregada.

En las figuras 7 y 8 se observa claramente que los daños de la cubierta transparente modifican notoriamente la corriente de cortocircuito y en menor proporción la tensión en vacío (Montero, M. 2003. Tesis de Posgrado) ocasionando una importante pérdida en la producción de potencia.

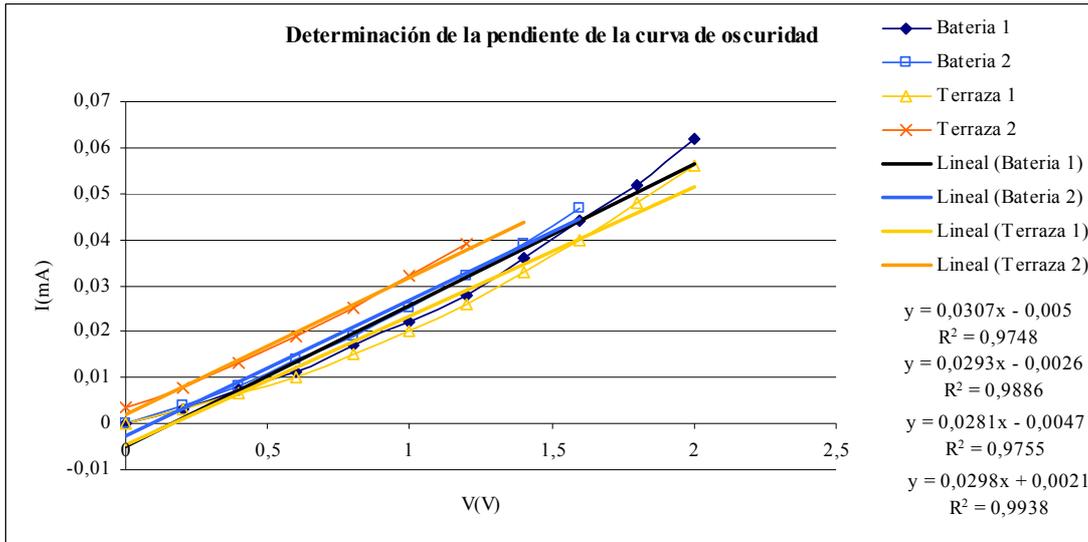


Figura 10. Determinación de la pendiente de la curva I-V en oscuridad para determinar la resistencia paralelo

La figura 9 muestra las curvas medidas a los módulos del grupo de 40 Wp bajo condiciones de iluminación, 1000 W/m² y oscuridad las cuales se utilizaron para calcular las resistencias de los mismos.

En la figura 10 se muestra ampliada la zona de las curvas características I-V en oscuridad que se tomó para calcular la resistencia paralelo, y las ecuaciones que nos dan las pendientes de las mismas con las que se determina la resistencia correspondiente.

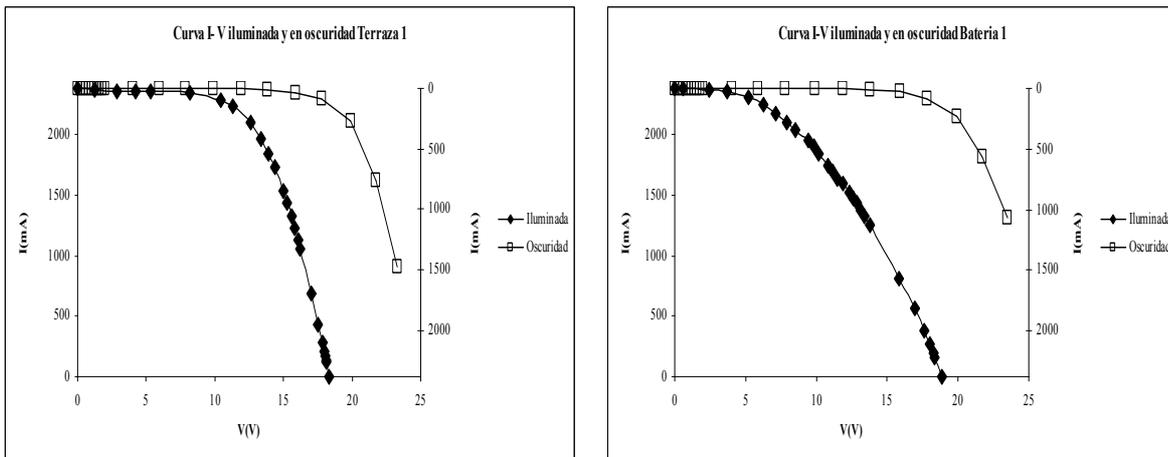


Figura 11. Curvas I-V bajo iluminación y en oscuridad de dos módulos utilizadas para aplicar el “método Imamura”

En la figura 11 se muestran dos de las gráficas que se utilizaron para calcular la resistencia serie de los módulos, y en las mismas se observa que se ha trasladado el “cero” de la curva I-V en oscuridad, para aplicar el método de la curva de oscuridad propuesta por Imamura, M. S. 1992, ecuación (4).

En la tabla 1 se muestran los porcentajes de disminución de la resistencia paralelo y aumento de la resistencia serie, con respecto en ambos casos, al módulo nuevo. La resistencia serie del módulo teórico se calculó con la ecuación (5) utilizando los valores en condiciones estándar que figuran en la hoja técnica de fábrica y la resistencia paralelo se la obtuvo a partir de la reconstrucción de la curva característica I-V con los datos proporcionados por el fabricante.

Módulo	R _p % de disminución	R _s % de aumento
Batería 1	24	356
Batería 2	28	438
Terraza 1	17	217
Terraza 2	22	210

Tabla 1. Variación de la resistencia paralelo y serie en el conjunto de módulos de 53 Wp

Estos porcentajes de disminución de la resistencia paralelo equivalen a una corriente interna que no supera el 1% del valor de la corriente de cortocircuito en condiciones estándar. De las medidas realizadas al conjunto de módulos de 53 Wp se observa

que el efecto de degradación en los que se mantuvieron conectados a baterías es mayor que los que se conectaron a la motobomba. Este efecto es notorio en la medida de la resistencia serie, donde la diferencia entre un grupo y otro, está bien diferenciado, el aumento de estas es un 200% mayor en las de los módulos que se conectaron a baterías, que en los que no se conectaron. No ocurre lo mismo con la medida de la resistencia paralelo, donde la disminución de esta es similar en todos.

En la medida de las resistencias del conjunto de módulos de 40 Wp los valores que se obtuvieron están dentro de los valores que la bibliografía considera aceptables, el comportamiento de estos es similar al grupo de los de 53 Wp que no se conectaron a baterías.

CONCLUSIONES

Del análisis que se realizó de las *Curvas I-V*, medidas en condiciones tanto de iluminación, como de oscuridad, se puede observar que el comportamiento de los módulos que no fueron conectados a baterías es muy similar entre si. La degradación, analizada desde el punto de vista de las resistencias del circuito equivalente, se conserva dentro de los valores que se podría llegar a esperar según datos presentados en la bibliografía publicada al respecto, manteniéndose la forma de las curvas características muy similar dentro de cada grupo de módulos: los de **40WP** y los de **53WP**, y comparativamente entre ambos grupos. Sin embargo, el par que se conectó a baterías durante un prolongado período de tiempo, no conserva la forma de la curva característica dado que responde a un mayor aumento en la resistencia serie que los otros. En lo que respecta a la resistencia paralelo, se observa que esta disminuye, pero el efecto no es tan diferente a los restantes.

Parecería ser que un prolongado tiempo de conexión a baterías provoca un considerable aumento en la resistencia serie derivando en una notable pérdida en la producción de potencia. Este hecho, podría ser causado por algún efecto electroquímico. En una etapa posterior se analizará este efecto y sus consecuencias.

REFERENCIAS

- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª edición, pp. 768-780. Wiley Interscience, New York.
- 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.
- Imamura M. S. y Brantzig "Dark I-V Characteristics and their Applications", Proc 8th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Las Vegas, Nev, USA, august 1972.
- Imamura M.S., Helm P. y Palz W. "Photovoltaic System Technology", Commission of the European Communities (1992), pp.86-92. Brussels and Luxembourg.
- 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.
- Montero, M. "Evaluación y análisis del comportamiento eléctrico de paneles fotovoltaicos expuestos a la intemperie por más de 10 años", tesis de maestría, 2003.
- 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

This paper presents the analysis of the degradation of a set of photovoltaic modules from the point of view of the electrical parameters of the equivalent circuit. All the modules at issue had a long sun exposure, under adverse climate conditions. This case refers to the series and parallel resistance evaluation, using the characteristic IV curves, measured under natural illumination conditions and in the darkness. From the analysis of these curves it is possible to observe, that the degradation of the electric power was greater in a pair of modules that remained connected during a long period of time to lead-acid storage batteries than in others that were connected to a resistive- inductive charge (motor pump). An important series resistance increase was observed in all cases (although it was more evident in those of the first group). At the same time parallel resistance decreased in a similar way in all the modules. The modules are compared with the characteristics of others that were not exposed, which can be considered as point of reference for practical reasons.

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