



## DEGRADACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS Y SU INFLUENCIA EN LA PÉRDIDA DE POTENCIA

M.T. Montero Larocca<sup>1</sup>, C.A. Cadena<sup>1</sup> y M.J.L. Tamasi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Energías No Convencionales INENCO (U.N.Sa- CONICET)

Facultad de Ciencias Exactas – Departamento de Física

Consejo de Investigaciones de la U.N.Sa (CIUNSA)

Universidad Nacional de Salta – Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta

Tel - Fax 0387-4255489 - e-mail: maritemontero9@gmail.com

<sup>2</sup>Dto. Energía Solar, Comisión Nacional de Energía Atómica - Conicet

*Recibido 16/08/14, aceptado 27/09/14*

**RESUMEN:** La energía solar fotovoltaica se encuentra en continuo crecimiento a nivel mundial y muy especialmente en nuestra región, en la cual existen en zonas rurales dispersas un elevado número de estas instalaciones. La pérdida de potencia de los módulos debido a su prolongada exposición, especialmente a la radiación solar, no está aún lo suficientemente analizada. Es por ello que en este trabajo se analizan ciertos parámetros que permitan cuantificar aproximadamente el daño que éstos han sufrido, midiendo las características eléctricas y ópticas del encapsulado de un grupo de módulos que han permanecido expuestos por más de doce años, comparando estos resultados con los de módulos idénticos pero que no fueron expuestos. Como resultado de los ensayos surge que la pérdida de potencia de los mismos no es para nada despreciable, evaluándose la incidencia que tiene la degradación de la resistencia serie, paralelo y la pérdida de las propiedades ópticas del material encapsulante en la pérdida total de potencia.

**Palabras clave:** degradación, fotovoltaico, encapsulante, ultravioleta.

### PÉRDIDA DE POTENCIA EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Los módulos fotovoltaicos se fabrican para una vida útil de 20 a 25 años, pero antes de lo previsto disminuyen su producción de potencia, y en algunos casos, esta puede ser muy importante. El hecho debe ser tenido en cuenta por los diseñadores de instalaciones fotovoltaicas, de manera que puedan seguir proporcionando la energía necesaria para la cual fueron proyectadas. Por esta razón, es provechoso el estudio de las causas por las que se producen las pérdidas. El análisis de las mismas se debe realizar desde distintos puntos de vista, con el objetivo de poder determinar cuál o cuáles de los distintos factores que intervienen en este proceso es o son los más relevantes. La información que se pueda obtener como resultado de estos análisis será de utilidad a los fabricantes, ya sea para el mejoramiento de los materiales utilizados en la fabricación de los módulos o contribuyan al desarrollo de otras tecnologías.

### DEGRADACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

La prolongada exposición a la intemperie provoca en los dispositivos, efectos de degradación en los materiales que los componen, manifestándose estos efectos en una progresiva pérdida en el rendimiento. La radiación afecta fuertemente las propiedades ópticas del material encapsulante, disminuyendo su transmitancia, al igual que el ciclado térmico que produce la delaminación del mismo. La deposición de partículas transportadas por el aire, la sedimentación de depósitos de agua de lluvia o intercambio iónico entre los álcalis del vidrio y el ion  $H^+$ , iones del agua (Sidrach-de-Cardona, Sánchez-Friera. Peláez, Llanos Mora-López, 2010) provocan la erosión del vidrio. Como resultado de todo ello, se produce una pérdida irreversible de transmitancia óptica. La pérdida de la fuerza de adhesión entre la celda y el encapsulante (delaminación) reduce la protección de la célula y facilita la oxidación y corrosión de la capa antirreflectante (AR) y de los metales de la celda. Es probable que se produzca una acumulación de humedad en las áreas delaminadas.

Uno de los encapsulantes más usados es el EVA (etileno acetato de vinilo), al ser este un copolímero amorfo, la difusividad del oxígeno y del vapor de agua es alta por lo que la oxidación puede extenderse a otras áreas rápidamente. Además, se sabe que el ácido acético que resulta de la hidrólisis del EVA acelera la corrosión de los metales (Sidrach-de-Cardona, Sánchez-Friera. Peláez, Llanos Mora-López, 2010). Pueden presentarse roturas en las celdas que podrían haberse formado por estrés mecánico o térmico durante el período de exposición. Se pueden producir por sombras, suciedad localizada o graves desigualdades en las cadenas del módulo, lo que se conoce como puntos calientes, causando la rotura de la celda y el quemado de la lámina trasera. La cadena con una corriente de cortocircuito reducida, es forzada a trabajar con la polaridad invertida, consumiendo la energía eléctrica generada por las otras cadenas, pudiendo alcanzar temperaturas muy elevadas. Estos pueden ser algunos de los mecanismos que producen una reducción en el rendimiento de los dispositivos fotovoltaicos.

Desde el punto de vista de la degradación de los componentes eléctricos del circuito equivalente se analizó la influencia que tiene el aumento de la resistencia serie y la disminución de la resistencia paralela.

La resistencia serie, de un módulo fotovoltaico representa resistencias en las soldaduras de enlace entre celdas, en la región emisor-base, metalizaciones en las celdas, barras de interconexión de las celdas y las resistencias en las cajas de unión de interconexión de terminaciones. A pesar de que los diseñadores y fabricantes tratan de minimizar estas pérdidas por resistencia serie, al estar expuestos diariamente a ciclos térmicos resulta en un gradual incremento de esta resistencia lo que ocasiona una reducción en la tensión de salida y en el factor de forma reduciendo de esta manera el rendimiento del dispositivo.

La resistencia paralela, representa caminos de alta conductividad a través de la juntura de la celda solar o en los bordes de ésta. Esto se debe a daños en el cristal e impurezas dentro y cerca de la juntura dando origen a fugas de corriente paralelas,  $I_p$ . Estos caminos conducen corrientes de derivación fuera de la carga prevista siendo su efecto perjudicial para el rendimiento del dispositivo fotovoltaico especialmente a bajos niveles de radiación. El efecto de la resistencia paralelo, cuando es lo suficientemente pequeña, es el de reducir la tensión de circuito abierto y el factor de forma, sin casi afectar la corriente de cortocircuito. 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  $I_{CC}$  en condiciones de operación estándar (Lorenzo, 2006). Como se podrá observar más adelante el valor de esta resistencia disminuirá con el envejecimiento del módulo. 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 (Van Dyk , Meyer, 2004).

## MUESTRA ANALIZADA

En la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Salta el Instituto Nacional de Energías no Convencionales (INENCO) posee equipos solares de diversas características entre los cuales se pueden encontrar conjuntos de módulos fotovoltaicos que fueron instalados para diversos tipos de instalaciones. A principios de 1989 se instaló

- un pequeño generador solar, consistente en cuatro módulos de unos 43 Wp cada uno (P1, P2, P3, P4 y uno sin exponer), un regulador de carga y una batería de plomo-ácido con fines demostrativos, como parte de las actividades realizadas por el entonces llamado Centro Regional de Energía Solar (CRES). Con ellos se realizaron un conjunto de experiencias, fundamentalmente de ensayos de alumbrado, con lámparas del tipo fluorescente.
- un pequeño generador solar, consistente en seis módulos de 53 Wp cada uno (T1, T2, T3, T4, T5, T6 y uno sin exponer), colocados en la terraza del edificio de Física de la Facultad de Ciencias Exactas que se ha utilizado para experiencias de laboratorio de las asignaturas que se dictan en ese departamento.
- un conjunto de 2 módulos (B1 y B2) con las mismas características que los del grupo b que estuvieron constantemente conectados a un banco de baterías.



Figura 1: Foto que muestra los grupo de módulos de 43 y 53 Wp

Las condiciones de radiación en Salta son tales que la media anual es de  $18 \text{ MJ/día/m}^2$ , lo que implica que estos módulos estuvieron sometidos a una radiación, sobre el plano de los mismos, de aproximadamente  $3.759 \text{ MJ/m}^2$  y una radiación ultravioleta estimada de  $188 \text{ MJ/m}^2$ , en el tiempo que estuvieron expuestos. El dato destacable es que, desde el punto de vista de la temperatura, especialmente en invierno, el salto térmico al que pueden estar sometidos equipos a la intemperie es muy elevado alcanzando en algunos casos valores superiores a los  $30^\circ\text{C}$  entre el día y la noche. Por otra parte, en ese período, las mínimas pueden ser de algunos grados bajo cero y las máximas en verano pueden alcanzar los  $40^\circ\text{C}$ . Además, se registran valores máximos de radiación del orden de  $1.000\text{W/ m}^2$  e índices de radiación ultravioleta muy elevados.

Pese a estas condiciones climáticas adversas no se observan, a simple vista al presente, daños estructurales de importancia, fracturas en los vidrios, daños severos en los demás materiales transparentes ni en la estructura. Aunque cabe aclarar que no se realizaron pruebas de estanqueidad, puede suponerse que existen daños provocados por la corrosión en los contactos, y por otra parte, si bien se observa cierto amarillamiento en los módulos envejecidos, no se puede suponer que el mismo fue provocado por la falta de estanqueidad, ni cuantificado el fenómeno, pese a que sí podría estar relacionado con la disminución de transmitancia, o las propiedades ópticas del módulo. Conviene destacar que solo un módulo fotovoltaico (de iguales características de cada grupo de la misma partida y serie quedó guardado en un depósito.

## EXPERIENCIAS

Se realizaron medidas sobre los doce módulos expuestos y los no expuestos, trazándose las curvas características corriente-tensión (I-V). Se determinaron sus parámetros eléctricos: corriente de corto circuito y tensión de circuito abierto. Bajo las mismas condiciones de radiación y temperatura se “cargó” al módulo con una resistencia variable. La misma se varió desde valores muy pequeños hasta valores grandes para obtener pares (I,V), de esta manera se construyeron las curvas características bajo distintas condiciones de iluminación y en oscuridad se conectó el módulo a una fuente de tensión variable, entre -36 V y 36 V (Montero Larocca, 2013). Estas curvas se utilizaron para obtener por distintos métodos las resistencias del circuito equivalente. En todos los casos, salvo en oscuridad, las curvas se obtuvieron a cielo abierto.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Degradación de la cubierta transparente

A las muestras de EVA extraída de uno de los módulos se le realizaron ensayos de infrarrojo con Transformada de Fourier, difracción por rayos X, transmitancia del EVA, vidrio y conjunto EVA-vidrio (Montero Larocca, 2003; Montero Larocca, Cadena, 2004), de los dos primeros estudios se obtuvo que el material era amorfo antes y después de la exposición. De los ensayos de transmitancia se determinó que la misma disminuyó entre 20% a 25% respecto de la muestra no expuesta.

Si se hace la comparación entre la curva característica I-V del módulo nuevo y el degradado, en iguales condiciones de radiación y temperatura, se observa que la corriente de corto circuito disminuye en forma proporcional al grado de degradación de la cubierta (Montero Larocca, 2003; Montero Larocca y Cadena, 2004; Montero Larocca, Cadena, 2010), Figuras 2 y 3.

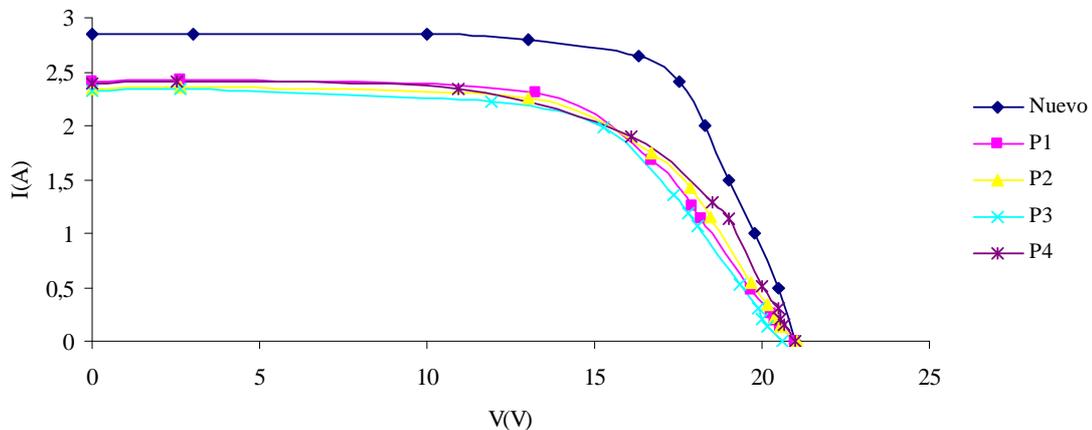


Figura 2: Curvas características I-V del conjunto de módulos Solarwatt.

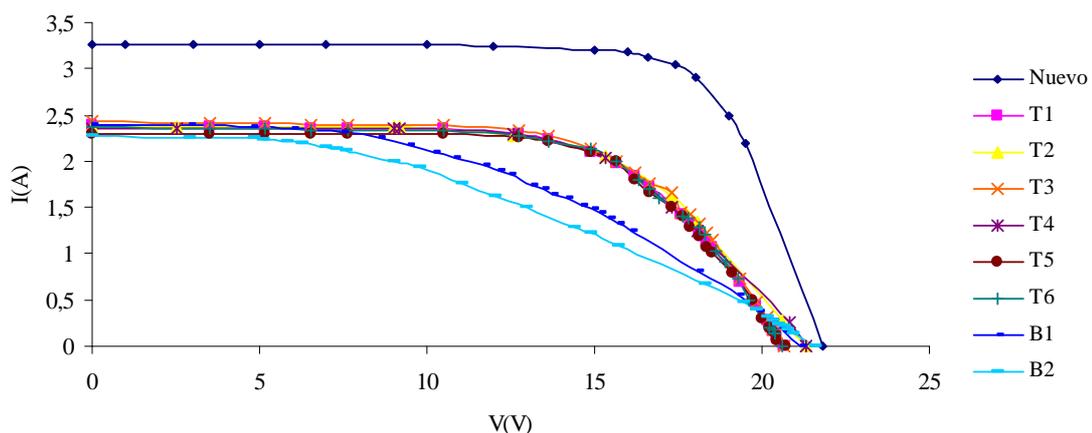


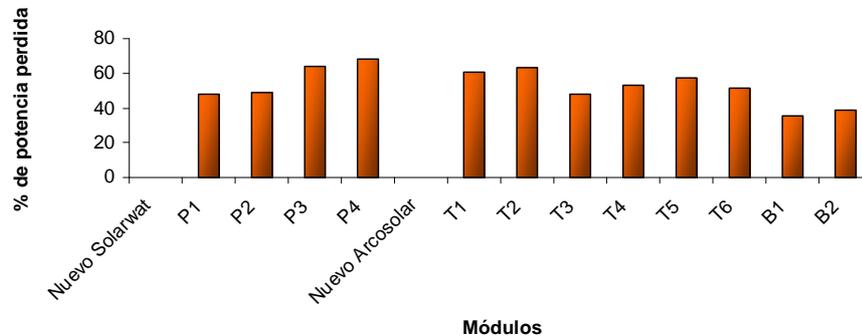
Figura 3: Curvas características I-V del conjunto de módulos Arcosolar.

Se observa también que el efecto sobre la tensión de circuito abierto no es considerable, con lo cual vemos que se cumplen las hipótesis que suelen hacerse al trabajar con dispositivos fotovoltaicos:

- La corriente de cortocircuito de una celda fotovoltaica depende principalmente de la irradiancia y a través de una función lineal. Esta hipótesis supone despreciar los efectos sobre la  $I_{CC}$  de la temperatura de la celda y la distribución espectral de la radiación. El error es inferior al 0,5 % en condiciones reales de operación. (Lorenzo, 2006)

- El voltaje de circuito abierto de un módulo depende principalmente de la temperatura de sus celdas fotovoltaicas. Esta hipótesis supone despreciar los efectos sobre la tensión de circuito abierto de la irradiancia. El error que se puede cometer al suponer esta hipótesis es inferior al 1 %. (Lorenzo, 2006)

En la *Figura 4* se ha graficado la pérdida de potencia por degradación, de la cubierta transparente de cada módulo respecto de la pérdida total que han sufrido (Montero Larocca, 2013). Lo llamativo en la misma es, que los módulos que menos pérdida tienen con respecto a la degradación de la cubierta transparente son los del grupo B, siendo la pérdida, en general, por esta degradación del orden del 57%.



*Figura 4. Pérdida de potencia por degradación de la cubierta transparente respecto de la pérdida total de potencia*

En términos generales, se puede decir que la disminución de la transmitancia trae como consecuencia una disminución en la corriente generada debido a que está directamente relacionada con la radiación que llega a la celda productora de energía eléctrica.

#### *Degradación de la resistencia serie y paralelo del circuito equivalente*

##### *Resistencia Serie*

En la *Tabla 1* se presentan los resultados obtenidos al calcular la resistencia serie para cada módulo (Montero Larocca, 2013)

Módulo	$(R_s \pm \Delta R_s) \Omega$
Solarwatt Nuevo	$0,58 \pm 0,06$
P1	$2,1 \pm 0,8$
P2	$1,1 \pm 0,4$
P3	$1,4 \pm 0,5$
P4	$1,9 \pm 0,6$
Arco Solar Nuevo	$0,39 \pm 0,07$
T1	$1,4 \pm 0,5$
T2	$1,4 \pm 0,6$
T3	$1,9 \pm 0,6$
T4	$1,5 \pm 0,4$
T5	$1,8 \pm 0,4$
T6	$1,8 \pm 0,4$
B1	$3,7 \pm 0,9$
B2	$4,5 \pm 0,8$

*Tabla 1: Resultado de la medida de la resistencia serie*

Tomando como base la resistencia serie del módulo nuevo se calculó la potencia perdida por el aumento de la resistencia en cada módulo expuesto. Lo que en términos de elementos de un circuito sencillo de corriente continua, sería como haber incorporado una resistencia extra en serie, siendo la equivalente de estas dos la que se midió en cada caso en los módulos degradados (Montero Larocca, 2013). En la *Figura 5* se muestra la pérdida de potencia en vatios en cada módulo en la resistencia extra que se incorporó al circuito. En el grupo de los P (Solarwatt) se disipan en la resistencia adicional entre 4,4 W y 8,5 W, en los del grupo T (Arcosolar) 3,8 W a 8,3 W y finalmente en el grupo B (Arcosolar) de 18,5 W a 22 W.

##### *Resistencia Paralelo*

En la *Tabla 2* se presentan los resultados obtenidos al calcular la resistencia paralelo para cada módulo (Montero Larocca, 2013)

Módulo	$(R_P \pm \Delta R_P) \Omega$
Solarwatt Nuevo	$(65 \pm 1) \times 10$
P1	$(40 \pm 5) \times 10$
P2	$(48 \pm 7) \times 10$
P3	$(47 \pm 7) \times 10$
P4	$(51 \pm 8) \times 10$
Arco Solar Nuevo	$(58 \pm 9) \times 10$
T1	$(32 \pm 3) \times 10$
T2	$(40 \pm 5) \times 10$
T3	$(39 \pm 5) \times 10$
T4	$(33 \pm 3) \times 10$
T5	$(31 \pm 3) \times 10$
T6	$(47 \pm 7) \times 10$
B1	$(23 \pm 2) \times 10$
B2	$(17,4 \pm 0,9) \times 10$

Tabla 2: Resultado de la medida de la resistencia paralelo por la determinación de la pendiente de la curva I-V

En la Tabla 2 se observa que en el primer grupo de módulos el mayor decrecimiento de la resistencia paralelo es de un 39% y en el segundo grupo dos subgrupos, el primero denominado T en el que el valor más desfavorable es 40%, porcentaje muy similar al obtenido en el grupo anterior y el denominado B es 66%. De la muestra analizada podemos concluir que la resistencia paralelo ha decrecido entre un 40% y un 70%.

Tomando como base la resistencia serie del módulo nuevo se calculó la potencia perdida por el aumento de la resistencia en cada módulo expuesto. Lo que en términos de elementos de un circuito sencillo de corriente continua, sería como haber incorporado una resistencia extra en serie, siendo la equivalente de estas dos la que se midió en cada caso en los módulos degradados. En la Figura 5 se muestra la pérdida de potencia en vatios en cada módulo en la resistencia extra que se incorporó al circuito. En el grupo de los P (Solarwatt) se disipan en la resistencia adicional entre 4,4 W y 8,5 W, en los del grupo T (Arcosolar) 3,8 W a 8,3 W y finalmente en el grupo B (Arcosolar) de 18,5 W a 22 W.

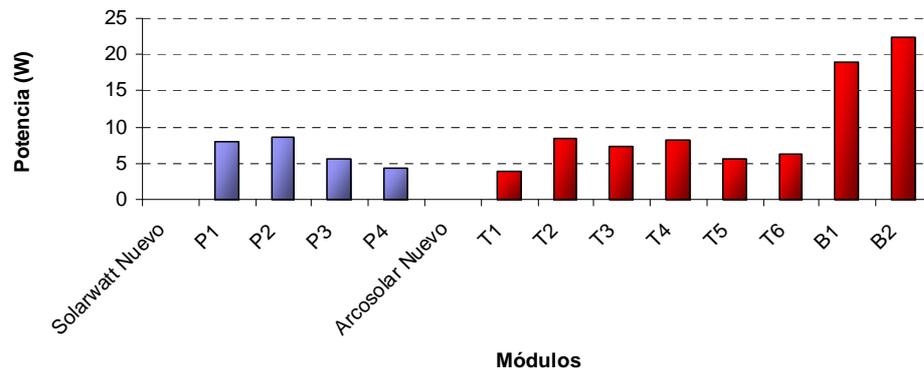


Figura 5. Pérdida de potencia por aumento de la resistencia serie

Si se toma como referencia la resistencia que originalmente tendría el módulo (nuevo) y la resistencia del módulo degradado se obtiene la potencia que efectivamente se disipa por la disminución de la resistencia paralelo. En términos del análisis de un circuito sencillo de corriente continua, es como si se hubiese conectado una resistencia más, en paralelo a la original, dando como resultado una resistencia equivalente a las medidas realizadas. La pérdida de potencia que ha sufrido este módulo será entonces la que disipa esta resistencia equivalente.

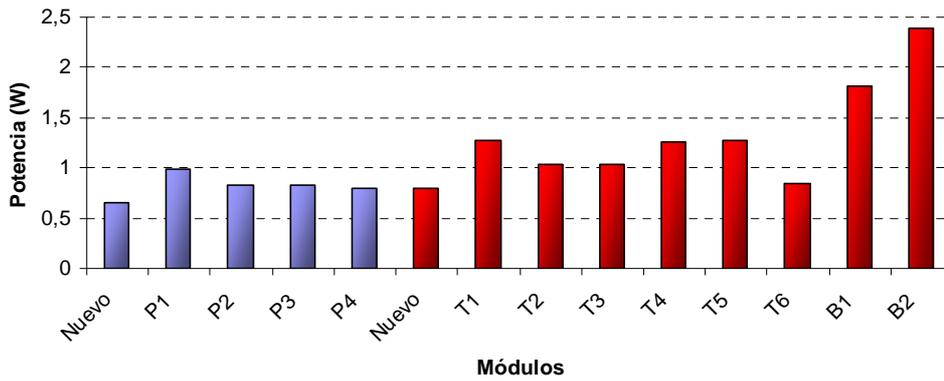


Figura 6. Pérdida de potencia en la resistencia paralelo

Como se puede observar en la Figura 6 un módulo nuevo pierde por efecto de la resistencia paralelo del orden de 0,65 a 0,80 W y en uno degradado entre 0,79 a 2,39 W. De estos resultados se puede deducir la influencia que tiene la disminución de la resistencia paralelo en el aumento de la pérdida de potencia. Este análisis se puede ver en la Figura 7.

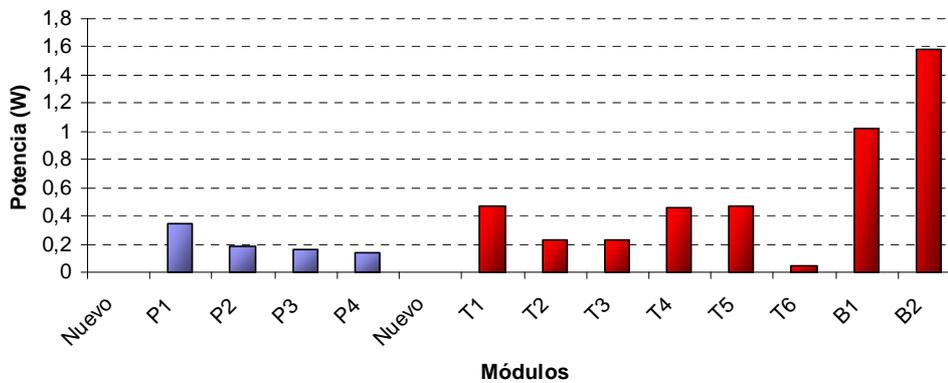


Figura 7. Pérdida de potencia por disminución de la resistencia paralelo de los módulos

En la Figura 7 se puede observar la potencia perdida respecto del módulo nuevo, es decir, llevando nuevamente este análisis a un circuito sencillo de corriente continua, la potencia que se pierde por la incorporación de otra resistencia paralelo. Esto proporciona como resultado, una resistencia equivalente igual a la medida. Se observa que esta pérdida oscila entre 0,14 y 1,58 W.

El aumento de la resistencia serie ocasiona una pérdida importante en la producción de potencia de los módulos fotovoltaicos, siendo en muchos casos del orden del 10%, salvo los módulos del grupo B, en los cuales las pérdidas por resistencia serie son más importantes que en los otros dos grupos, del orden del 20%.

La disminución de la resistencia paralelo que en los módulos P y T ocasiona una pérdida de potencia del 0,6% y en los B del 2,5%, que es menor que la ocasionada por el aumento de la resistencia serie.

## CONCLUSIONES

La pérdida de potencia de módulos fotovoltaicos debido a su prolongada exposición, especialmente a la radiación solar, en el noroeste de Argentina no puede ser minimizada. En consecuencia cuando se dimensionan este tipo de sistemas el factor degradativo, debe ser tenido muy en cuenta.

En la Figura 8 se ha graficado el porcentaje de pérdida que corresponde a cada una de las distintas degradaciones respecto de la potencia original que deberían entregar los módulos que se han analizado a lo largo de este trabajo.

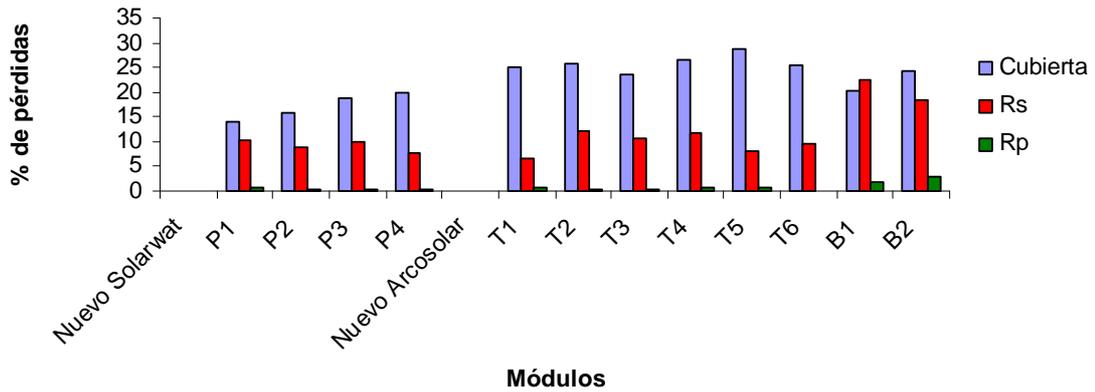


Figura 8. Pérdidas porcentuales analizadas de los módulos en estudio respecto de la potencia del módulo sin degradar

Del mismo se puede concluir que el factor que provoca la mayor pérdida de potencia es la degradación del material encapsulante, siendo ésta del orden del 30%.

El aumento de la resistencia serie es el segundo factor que ocasiona una pérdida importante en la producción de potencia de los módulos fotovoltaicos, siendo del orden del 10%. Para otro conjunto fue del orden del 20%.

El tercer factor que se analizó a lo largo de este trabajo es la influencia de la disminución de la resistencia paralela, que en un conjunto de módulos tuvo pérdidas de potencia de entre el 0,6% y el 2,5%, pero que frente a los otros factores se pueden considerar despreciables.

En la Figura 9 se ha graficado la composición de la pérdida total de potencia en función de los parámetros que se han analizado para cada uno de los módulos estudiados.

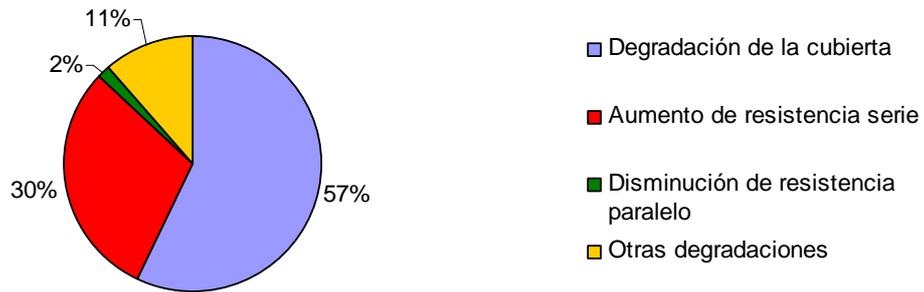


Figura 9. Composición de la pérdida total de potencia de los módulos analizados

Como conclusión final se propone un modelo de circuito equivalente de un módulo fotovoltaico degradado formado por el modelo de circuito de un diodo al que se le incorpora una fuente de corriente opuesta ( $I_C$ ) a la que representa la corriente foto generada que representa la pérdida por degradación de la cubierta transparente. Una resistencia variable en paralelo ( $R'_p$ ) a la resistencia paralelo del circuito original y otra resistencia variable en serie ( $R'_s$ ) a la resistencia serie original mostrado en la Figura 9. Ambas resistencias agregadas brindan como resultado una resistencia paralelo equivalente menor y una resistencia serie equivalente mayor que las originales.

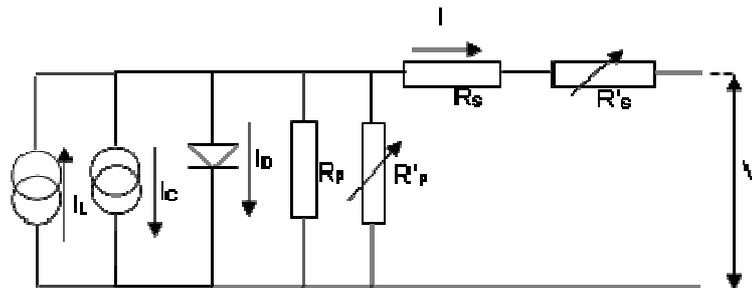


Figura 10. Modelo de circuito equivalente de un módulo degradado

## REFERENCIAS

- Lorenzo E. (2006) Electricidad Solar Fotovoltaica Vol. II Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos. Progensa, primera edición.
- Montero Larocca M. T. (2003). Evaluación y análisis del comportamiento eléctrico de paneles fotovoltaicos expuestos a la intemperie por más de 10 años. Tesis de maestría en Energías Renovables Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta.
- Montero Larocca, M. T; Cadena, C. (2004). Como influye la degradación de la cubierta transparente en la perdida de potencia de módulos FV, publicada en la revista Energías Renovables y Medio Ambiente, pág. 33-38, Volumen 14.
- Montero Larocca, M. T., Cadena, C. (2010) Análisis de factores que influyen en la pérdida de potencia de módulos fotovoltaicos de Si monocristalino, IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES\_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES), Cusco, Perú.
- Montero Larocca, M. T. (2013). Degradación de Módulos Fotovoltaicos: Análisis desde el Punto de Vista Eléctrico y su Interrelación con otros Factores. Tesis de Doctorado en Ciencias, Facultad Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta.
- Sidrach-de-Cardona M, Sánchez-Friera P. Peláez, Michel Piliouguine Carretero J. J., Llanos Mora-López. (2010). Degradación de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino tras 12 años de operación en España (2010), IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES\_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES), Cusco, 1° al 5 de noviembre 2010.
- Van Dyk E.E., Meyer E.L.(2004). Analysis of the effect of parasitic resistance on the performance of photovoltaic modules. Renewable Energy 29, pp 333-344.

## ABSTRACT

Technological improvements, cost reduction and a greater concern about the environment are making solar energy more attractive. Photovoltaic solar energy is one of these options and it is growing worldwide, particularly in this region where a high number of these facilities exist in dispersed rural areas. Modules power loss due to prolonged exposure, especially to solar radiation has not been sufficiently analysed yet. This is why certain parameters which permit to quantify approximately the damage suffered by these modules are measured in this work. The electrical and optical characteristics and chemical changes in the structure of some component materials of the encapsulated of a group of modules that has been exposed for more than twelve years are measured, to quantify approximately the damage that these modules has suffer, measuring the electric characteristics, optic and chemicals changes in the structure of some constituent materials of the capping of one group of modules that has been exposed for more than twelve years. These results have been compared with those obtained from an identical panel that has not been exposed. As a result of these tests, it has been found that the module power loss is not insignificant, evaluating the incidence that the degradation of the various factors analyzed in the total power loss. It can be concluded that when measuring this type of generators, some of the used coefficients would have to be increased.

**Keywords:** degradation, photovoltaics