

# DEGRADACIÓN DE MÓDULOS CIS TRAS UN AÑO DE EXPOSICIÓN EXTERIOR EN UN ENCLAVE SOLEADO

**G. Nofuentes** – gnofuen@ujaen.es

**M. Fuentes** – mfuentes@ujaen.es

**J. Aguilera** – aguilera@ujaen.es

**J. de la Casa** – delacasa@ujaen.es

Grupo de Investigación IDEA. Escuela Politécnica Superior.  
Universidad de Jaén. Campus de Las Lagunillas, s/n. 23071-Jaén (España).

Tel: +34 953 212 434. Fax: +34 953 211 967

**C. Plazaola** – carlos.plazaola@utp.ac.pa

Universidad Tecnológica de Panamá

## 3. Conversión fotovoltaica de la energía solar

**Resumen.** Este trabajo analiza la degradación experimentada por dos módulos de diseleniuro de indio cúprico (CIS) tras su exposición a la intemperie durante doce meses en la ciudad de Jaén (España, lat. 38°N, long. 3°O). Así, los datos experimentales mostrados en este trabajo recogen el comportamiento eléctrico a sol real durante un año de dos módulos CIS calibrados en el seno de un laboratorio acreditado independiente (CIEMAT-IER). Los resultados muestran una muy buena estabilidad de la tecnología bajo estudio a lo largo de la campaña experimental. Además, los valores del rendimiento global anual del módulo llegaron a superar el 90%. Todo lo anterior es coherente con la comparación de los valores de potencia pico proporcionados por el CIEMAT-IER antes y después de dicha campaña experimental: el descenso del valor de dicho parámetro se cifra en torno al 5%.

**Palabras clave:** Módulo fotovoltaico, CIS, Ensayo y medida a sol real, Degradación

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la degradación de módulos de diseleniuro de indio cúprico (CIS) en climas soleados posee un interés evidente. Así, la comprensión satisfactoria de la estabilidad a sol real de este material –mucho más escasamente documentada que aquella del silicio cristalino– conducirá al

empleo confiado de módulos de esta tecnología. En este sentido, el uso de los simuladores solares de gran área de tipo flash empleados para calibrar en condiciones estándar de medida (irradiancia global incidente  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , temperatura de la célula igual a  $25^\circ\text{C}$  y distribución espectral AM 1,5G) los módulos CIS antes y después de su exposición a sol real es una cuestión controvertida, ya que los valores de los parámetros eléctricos que se obtienen no proporcionan resultados consistentes. De hecho, la degradación en potencia pico así apreciada entra a menudo en contradicción con la energía que estos módulos generan (Karg et al., 2001; Cereghetti et al., 2001; Carr y Prior, 2004; Topic et al., 2007) durante el periodo de análisis.

Los datos experimentales mostrados en este trabajo recogen el comportamiento a sol real durante un año de dos módulos CIS calibrados en condiciones estándar de medida (CEM) en el seno de un laboratorio acreditado independiente (LAI). Se utilizó un sistema de medida de curvas  $I$ - $V$ , capaz de registrar los valores de la irradiancia global incidente ( $G$ ) y la temperatura de la célula ( $T_C$ ) en el momento del ensayo de ambos módulos. La campaña experimental se extendió durante 12 meses –desde junio 2006 a mayo 2007- en la ciudad de Jaén (España, lat.  $38^\circ\text{N}$ , long.  $3^\circ\text{O}$ ), afectada por un clima mediterráneo-continental muy soleado.

En este artículo se realiza un estudio la degradación de los módulos CIS más arriba reseñados a través de dos formas: a) Mediante el análisis de datos experimentales de funcionamiento a sol real, tanto por medio de un método utilizado en el National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE.UU) descrito por T. Strand et al. (1996) como por el cálculo del rendimiento global de cada módulo ( $PR_M$ ) y b) No obstante la controversia reseñada más arriba, se recurrió a la recalibración de los dos módulos en el seno del mismo laboratorio acreditado independiente, transcurrida la exposición a la intemperie.

## **2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL**

### **2.1. Módulos fotovoltaicos bajo ensayo**

La calibración en CEM de los parámetros eléctricos más significativos de dos módulos de  $40 \text{ Wp}$  Shell<sup>TM</sup> ST40 utilizados en este estudio –módulos A y B, a partir de ahora- se efectuó en el seno del laboratorio de sistemas fotovoltaicos del CIEMAT-IER con fecha 15/06/2006. En la misma fecha se calibró un módulo Shell<sup>TM</sup> ST5 de  $5 \text{ Wp}$  e idéntica tecnología –módulo C, a partir de ahora- a fin de ser utilizado como sensor de irradiancia.

De este modo se dispuso –a los efectos del alcance de este trabajo- de referencias primarias cuyos parámetros eléctricos en las mencionadas condiciones son conocidos con exactitud, reduciendo de esta forma la incertidumbre asociada a los valores nominales aportados por el fabricante. Es destacable que los referidos valores nominales están ligeramente

subvalorados. Los parámetros eléctricos más característicos en CEM de los módulos utilizados se presentan en las Tab. 1 y 2.

Tabla 1. Caracterización en CEM de los parámetros eléctricos más importantes de los módulos A y B proporcionada por el fabricante y el Laboratorio Acreditado Independiente, al comienzo de la campaña experimental.  $P^*_{MOD,M}$  = Potencia máxima del módulo en CEM (W);  $V^*_{MOD,OC}$  = Tensión en circuito abierto del módulo en CEM (V);  $I^*_{MOD,SC}$  = Corriente de cortocircuito del módulo en CEM (A);  $V^*_{MOD,M}$  = Voltaje en el punto de máxima potencia del módulo en CEM (V);  $I^*_{MOD,M}$  = Corriente en el punto de máxima potencia del módulo en CEM (A).

Módulo A			Módulo B	
	Fabricante	LAI	Fabricante	LAI
$P^*_{MOD,M}$	40 W ± 5%	40,45 W ± 2,2%	40 W ±	42,44 W ± 2,2%
$V^*_{MOD,OC}$	23,3 V	22,45V ± 0,3%	23,3 V	23,05V ± 0,3%
$I^*_{MOD,SC}$	2,68 A	2,87 A ± 1,8%	2,68 A	2,78 A ± 1,8%
$V^*_{MOD,M}$	16,6 V	16,18 V ± 0,3%	16,6 V	17,25 V ± 0,3%
$I^*_{MOD,M}$	2,41 A	2,50 A ± 1,8%	2,41 A	2,46 A ± 1,8%

Tabla 2. Caracterización en CEM de los parámetros eléctricos más importantes del módulo C proporcionada por el fabricante y el Laboratorio Acreditado Independiente, al comienzo de la campaña experimental.

Módulo C		
	Fabricante	LAI
$P^*_{MOD,M}$	5 W ± 5%	5.93W ± 2.2%
$V^*_{MOD,O}$	22.9 V	23.77V ± 0.3%
$I^*_{MOD,SC}$	0.39 A	0.37A ± 1.8%
$V^*_{MOD,M}$	15.6 V	17.97V ± 0.3%
$I^*_{MOD,M}$	0.39 A	0.33A ± 1.8%

## 2.2. Equipo de ensayo y medida a sol real

El equipo de ensayo y medida a sol real se basó en una carga electrónica Kepco™, detectores termoresistivos Pt100 para medir la temperatura de la célula y el módulo calibrado C, el cual desempeñó el papel de sensor de irradiancia, como se ha comentado más arriba. Un datalogger Agilent™ se encargó de registrar estos datos mientras un computador -mediante Labview™ - controló el sistema. Mediante un cuadro de contactores de alta potencia Siemens™ Sirius serie 3RT, se efectuaron secuencialmente los

ensayos sobre los módulos A y B. Las medidas fueron registradas a intervalos de 2 minutos.

### 3. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

A fin de estudiar la degradación de los módulos tras su exposición a la intemperie durante 12 meses, en este apartado se tratará de estimar la posible pérdida de potencia máxima en CEM que aquéllos puedan haber experimentado mediante el análisis de los datos experimentales. Siguiendo el camino fijado por otras valiosas contribuciones (Cereghetti et al., 2001; Carr y Prior, 2004) la estabilidad de los módulos ha sido analizada por medio de: a) el método desarrollado en el NREL, descrito por T. Strand et al., (1996), y b) calculando el rendimiento global de los módulos ( $PR_M$ ).

El método desarrollado por T. Strand et al. parte del cálculo del valor experimental del coeficiente de temperatura de la máxima potencia de la célula ( $\gamma$ , en  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Para ello se corrigen los datos empíricos de la potencia máxima a  $G = 1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , -potencia normalizada- representándolos frente a  $T_C$  del módulo en cuestión. A continuación se realiza una regresión lineal de la potencia normalizada vs.  $T_C$ . El valor experimental de  $\gamma$  se halla a partir de la pendiente de la recta de regresión. Lógicamente, el coeficiente de determinación  $R^2$  indica la bondad del ajuste. Por último, la estabilidad de los módulos se juzga apreciando la evolución a través del tiempo de la potencia máxima normalizada y corregida en temperatura con el valor experimental de  $\gamma$  calculado anteriormente. Las Figs, 1 y 2 representan los valores de esta potencia máxima normalizada y corregida en temperatura para los módulos A y B. Las marcas del eje X indican simplemente el mes en el cual las medidas expuestas fueron grabadas, por lo que dichas marcas no se deben asociar a una fecha específica (i.e.: Nov 06 no está asociado a un día concreto, ni el día 1, ni el 30).

El rendimiento global del módulo puede escribirse con arreglo a la siguiente expresión:

$$PR_M = \frac{E}{P_{MOD,M}^*} \div \frac{H}{1000} \quad (1)$$

donde  $E$  = Energía producida durante el periodo de tiempo sometido a análisis (Wh),  $H$  = Irradiación global incidente durante el periodo de tiempo sometido a análisis ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Los valores anuales de  $PR_M$  ascienden a 0,90 y 0,95 para los módulos A y B, respectivamente. En cuanto a los valores de  $P_{MOD,M}^*$  empleados en la Ec. (1) para cada módulo son aquéllos recogidos en la tabla 1. Obviamente, se trata del caso más desfavorable, puesto que al considerar el estado no degradado de los módulos,  $P_{MOD,M}^*$  es mayor de lo que será tras su exposición a la intemperie.

Tras finalizar la campaña experimental, los tres módulos fueron recalibrados en las instalaciones del CIEMAT-IER con fecha 02/07/2007. Los resultados de esta recalibración se muestran en las Tabs. 3 y 4.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a través del método de T.Strand et al. muestran una excelente estabilidad de los dos módulos a lo largo del período de estudio (ver Figs. 1 y 2). El valor de la potencia máxima normalizada y corregida en temperatura del módulo B a lo largo de la campaña experimental arroja valores ligeramente superiores a los recogidos en las tablas 1 y 3: este hecho está siendo investigado aún. Por último, los valores del rendimiento global anual de los módulos superaron el 90%. Todo lo anterior es coherente con la comparación de los valores de potencia pico para los dos módulos proporcionados por el laboratorio acreditado independiente antes y después de la campaña experimental –el descenso de potencia pico se cifra en torno al 5%. A la vista de todos los resultados experimentales anteriores se puede concluir que los módulos CIS han mostrado una estabilidad a lo largo del un año de funcionamiento comparable a la de los módulos de silicio cristalino, cuya potencia pico se degrada típicamente un 3% en las primeras horas de exposición y en torno a un 1% anual (Green, 2003).

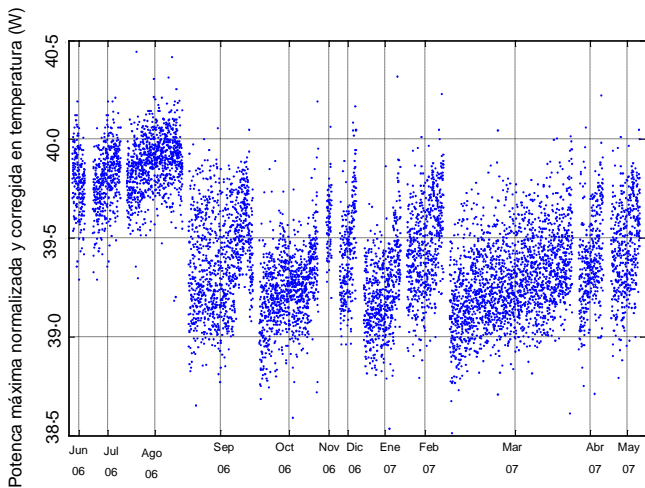


Figura 1 - Potencia máxima normalizada y corregida en temperatura del módulo A a lo largo de la campaña experimental

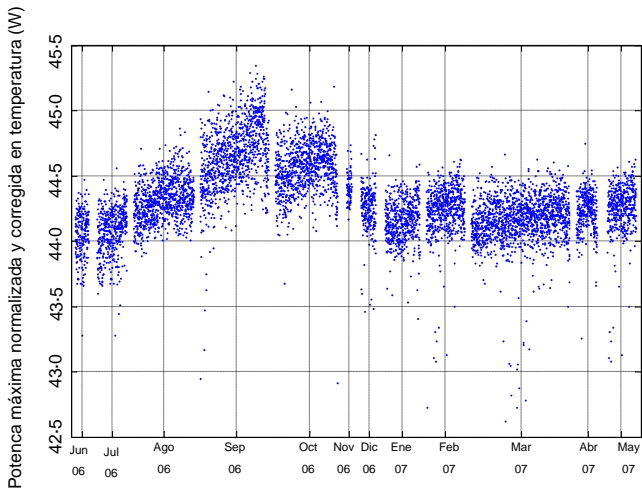


Figura 2 - Potencia máxima normalizada y corregida en temperatura del módulo B a lo largo de la campaña experimental

Tabla 3. Caracterización en CEM de los parámetros eléctricos más importantes de los módulos A y B proporcionada por el fabricante y el Laboratorio Acreditado Independiente, transcurrida la campaña experimental.

	Módulo A		Módulo B	
	Fabricante	LAI	Fabricante	LAI
$P^*_{MOD,M}$	40 W $\pm$ 5%	38.70 W $\pm$ 2.2%	40 W $\pm$	40.20 W $\pm$ 2.2%
$V^*_{MOD,O}$	23.3 V	21.73V $\pm$ 0.3%	23.3 V	23.05V $\pm$ 0.3%
$I^*_{MOD,SC}$	2.68 A	2.87 A $\pm$ 1.8%	2.68 A	2.72 A $\pm$ 1.8%
$V^*_{MOD,M}$	16.6 V	15.8 V $\pm$ 0.3%	16.6 V	17.34 V $\pm$ 0.3%
$I^*_{MOD,M}$	2.41 A	2.45 A $\pm$ 1.8%	2.41 A	2.32 A $\pm$ 1.8%

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto ‘Estimación de la energía generada por módulos fotovoltaicos de capa delgada: influencia del espectro’ con número de expediente ENE2008-05098/ALT, cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y por fondos FEDER. Los autores agradecen la colaboración de Faustino Chenlo y José Pedro Silva (CIEMAT-IER) para la realización de este trabajo.

Tabla 4. Caracterización en CEM de los parámetros eléctricos más importantes del módulo C proporcionada por el fabricante y el Laboratorio Acreditado Independiente, transcurrida la campaña experimental.

Módulo C		
	Fabricante	LAI
$P^*_{MOD.M}$	5 W $\pm$ 5%	5.91 $\pm$ 2.2%
$V^*_{MOD.O}$	22.9 V	23.56 $\pm$ 0.3%
$I^*_{MOD.SC}$	0.39 A	0.37A $\pm$ 1.8%
$V^*_{MOD.M}$	15.6 V	17.89V $\pm$ 0.3%
$I^*_{MOD.M}$	0.39 A	0.33A $\pm$ 1.8%

## REFERENCIAS

- Carr A. J. y Prior T. L. (2004). A comparison of the performance of different module types in temperate climates. *Solar Energy* 76, 285-294.
- Cereghetti N. y Realini A., Chianese D., Rezzonico S. (2001) Power and energy production of PV modules. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> EPVSEC*, Munich, Alemania, pp. 710-713.
- Green, M.A., 2003. Crystalline and thin-film silicon solar cells: state of the art and future potencial. *Solar Energy*, 74, pp. 181-192.
- Karg F. H., Kohake D., Nierhoff T., Kühne B., Grosser S. y Lux-Steiner M. Ch. (2001) Performance of grid-coupled PV arrays based on CIS solar modules. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> EPVSEC*, Munich, Alemania, pp. 393 - 395.
- Strand T. R., Kroposki B. y Hansen R. (1996) Siemens solar CIS PV module and system performance at the NREL. *Proceedings of the 25<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Washington, EE.UU, pp. 965-968.
- Topic M., Brecl K. y Sites J. (2007) Effective efficiency of PV modules under field conditions. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 15, 19-26.