

SISTEMA EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EN EXTERIORES

Michel Piliouguine – michel@ctima.uma.es

Jesús Carretero – carretero@ctima.uma.es

Llanos Mora-López – llanos@lcc.uma.es

Mariano Sidrach-de-Cardona – msidrach@ctima.uma.es

Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Málaga, España

Resumen. En este trabajo se describe un sistema experimental desarrollado en el laboratorio de fotovoltaica en la Universidad de Málaga (España) cuya finalidad es la medición de la curva tensión-corriente de módulos fotovoltaicos en exteriores. Las medidas se realizan de forma automática mediante el uso de equipos comerciales controlados por una computadora usando el interfaz GPIB. A cada módulo se le aplica un barrido en tensión con una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, mientras que un generador de funciones sincroniza dos multímetros para medir valores de tensión y corriente. La incertidumbre asociada a cada una de estas medidas también es determinada. El método de sincronización propuesto asegura que las medidas de los valores de voltaje y la corriente se realizan de forma simultánea. Además se estiman los principales parámetros eléctricos y se registran las condiciones meteorológicas en el momento de la medida. Una aplicación informática proporciona un interfaz amigable que permite al usuario configurar distintos parámetros, tales como el tiempo de barrido, los límites de tensión y de corriente, el número de puntos de la curva I - V , así como la medida secuencial de hasta ocho módulos fotovoltaicos.

Palabras-clave: Medida de curvas I - V , medidas en exteriores, análisis de incertidumbre

1. INTRODUCCIÓN

La medida experimental de la curva I - V nos permite conocer con precisión los parámetros eléctricos de un dispositivo fotovoltaico. Esta medida proporciona información muy relevante para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos. A partir de la curva I - V de un módulo fotovoltaico podemos obtener información muy útil relativa a su calidad y rendimiento. Por esta razón se ha diseñado un sistema experimental para la caracterización en exteriores de los módulos en nuestro laboratorio de fotovoltaica de Universidad de Málaga (España).

En comparación con las medidas con simulador solar, las principales ventajas de las medidas en exteriores son que no se requiere ninguna fuente de luz artificial, no hay ninguna limitación en el tamaño de las muestras y la iluminación de las muestras es más homogénea. Existen diversos métodos para realizar estas medidas. Durán et al. (2008), presentan una revisión de los diferentes métodos para medir la curva I - V de módulos fotovoltaicos. Estos pueden clasificarse en cinco categorías: basados en una resistencia variable, basados en una carga capacitiva, basados en una carga electrónica, basados en convertidores DC-DC y basados en una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, encuadrándose nuestro equipo en esta última variante. Las fuentes de alimentación de cuatro cuadrantes son capaces de tanto entregar como de disipar energía, en otras palabras, pueden actuar bien como fuente o bien como carga. Con los módulos fotovoltaicos el principal interés está en la obtención la curva I - V en el primer cuadrante, pero la exploración de los puntos que están en el segundo y cuarto cuadrante podría ser una importante herramienta de diagnóstico además de permitir la obtención de puntos experimentales en torno a los ejes, lo que nos permitiría calcular I_{SC} y V_{OC} con mayor precisión. Hecktheuer et al. (2002) describen un sistema controlado por computadora en el que se usa una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes para hacer un barrido en voltaje de los módulos, mientras que dos multímetros digitales miden los pares I - V cada vez que les llega una orden de medida desde la computadora. Varios autores, Malik (2003), Granek (2004) y Fernández-Reche (2006), proponen otros sistemas similares basados también en una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes.

2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El principio básico general que se utiliza para medir la curva $I-V$ de un módulo fotovoltaico se basa en la lectura de la corriente que circula por el módulo cuando la tensión se incrementa gradualmente entre el punto de cortocircuito y el punto de circuito abierto. En nuestro sistema, para hacer el barrido en tensión usamos una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes Kepeco BOP 100-100MG. Un ordenador conectado a la fuente mediante GPIB controla el barrido de forma automática. Para programar el barrido y controlar la fuente se usa el lenguaje de programación SCPI. El esquema utilizado para medir la curva $I-V$ se muestra en la figura 1.

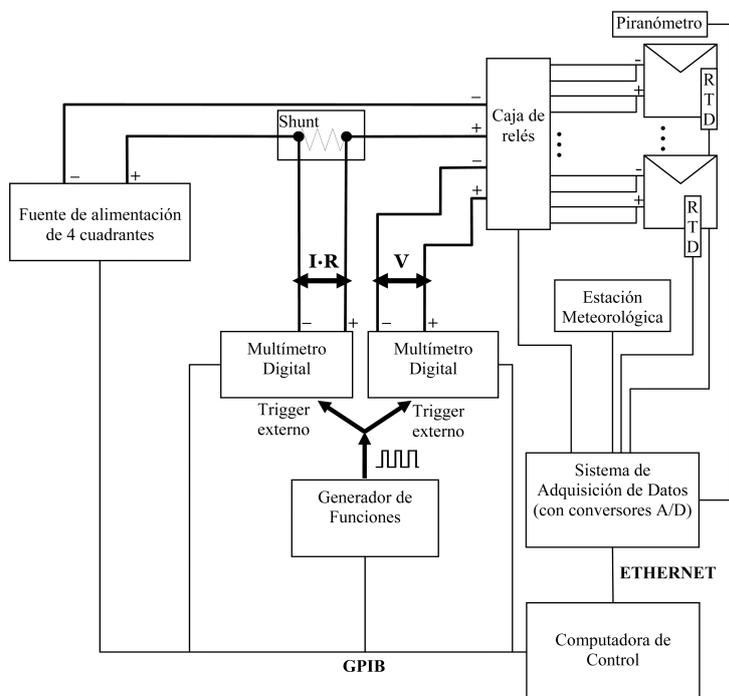


Figura 1. Esquema del sistema de medida de curva $I-V$ implementado

Para hacer la medida se utiliza una configuración a cuatro hilos, evitando así errores derivados de la caída de tensión en los cables. La tensión del módulo se mide con un multímetro digital Agilent 4411A utilizando el rango de ± 100 V. Por otra parte, la corriente del módulo se mide con la ayuda de un shunt en serie entre el módulo y la fuente. El shunt a usar se selecciona dependiendo de la corriente máxima que den los módulos a medir (para las medidas que aparecen en este trabajo se ha utilizado un shunt de 6 A de valor nominal y una salida de 100 mV). La caída de tensión a través del shunt se mide con otro multímetro digital idéntico al anterior, pero configurado para medir en el rango de ± 100 mV. Ambos multímetros están conectados a través de GPIB y se han programado para hacer una medida cada vez que les llega un pulso a sus respectivas entradas de disparo externas. La sincronización se lleva a cabo mediante un generador de forma de onda Agilent 33220A, que crea una señal cuadrada que llega de forma simultánea a los dos multímetros, siendo la frecuencia de la señal generada la tasa de pares $I-V$ que se registran cada segundo. Mientras se realiza el barrido, los multímetros almacenan en su memoria interna las medidas y cuando el proceso ha terminado el ordenador recupera los datos almacenados.

En este sistema podemos realizar la medida de la curva $I-V$ de un módulo de dos maneras diferentes: con una curva de una rampa o con una curva de dos rampas. En el primer caso todas las medidas aparecen equiespaciadas a lo largo del eje de tensión. Sin embargo, en el segundo caso se realizan dos rampas, una primera rampa muy rápida entre la tensión inicial y una tensión intermedia (antes del codo de la curva $I-V$), y otra rampa lenta entre la tensión intermedia y el valor de tensión final. Esto implica que se van a capturar muchos más puntos en la parte de la curva $I-V$ con más pendiente (en la parte plana de la curva no es necesario tener muchos puntos). Esto nos permite medir muchos puntos experimentales alrededor del punto de máxima potencia y del punto de circuito abierto, de modo que estos valores se podrán determinar con mayor precisión.

Al mismo tiempo en el que se mide la curva $I-V$ se registran las variables meteorológicas. La temperatura del módulo se mide a través de un sensor Pt100 adherido a la parte trasera del mismo, mientras que la irradiancia incidente sobre la superficie del módulo se mide a través de un piranómetro Kipp & Zonen CMP21. Estas señales se registran al comienzo y al final de cada medida, y sólo si la diferencia entre ellas es inferior a un umbral fijado por el usuario, se almacena la curva. Estos y otros sensores (como anemómetro, veleta, pluviómetro, barómetro...) están conectados a un sistema modular de adquisición de datos conectado al ordenador de control mediante interfaz Ethernet. El sistema integra una caja de relés que multiplexa hasta ocho módulos fotovoltaicos. El control de la caja de relés se realiza a través del sistema de adquisición de datos en el que se ha instalado un módulo específico con tal fin.

3. MÉTODO DE SINCRONIZACIÓN

Tradicionalmente se usa una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes para hacer un barrido en tensión del dispositivo fotovoltaico, mientras un par de multímetros registran los valores de tensión y corriente correspondientes a cada uno de los puntos de la curva $I-V$. Estos multímetros suelen sincronizarse por software, utilizando una instrucción GPIB que permite el disparo simultáneo de la medida de ambos multímetros.

Una pequeña diferencia de tiempo en el disparo de ambos multímetros implica que las lecturas de tensión y de corriente no corresponden al mismo punto de trabajo del dispositivo, con lo que el punto medido no corresponde con ningún punto real de la curva $I-V$. Esta diferencia podría ser especialmente significativa en las inmediaciones de V_{OC} donde la pendiente de la curva es máxima.

Se han llevado a cabo dos pruebas para comparar el método de sincronización software mediante instrucciones GPIB con el método que se presenta en este trabajo, o sea, mediante una señal externa que dispara ambos multímetros. En ambas pruebas se ha generado una rampa en tensión desde -50V hasta 50V, con una duración de un segundo. En cada prueba se han tomado un total de 100 medidas de la misma señal usando un par de multímetros (Agilent 34411A) conectados a los mismos terminales. En la primera prueba ambos multímetros se han sincronizado usando GPIB (software) mientras que en la segunda prueba los mismo multímetros se han sincronizado mediante una señal cuadrada que se bifurca y se conecta a la entrada de disparo externo de ambos multímetros. Si la medida se hace realmente de forma simultánea, ambos multímetros deberían leer el mismo valor de tensión. Una vez registradas las medidas en cada una de las pruebas se calcula la diferencia entre los valores registrados por cada uno de los multímetros correspondientes al mismo instante de tiempo. En la Figura 2 se pueden observar las diferencias correspondientes a la primera prueba (sincronización por GPIB).

Los resultados muestran claramente que la diferencia entre los valores registrados por cada uno de los multímetros es significativamente mayor que la incertidumbre asociada a la medida de tensión. Esto significa que la medida no puede ser considerada realmente simultánea, y en consecuencia se tiene una fuente de incertidumbre adicional que debe ser tenida en cuenta a la hora de estimar la incertidumbre asociada a los puntos medidos de la curva $I-V$.

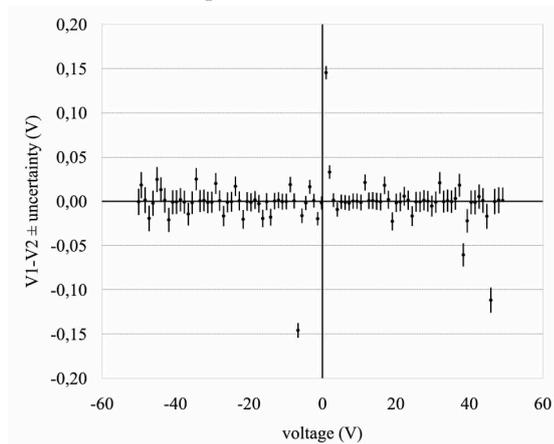


Figura 2. Diferencias entre los valores de tensión medidos por ambos multímetros cuando se realiza una sincronización usando GPIB (software).

Los resultados que se obtienen usando el método de sincronización propuesto en este trabajo se presentan en la Figura 3. En este caso, las diferencias entre las medidas de ambos multímetros son mucho menores que las que se obtienen mediante el método anterior, y además son menores que la incertidumbre asociada a cada valor de tensión. Así que en este caso sí que es razonable considerar que las medidas se hacen de forma simultánea.

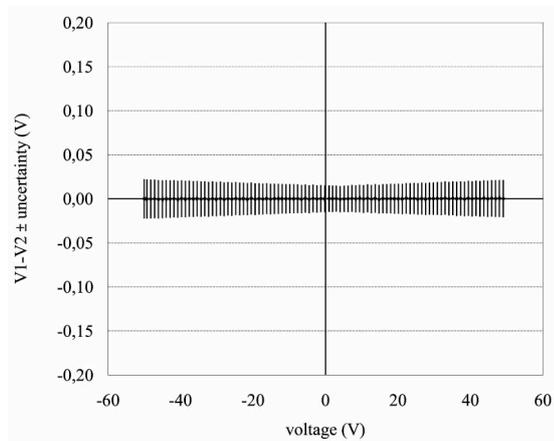


Figura 3. Diferencias entre los valores de tensión medidos por ambos multímetros cuando se realiza una sincronización usando el método propuesto.

4. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

En esta sección se estiman la incertidumbre asociada a cada una de las medidas de los puntos discretos que forman la curva $I-V$ (la estimación de los parámetros eléctricos y sus incertidumbres se abordan en la siguiente sección). En esta sección se han seguido la notación recomendada por ISO/IEC Guide 98-3 “Guide to the expression of uncertainty in measurement” (GUM) y se han seguido los procedimientos descritos por Whitfield and Osterwald (2001). Además, se han tenido en cuenta las especificaciones los multímetros dadas por Agilent 34410A/11A 6½ Digit Multimeter User’s Manual. Siguiendo estas referencias ha sido posible determinar la incertidumbre expandida con un 95% de nivel de confianza asociada a cada medida de tensión que se puede dar mediante la siguiente expresión:

$$U_v = 2\sqrt{7.1 \cdot 10^{-10} \cdot V^2 + 1.4 \cdot 10^{-7} \cdot |V| + 6.8 \cdot 10^{-6}}$$

Esta incertidumbre depende del valor de tensión V que se haya medido. Esto significa que cada punto de la curva $I-V$ tendrá una incertidumbre diferente. El peor caso ocurre cuando se mide el mayor valor de tensión posible con nuestro sistema, o sea, 100 V. Así que la incertidumbre en tensión asociada al peor caso sería $U_{v,worst} = 0.01$ V.

De igual forma, la incertidumbre expandida U_i con un nivel de confianza del 95% para la medida de corriente sería:

$$U_i(A) = 2 \cdot \sqrt{8.6 \cdot 10^{-6} I^2 + 8.9 \cdot 10^{-8} |I| + 1.8 \cdot 10^{-6}}$$

Ahora, el peor caso ocurre cuando la corriente igual a la máxima corriente que podemos medir con el shunt seleccionado (6A). Así que la incertidumbre expandida en el peor caso para la medida de corriente sería $U_{i,worst} = 0.04$ A.

Según la guía GUM, y teniendo en cuenta que $P=V \cdot I$, la incertidumbre expandida con un nivel de confianza del 95% para cada valor de potencia asociado a cada uno de los puntos se calcula como:

$$U_p(W) = 2 \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)^2 \left(\frac{U_v}{2}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I}\right)^2 \left(\frac{U_i}{2}\right)^2} = 2 \sqrt{1.4 \cdot 10^{-7} \cdot |V| \cdot I^2 + 6.8 \cdot 10^{-6} \cdot I^2 + 8.9 \cdot 10^{-8} \cdot V^2 \cdot |I| + 1.8 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 + 8.6 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 \cdot I^2}$$

Finalmente, el peor caso en la medida de potencia será (usando el shunt seleccionado) cuando la tensión vale 100 V y la corriente 6 A, o sea, que la incertidumbre expandida asociada a la medida de potencia en el peor caso con un nivel de confianza del 95% será $U_{p,worst} = 3.6$ W.

Cada vez que se mide una curva $I-V$, se miden la irradiancia y la temperatura del módulo. Así que también es necesario estimar las incertidumbres asociadas a estas medidas. Siguiendo el trabajo de Kratzenberg et al. (1996), las especificaciones del piranómetro Kipp & Zonen CMP21 y las instrucciones de operación del módulo cFP-AI-112 (módulo de medida de tensión) del FieldPoint se llega a la siguiente expresión que da una estimación de la incertidumbre expandida con un nivel de confianza del 95% asociada a la medida de irradiancia:

$$U_G = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{DR}^2}{3} + 6.5 \cdot 10^{-5}\right) G^2 + 4.4 \cdot 10^{-3} G + 6.9 \cdot 10^1}$$

donde U_{DR} es la incertidumbre asociada al error direccional del piranómetro, cuyo valor da el fabricante en función del ángulo de incidencia (AOI). En incidencia normal ($U_{DR} = 0$) y con una irradiancia igual a 1000 W/m^2 , la incertidumbre expandida con un nivel de confianza del 95% tiene un valor de 23 W/m^2 (2,3%).

La incertidumbre asociada a la medida de temperatura de módulo es estimada teniendo en cuenta las instrucciones de operación del módulo cFP-RTD-124 (módulo de medida de sensores RTD) del FieldPoint y las especificaciones correspondientes a un sensor Pt100 de clase B, dadas por la norma IEC 60751. Así que la incertidumbre expandida asociada a la medida de temperatura de módulo con un nivel de confianza del 95%,

$$U_T = 2 \cdot \sqrt{8.3 \cdot 10^{-6} \cdot T_M^2 + 1.0 \cdot 10^{-3} \cdot |T_M| + 4.6 \cdot 10^{-1}}$$

Así que una lectura de temperatura de módulo en torno a los $50 \text{ }^\circ\text{C}$ tendrá una incertidumbre expandida de $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Además de los puntos de la curva $I-V$ y de la curva $P-V$, es necesario estimar los principales parámetros eléctricos del modulo en el momento de la medida: la corriente de cortocircuito (I_{SC}), la tensión de circuito abierto (V_{OC}), el valor de máxima potencia (P_M), el valor de corriente en el punto de máxima potencia (I_M) y el valor de tensión en el punto de máxima potencia (V_M). Estos valores pueden ser luego usados para calcular otros parámetros derivados como por ejemplo el fill factor (FF).

Normalmente el valor de la corriente de cortocircuito (I_{SC}) se suele calcular mediante interpolación lineal de los dos puntos más cercanos al eje de tensión cero (se coge un punto anterior y otro posterior al eje). De acuerdo con Emery (2003), una regresión lineal usando más de dos puntos reduciría la incertidumbre, pero esta opción es rechazada porque al hay cierto riesgo de tomar puntos de zonas afectadas por los diodos de “bypass”. De igual forma, la tensión de circuito abierto (V_{OC}) es obtenida mediante la interpolación lineal de los dos puntos más cercanos al eje de corriente cero. Aunque la curva $I-V$ es claramente no lineal en las proximidades de V_{OC} , la interpolación lineal es una buena aproximación siempre que la densidad de puntos alrededor del eje sea suficiente, y esto es posible de configurar mediante el programa de control.

Sean (V^- , I^-) y (V^+ , I^+) los puntos más cercanos al eje de tensión cero. Entonces, la incertidumbre expandida asociada a la medida de I_{SC} con un nivel de confianza del 95% sería:

$$U_{I_{SC}} = 2 \sqrt{\left(\frac{\partial I_{SC}}{\partial I^-}\right)^2 u^2(I^-) + \left(\frac{\partial I_{SC}}{\partial I^+}\right)^2 u^2(I^+) + \left(\frac{\partial I_{SC}}{\partial V^-}\right)^2 u^2(V^-) + \left(\frac{\partial I_{SC}}{\partial V^+}\right)^2 u^2(V^+)}$$

$$= 2 \sqrt{\left(\frac{V^+}{V^+ - V^-}\right)^2 u^2(I^-) + \left(\frac{V^-}{V^+ - V^-}\right)^2 u^2(I^+) + \left(\frac{(I^+ - I^-)V^+}{(V^+ - V^-)}\right)^2 u^2(V^-) + \left(\frac{(I^+ - I^-)V^-}{(V^+ - V^-)}\right)^2 u^2(V^+)}$$

La estimación de V_{OC} y su incertidumbre expandida $U_{V_{OC}}$ se hace de forma análoga.

El valor de potencia máxima (P_M) se suele tomar como el máximo de los valores de potencia (\bar{P}_M) de la colección de puntos discretos que forman la curva $I-V$ medida (V_M y I_M también se toman como los valores de tensión \bar{V}_M y corriente \bar{I}_M asociados a dicho punto discreto con mayor potencia). Sin embargo, ya que este valor se toma de una muestra discreta, es una subestimación del verdadero valor de máxima potencia. Emery (2003) sugiere el uso de métodos más precisos, como por ejemplo un ajuste de los puntos de la curva $P-V$ con un polinomio de cuarto grado o superior. En nuestro sistema, tenemos la opción de configurar la aplicación para capturar los puntos del codo con una densidad suficiente, de forma que la diferencia en potencia entre dos puntos consecutivos esté en el mismo orden de magnitud que la incertidumbre asociada a la medida. En consecuencia, nosotros proponemos dar como punto de máxima potencia el punto discreto medido que maximiza el producto $I \cdot V$.

El factor de llenado FF se define como,

$$FF (\%) = \frac{P_M}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \cdot 100$$

En consecuencia, la incertidumbre expandida asociada al valor del factor de llenado de la curva $I-V$ se puede estimar usando la siguiente expresión,

$$U_{FF} = 2 \sqrt{\left(\frac{\partial FF}{\partial P_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{U_{P_m}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\partial FF}{\partial I_{SC}}\right)^2 \left(\frac{U_{I_{SC}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\partial FF}{\partial V_{OC}}\right)^2 \left(\frac{U_{V_{OC}}}{2}\right)^2}$$

$$= 2 \frac{100}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \sqrt{\left(\frac{U_{P_m}}{2}\right)^2 + \frac{P_m^2}{I_{SC}^2} \left(\frac{U_{I_{SC}}}{2}\right)^2 + \frac{P_m^2}{V_{OC}^2} \left(\frac{U_{V_{OC}}}{2}\right)^2}$$

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 6 se muestran dos curvas $I-V$ de un modulo de prueba obtenidas usando el sistema experimental propuesto en este trabajo. Estas medidas han sido tomadas en exteriores con diferentes valores de irradiancia y temperatura de modulo. Estos resultados han sido obtenidos usando dos rampas para la medida de las curvas $I-V$.

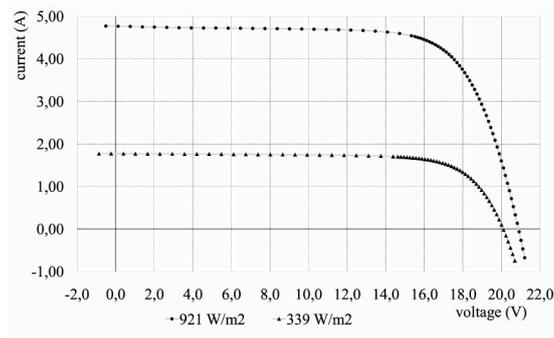


Figura 4: Medidas experimentales del módulo de prueba en exteriores bajo valores distintos de irradiancia y temperatura.

En la Tabla I se dan la estimación de los principales parámetros eléctricos de las curvas de la figura 4 y las incertidumbres asociadas a cada uno de los valores de los parámetros eléctricos. En la tabla se muestran también los valores de irradiancia y de temperatura así como las incertidumbres de dichos valores.

Tabla I. Valores de los parámetros eléctricos de las curvas $I-V$ de la figura 6 y sus incertidumbres.

	Curva 1		Curva 2	
	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre
I_{sc} (A)	4.768	0.023	1.773	0.008
V_{oc} (V)	20.881	0.005	20.095	0.006
P_M (W)	71.8	0.4	26.5	0.2
I_M (A)	4.336	0.023	1.606	0.009
V_M (V)	16.560	0.006	16.489	0.006
FF (%)	72.1	0.8	74.4	0.8
G (W/m ²)	921	23	339	18
T_M (°C)	40.7	1.4	39.0	1.4

Varias medidas en exteriores se han llevado a cabo de forma consecutiva para ilustrar la precisión del sistema experimental propuesto. Todas las medidas se han tomado bajo la misma irradiancia y temperatura de módulo. Los resultados de estas medidas pueden verse en la Figura 5. En la Tabla II se proporcionan la media, el máximo, el mínimo y la varianza de cada uno de los parámetros.

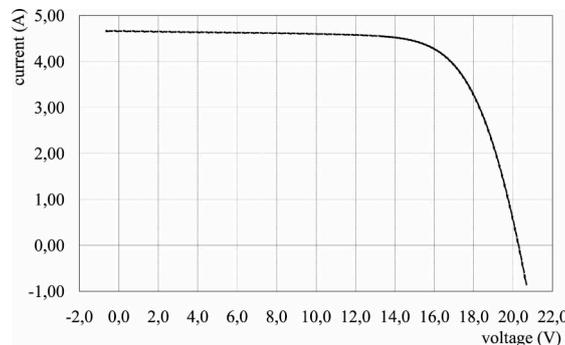


Figura 5. Gráfica de las quince curvas $I-V$ medidas consecutivamente del mismo modulo de prueba bajo la misma irradiancia y temperatura de módulo.

Tabla II. Mínimo, máximo, media y varianza de cada uno de los parámetros.

	Mín.	Máx.	Media	Varianza
I_{sc} (A)	4.65	4.67	4.66	$2.1 \cdot 10^{-5}$
V_{oc} (V)	20.2	20.3	20.3	0.0001
P_M (W)	68.2	68.5	68.4	0.006
I_M (A)	4.21	4.27	4.25	0.0003
V_M (V)	16.0	16.2	16.1	0.004
FF (%)	72.3	72.5	72.4	$1.7 \cdot 10^{-7}$
G (W/m ²)	930	932	930	0.4
T_M (°C)	44.6	45.1	45.0	0.02

7. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un nuevo sistema experimental destinado a la caracterización eléctrica de módulos fotovoltaicos en exteriores. El sistema propuesto se basa en el uso de una carga electrónica de cuatro cuadrantes y dos multímetros digitales sincronizados por un generador de funciones que genera una señal cuadrada que dispara ambos multímetros de forma simultánea. A su vez, se registran las variables meteorológicas antes y después de la medida, confirmándose que durante el tiempo que dura la medida, dichas condiciones se mantienen constantes. Esto es especialmente interesante en días nublados, cuando la irradiancia cambia rápidamente. Una aplicación informática ha sido desarrollada para el control de la aplicación y la visualización y tratamiento de los datos experimentales. Esta aplicación de control se ejecuta en el ordenador principal y permite al usuario configurar y definir varias campañas de medidas para diferentes módulos. Se pueden medir de forma secuencial hasta 8 módulos fotovoltaicos. Las mediciones se realizan y se almacenan en una base de datos a intervalos regulares de tiempo. Se ha realizado un análisis de incertidumbre que incluye tanto la debida a la precisión de los equipos electrónicos como la debida a los métodos utilizados para estimar los parámetros eléctricos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al “Ministerio de Ciencia e Innovación” de España (proyecto nº ENE07-67248) y a la “Junta de Andalucía” (proyecto nº P07-RNM-02504) por los fondos públicos recibidos.

REFERENCIAS

- Agilent 34410A/11A 6½ Digit Multimeter User's Manual, Cuarta edición, Agilent Technologies, Santa Clara (CA, USA), 2007.
- CMA series albedometer/CMP series pyranometer. Instruction Manual, Kipp & Zonen, 2006.
- Durán E, Piliouguine M, Sidrach-de-Cardona M, Galán J, Andújar JM. Different methods to obtain the I - V curve of PV modules: A review, 33th IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC, San Diego (CA, USA), 2008; pp. 1-6. 359-366.
- Emery KA. Measurement and Characterization of Solar cells and Modules, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Cap. 16, pp. 701-747, Luque A. and Hegedus S. Editores, John Wiley & Sons, W. Sussex (Reino Unido), 2003; ISBN: 0-471-49196-9.
- Fernández-Reche et al. PSA Solar furnace: A facility for testing PV cells under concentrated solar radiation, Solar Energy Materials & Solar Cells 2006; 90(15), pp. 2480-2488.
- FP-AI-112 and cFP-AI-112, FieldPoint Operating Instructions, National Instruments Corporation, 2004.
- FP-RTD-124 and cFP-RTD-124, FieldPoint Operating Instructions, National Instruments Corporation, 2002.
- Granek F, Zdanowicz T. Advanced system for calibration and characterization of solar cells, Opto-Electronics Review 2004; 12(1), pp. 57-67.
- Hecktheuer LA, Krenzinger A, Prieb CWM. Methodology for photovoltaic modules characterization and shading effects analysis, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences 2002; 24(1), pp. 26-32.
- IEC 60751. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors, Second Edition, International Electrotechnical Commission, Geneva (Switzerland), 2008; ISBN: 2-8318-9849 8.
- ISO/IEC Guide 98-3, Evaluation of measurement data - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, First Edition, International Organization for Standardization (Switzerland), 2008.
- Kratzenberg MG, Beyer HG, Colle S, Albertazzi A. Uncertainty Calculations in Pyranometer Measurements and Applications, Proceedings of ASME International Solar Energy Conference ISEC2006, Denver (CO, USA), 1996; pp. 689-699.
- Malik AQ, Bin Haji Damit SJ. Outdoor testing of single crystal silicon solar cells, Renewable Energy 2003; 28(9), pp. 1433-1445.
- Whitfield K, Osterwald CR. Procedure for determining the uncertainty of photovoltaic module outdoor electrical performance, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2001; 9(2), pp. 87-102.