

# DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO ELECTRÓNICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PANELES SOLARES EN CONDICIONES DE EXTERIORES

Juan Bernardo Cano<sup>1</sup>, Jaime Valencia<sup>1</sup>, Franklin Jaramillo<sup>2</sup> y Esteban Velilla<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo en Manejo Eficiente de la energía, GIMEL.

<sup>2</sup> Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales-CIDEMAT. Universidad de Antioquia UdeA; Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia E-mail: jbcano@gmail.com

## RESUMEN

Para evaluar el desempeño de paneles solares en condiciones reales de funcionamiento, se diseñó e implementó un prototipo electrónico que permite obtener la curva V-I a través de la carga de un circuito capacitivo. La adquisición de señales de voltaje y corriente se hizo con la tarjeta de la National Instruments NI-DAQ-USB6009, la cual fue controlada a través de un programa desarrollado en LabView, estas señales fueron ajustadas al modelo de un diodo para filtrar el ruido eléctrico. Los resultados del prototipo fueron comparados con los obtenidos por el analizador solar AMPROBE-SOLAR600 in Situ en 3 paneles, dos de 10W con características similares y otro de 55W, encontrándose que en condiciones de irradiancia uniformes, ambos dispositivos presentaron un desempeño similar en cuanto a la curva V-I, tensión de circuito abierto, corriente de corto circuito, entre otras. Sin embargo, el prototipo al emplear menos tiempo en la adquisición, es menos sensible a las variaciones transitorias de irradiancia ocasionadas por las nubes.

**Palabras clave:** *paneles solares, curva V-I, prototipo electrónico, modelo de un diodo, irradiancia.*

Recibido: 01 de Septiembre de 2015. Aceptado: 06 de diciembre de 2015.

*Received: September 1st, 2015. Accepted: December 6th, 2015.*

## DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN ELECTRONIC PROTOTYPE FOR SOLAR PANEL CHARACTERIZATION ON EXTERIOR CONDITIONS

### ABSTRACT

*An electronic prototype was developed and implemented with the aim to evaluate solar panel performance on outdoor condition. The prototype obtains the panel IV-curve by charging a capacitive circuit. Voltage and current signal acquisition was achieved using a National Instruments card (NI-DAQ-USB6009), controlled by Labview software. The diode model was used to fit acquired signals in order to reduce electrical noise. The prototype results were validated with AMPROBE SOLAR600 analyzer using three different panels in situ (two of 10W with similar characteristics and other of 55W). In uniform irradiance conditions, both devices showed similar performance on the IV curve, open circuit voltage and short circuit current measurements. However, the prototype presented shorter acquisition time and lower sensibility at transient irradiance variations caused by clouds.*

**Keywords:** *solar panels, V-I curve, electronic prototype, diode model, irradiance.*

*Cómo citar este artículo:* J. B. Cano, J. Valencia, F. Jaramillo y E. Velilla, "Desarrollo e implementación de prototipo electrónico para la caracterización de paneles solares en condiciones de exteriores," *Revista Politécnica*, vol. 11, no. 21, pp. 41-50, 2015.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los paneles solares son dispositivos que capturan la energía proveniente de una fuente luminosa y la convierten en electricidad. La capacidad de generación que podría entregar un panel dependerá principalmente de la radiación incidente y de la respuesta espectral de los materiales utilizados en su fabricación.

Generalmente la eficiencia y el desempeño eléctrico de los paneles solares es observado a través de las curvas V-I (tensión eléctrica vs corriente), o V-P (tensión eléctrica vs potencia eléctrica), referenciadas a las condiciones estándar, esto es  $1000 \text{ W/m}^2$  de irradiancia, temperatura del panel de  $25^\circ\text{C}$  y un espectro de irradiancia para una masa de aire de 1.5 [1]. Las curvas V-I se caracterizan por tres puntos que generalmente son suministrados en los datos de placas de los paneles: corriente de cortocircuito ( $0, I_{sc}$ ), voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}, 0$ ) y el punto de máxima potencia ( $V_{pmp}, I_{pmp}$ ) a partir del cual se obtendrá la eficiencia de éste al dividirla por la potencia incidente en condiciones estándar sobre el área del panel. Los demás puntos sobre la curva permiten conocer la potencia que entregaría el panel según el punto de operación y la forma de esta curva definirá el factor de forma (FF) del panel en cuestión [2].

La metodología para la obtención de la curva V-I es documentada con suficiente rigurosidad en estándares internacionales como el IEC 60904-1[3]. Presentándose dos formas de realizar dichas curvas: en laboratorios con condiciones atmosféricas específicas y fuentes lumínicas con un espectro y radiación fija (simulador solar, IEC 60904-9 [4], NREL 2009 [5]); o en ambientes externos bajo la radiación solar. Siendo esta última el mecanismo más económico de obtener curvas V-I. Sin embargo a la hora de realizar este tipo de mediciones se podrían presentar algunas dificultades: la irradiancia podría ser no constante durante el tiempo que se hace la medida, pudiéndose obtener variaciones de irradiancia significativas; se podrían presentar sombras sobre

los paneles, las cuales se podrían agravar aún más con la presencia de nubes; o se podría dar el caso de que otras variables externas puedan perturbar el ensayo. Adicionalmente, siempre que se realicen ensayos en condiciones diferentes a las estándar, se deberán hacer las respectivas correcciones (IEC 60891[6])[7][8][9].

En condiciones de trabajo reales de los paneles solares, la inclinación con la que incide la radiación solar podría ser no siempre perpendicular, o tener un espectro diferente al establecido en las condiciones estándar, lo que podría dar lugar a pérdidas de energía por reflectancia angular y/o espectral, de igual manera en condiciones reales se presentan otros efectos no considerados en las condiciones estándar como las sombras, irradiancia no homogéneas en los paneles, ensuciamiento, sobrecalentamiento, entre otros, efectos que afectaran el desempeño de las células que conforman al panel, o de los paneles organizados en los diferentes arreglos para la producción de energía eléctrica [11].

En el caso de paneles se puede hacer la caracterización o determinación de la curva V-I de dos maneras: una a través del control de una carga electrónica variable o una fuente de potencia programable con la cual se hará el barrido a lo largo de la curva (Fig. 1), o utilizando la carga de elementos capacitivos para la obtención de la curva V-I [12]. El segundo caso resulta ser una opción adecuada y manejable en paneles de potencia significativa o de corrientes elevadas, ya que en el primer caso, el control de corriente requerirá una electrónica de potencia muy robusta. Por esta razón, en este trabajo se optó por diseñar, construir e implementar un prototipo con elementos capacitivos para la caracterización de paneles solares que tengan corrientes de corto circuito hasta de 12.5A y tensiones de circuito abierto de hasta 30V.

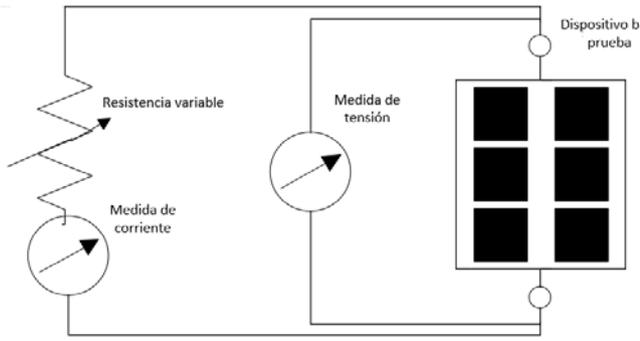


Fig. 1. Medición de curva V-I utilizando carga variable [1]

## 2. MATERIALES Y METODO

En la Fig. 2 se presenta el prototipo desarrollado con su respectivo programa en LabView para el registro de señales de voltaje y corriente sobre el capacitor, señales necesarias para la obtención de la curva V-I del panel en estudio.

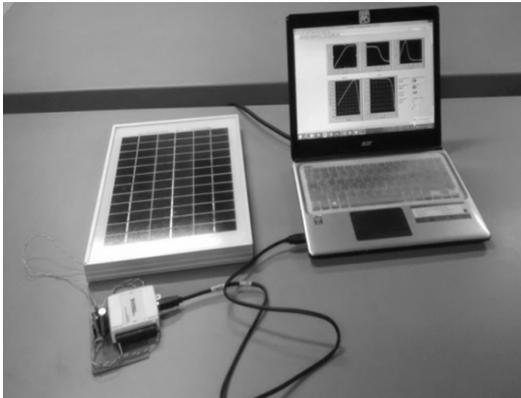


Fig. 2. Prototipo desarrollado

### 2.1 Descripción de elementos utilizados en el prototipo

Los elementos utilizados para el desarrollo del prototipo se enuncian a continuación (figura 3):

- **Circuito RC serie:** Permite la variación de la carga vista por el panel solar. El valor de la resistencia  $R$  se considera despreciable respecto a la resistencia interna serie del panel. Asumiendo que el condensador se encuentra descargado, este se comportará inicialmente como un corto circuito, luego iniciará su proceso de carga y al llegar a su

estado estable, se comportará como un circuito abierto; variando de esta forma las condiciones de carga del panel.

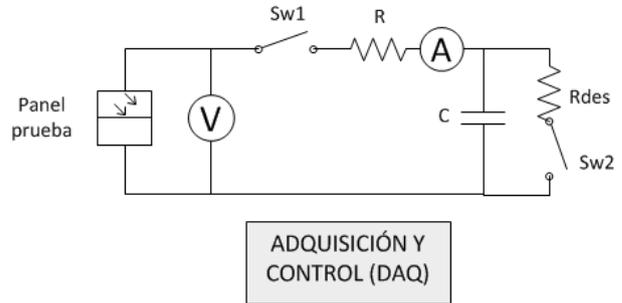


Fig. 3. Diagrama del analizador.

- **Relés de estado sólido (Sw1 y Sw2):** Permiten el control de la carga y descarga del circuito RC. El interruptor de entrada (Sw1) permite la desconexión de la celda solar del circuito RC. El interruptor Sw2 permite la descarga del capacitor, garantizando la condición de corto circuito al inicio de la medida. Los interruptores se implementaron utilizando relés de estado sólido CPC1907B, los cuales brindan aislamiento óptico entre las etapas de control y potencia. Adicionalmente, estos garantizan una buena velocidad de respuesta y ausencia de rebotes en la conmutación.
- **Resistencia de descarga:** Se utilizó una resistencia en serie con el interruptor de descarga ( $R_{des}$ ) para limitar la corriente máxima de descarga y aumentar la durabilidad del capacitor.
- **Sensor de corriente:** Para la medida de la corriente del panel se empleó el sensor ACS711LC, el cual proporciona una medida confiable de corrientes entre  $\pm 12.5A$ . El sensor es basado en efecto Hall, por lo que proporciona aislamiento entre la corriente medida y su salida en voltaje.
- **Sensor de voltaje:** Este sensor permite tener una medida del voltaje en la celda de forma aislada. El voltaje de salida es

diferencial y proporcional al voltaje de entrada. Se empleó el amplificador de aislamiento AMC1200 para su implementación.

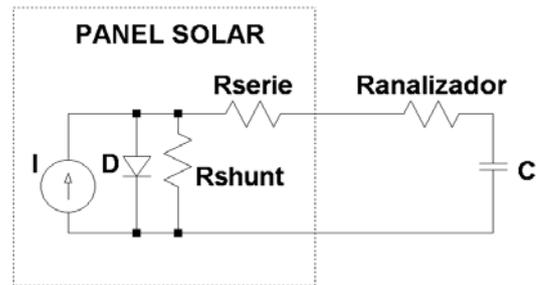
- **Sistema de adquisición y control:** Se empleó la tarjeta NI-DAQ USB 6009[13], la cual cuenta con ocho entradas analógicas (cuatro en configuración diferencial) de 14 bits, con una frecuencia máxima de muestreo de 48kHz. Además proporciona 12 pines digitales de propósito general (Entrada/salida) y alimentación de 5V obtenida del bus USB. La tarjeta realiza el control de los interruptores de entrada y de descarga utilizando sus salidas digitales. A la vez, captura las señales de corriente y voltaje en la celda utilizando entradas analógicas diferenciales. Por seguridad, el circuito de la tarjeta de adquisición se encuentra aislado completamente del panel bajo medida.

## 2.2 Selección del capacitor

El valor de capacitancia, utilizado en el circuito RC, influye en el tiempo necesario para completar el barrido del panel, desde la condición de corto circuito hasta la condición de circuito abierto.

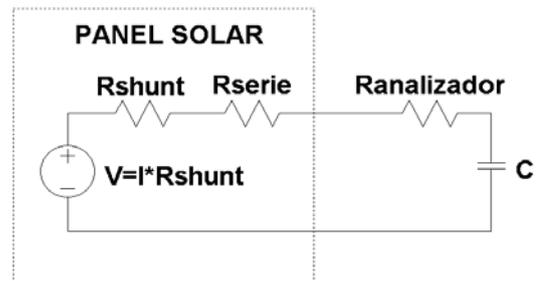
Un alto valor de capacitancia produce un mayor tiempo de barrido, dando la posibilidad de adquirir una mayor cantidad de muestras a un frecuencia de muestreo fija, y por lo tanto una mejor caracterización de la curva. Un valor bajo de capacitancia origina un tiempo de barrido corto, el cual puede no ser capturado con la tarjeta de adquisición empleada.

Puede emplearse el modelo de un diodo del panel solar [14-15], con la finalidad de estimar el tiempo de barrido en función de la capacitancia. La figura 4 ilustra el circuito equivalente obtenido al conectar el modelo del panel con el circuito RC del analizador.



**Fig. 4.** Modelo del panel solar conectado al circuito RC de medida.

Despreciando la corriente que fluye por el diodo D, se pueden realizar una transformación de fuentes reales y obtenerse el circuito equivalente que se ilustra en la figura 5.



**Fig. 5.** Modelo simplificado, despreciando el efecto del diodo.

Del último circuito se determina la constante de tiempo del circuito en función de los parámetros eléctricos, esto es:

$$T_{barrido} = 5(R_{shunt} + R_{serie} + R_{analizador})C \quad (1)$$

Es de notar que el efecto no lineal del diodo no es despreciable y puede afectar considerablemente la expresión anterior. Sí se considera el diodo como una resistencia no lineal, dicha resistencia estaría en paralelo con Rshunt. En sus valores extremos, cuando la resistencia no lineal tienda a cero, el valor del paralelo tenderá igualmente a cero; en cambio cuando la resistencia no lineal tienda a infinito, el paralelo tenderá al valor de Rshunt. Por lo anterior y reemplazando en la expresión (1) se puede hallar una mejor estimación para el tiempo de barrido.

$$5(R_{serie})C < T_{barrido} < 5(R_{shunt} + R_{serie})C \quad (2)$$

Despreciando  $R_{analizador}$  y asumiendo que  $R_{serie}$  es mucho mayor a  $R_{shunt}$ , se obtiene la expresión (3).

$$5(R_{serie})C < T_{barrido} < 5(R_{shunt})C \quad (3)$$

Los valores típicos de las resistencia serie de paneles solares comerciales suelen ser menores a un ohmio, por lo tanto se ha elegido un valor suficientemente grande de  $C$  (limitado por los valores comercialmente disponibles) para mantener el tiempo de barrido en el orden de decenas a centenas de milisegundo, es de resaltar que este parámetro puede ser ajustado según la necesidad o cambio del periodo de muestreo en la tarjeta.

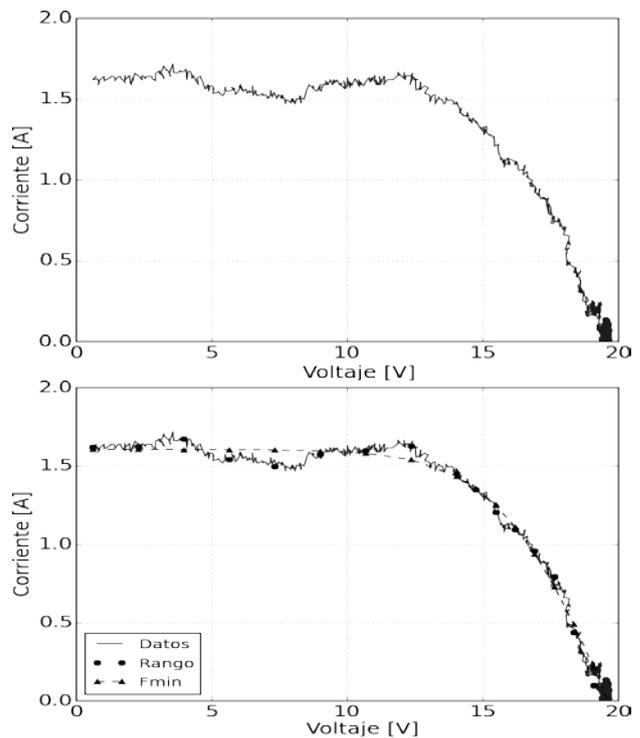
### 2.3 Procedimiento realizado para la obtención de la curva V-I

Con la finalidad de registrar las señales de tensión y corriente sobre el circuito capacitivo implementado que describirán la curva V-I del panel, se implementó un programa en LabView que se interfaza con los drivers de comunicación de la tarjeta y realiza un control secuencial de la misma:

1. Apertura de los interruptores de entrada y descarga, medida del voltaje en circuito abierto de la celda.
2. Interruptor de entrada abierto y de descarga cerrado, se realiza la descarga del capacitor durante un tiempo fijo.
3. Interruptor de entrada cerrado y de descarga abierto, comienza el transitorio de carga del capacitor y el muestreo de las señales de corriente y voltaje.
4. Una vez finalizado el muestreo se abren ambos interruptores.
5. Procesamiento de las señales obtenidas, aplicación de filtros digitales para eliminar ruido, cálculo de la potencia a partir de las muestras de corriente y voltaje, trazado de curvas y almacenamiento en archivos de texto planos.

### 2.4 Ajuste de datos.

En vista de que el prototipo desarrollado cuenta con un sensor de corriente que permite corrientes de hasta 12.5A, al realizar mediciones en paneles con corrientes muy por debajo de este valor, se presentó ruido eléctrico como el observado en la 6a. Adicionalmente, debido a que los datos no necesariamente están igualmente espaciados en el rango de tensión de la medición (curva exponencial), se optó por ajustar las señales de tensión y corriente al modelo de un diodo (ecuación 1) [14-15] y así eliminar el posible ruido presentado y hacer una mejor discretización Fig. 6b.



**Fig. 6.** Ajuste de datos a modelo del diodo a), señal original. Abajo b), ajuste final

La expresión (4) corresponde al modelo de un diodo para la representación de paneles solares, donde  $I_o$  es la corriente de saturación de oscuridad;  $R_p$  corresponde al resistencia paralelo debida a fugas de corriente por las superficies laterales;  $R_s$  es la resistencia serie debida al material, efectos de diseño y fabricación; y  $V_t$  es el potencial termodinámico que es función del factor de idealidad del diodo ( $m$ ), el cual varía entre 1 y 2.

$$I = I_L - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + I \cdot R_s}{V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (4)$$

En literatura científica se reportan varios métodos para obtener los parámetros de la anterior ecuación a partir de medidas reales de corriente y voltaje [16]. En este caso, para el ajuste al modelo del diodo se clasificaron los datos en diferentes rangos, en los cuales se hicieron ajustes lineales por segmentos (splines), y de esta manera se obtuvieron datos igualmente espaciados a lo largo de la curva, a través de los cuales se minimizó el error medio cuadrático entre los datos y el modelo del diodo, problema de optimización resuelto con el método simplex [14], lo cual implicó encontrar los parámetros del diodo ( $I_0$ ,  $R_p$ ,  $R_s$ , y  $m$ ) que hacen que este modelo se ajuste a la curva V-I medida experimentalmente. Una vez obtenidos los parámetros del diodo se calculó el voltaje de circuito abierto, corriente de corto circuito, tensión y corriente en el punto de máxima potencia.

### 3. RESULTADOS Y ANALISIS

Con la finalidad de evaluar el desempeño del prototipo desarrollado, se llevaron a cabo una serie de pruebas en la terraza del Centro de Investigación Universitaria de la Universidad de Antioquia (SIU), ubicada en las coordenadas 6° 15' 38"N 75° 34' 05"W.

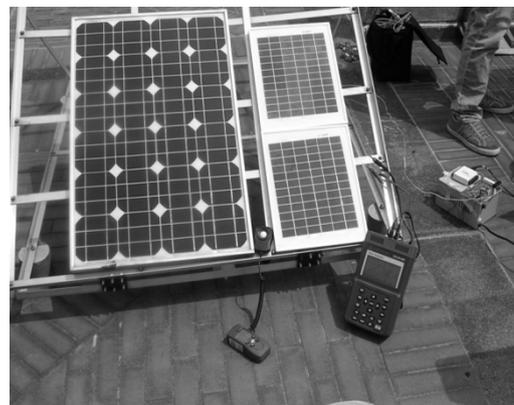
Parte de las pruebas se realizaron sobre 2 paneles de silicio monocristalino de la serie EL(P)10, con la finalidad de comparar simultáneamente el comportamiento del prototipo desarrollado con respecto al de un analizador comercial AMPROBE SOLAR600 [17].

Otras pruebas se realizaron, de manera independiente, sobre un panel de mayor potencia serie ZNShineSolar ZX55W-18V-12501. Los módulos fueron orientados en sentido sur con un ángulo fijo de 20°, las características técnicas de éstos en condiciones estándar se presentan en la Tabla 1.

En cada prueba, se registró el nivel de irradiancia solar utilizando el sensor AMPROBE SOLAR 100 [18]. La fig. 7 ilustra el montaje experimental.

**Tabla 1.** Características de los paneles.

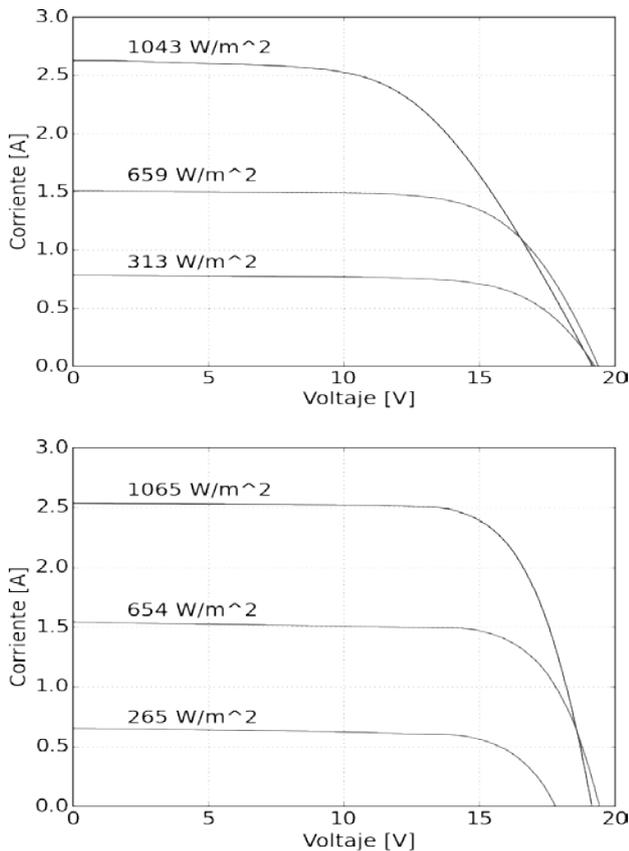
Panel	EL(P)10	ZX55W
Potencia máxima	10 W	55 W
Voltaje de circuito abierto	21.52 V	21.8 V
Corriente de cortocircuito	0.66 A	3.4 A
Corriente en punto de máxima potencia	0.6 A	3.13 A
Voltaje en punto de máxima potencia	17.56 V	17.6 V



**Fig. 7.** Montaje experimental con los tres paneles solares, el analizador AMPROBE 600, el prototipo desarrollado y el sensor de irradiancia.

#### 3.1 Pruebas con el panel de 55W

La figura 8 ilustra algunas de las curvas VI obtenidas con el panel de 55W. En la parte superior se encuentran los resultados obtenidos con el prototipo y en la parte inferior los resultados obtenidos con el AMPROBE 600.



**Fig. 8.** Resultados paneles de 55W. Arriba: a) Prototipo, Abajo b): AMPROBE 600.

Dada la variabilidad de la luz solar ambiente, resulta imposible mantener un mismo valor de irradiancia entre pruebas. Sin embargo, es posible confrontar medidas tomadas con valores similares de irradiancia. Se observa la similitud entre las curvas a  $659\text{W/m}^2$  (prototipo) y  $654\text{W/m}^2$  (AMPROBE),  $1043\text{W/m}^2$  (prototipo) y  $1065\text{W/m}^2$  (AMPROBE),  $313\text{W/m}^2$  (prototipo) y  $265\text{W/m}^2$  (AMPROBE). Los valores obtenidos de dichas curvas (Voltaje circuito abierto, Corriente de cortocircuito, Punto de máxima potencia) se muestran en la Tabla 2.

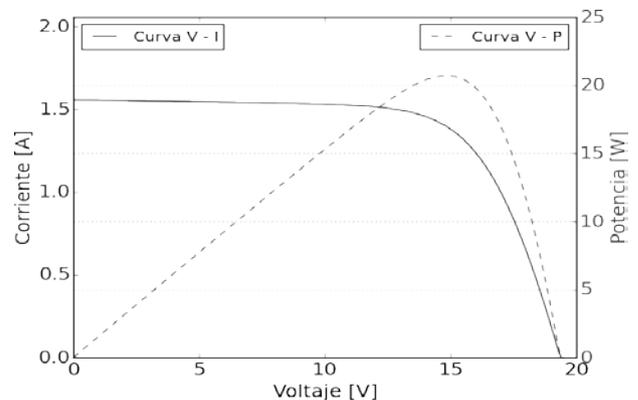
Nótese que el rango de los resultados obtenidos coincide con los valores especificados en placa por el fabricante.

Los datos obtenidos, permiten caracterizar no solo las curvas IV si no también las curvas PV del panel. La figura 9 ilustra algunas de las curvas PV y VI

obtenidas por medio del prototipo, dichas curvas son posteriores al uso del algoritmo de ajuste.

Tabla 2. Datos obtenidos en las pruebas con el panel de 55W

	$\text{W/m}^2$	$V_{\text{open}}$ (V)	$I_{\text{sc}}$ (A)	$V_{\text{max}}$ (V)	$I_{\text{max}}$ (A)
<b>AMPROBE</b>	265	17,8	0,651	14,63	0,578
<b>PROTO</b>	313	19,2	0,779	15,183	0,699
<b>%Error</b>	18,4%	7,8%	19,6%	3,47%	20,4%
<b>AMPROBE</b>	654	19,42	1,541	15,86	1,407
<b>PROTO</b>	659	19,42	1,504	14,858	1,356
<b>%Error</b>	0,76%	0%	2,46%	6,3%	3,62%
<b>AMPROBE</b>	1065	19,14	2,535	15,27	2,354
<b>PROTO</b>	1043	19,123	2,625	12,664	2,250
<b>%Error</b>	2,06%	0,09%	3,55%	16%	4,41%



**Fig. 9.** Curvas PV y VI obtenidas de un panel de 55W con el prototipo.

### 3.2 Pruebas con los paneles de 10W

Gracias a la disponibilidad de dos paneles del mismo modelo, fue posible realizar medidas simultáneas con el prototipo y con el analizador. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3.** Datos obtenidos con las pruebas de los paneles de 10W

	$W/m^2$	$V_{open}$ (V)	$I_{sc}$ (A )	$V_{max}$ ( V)	$I_{max}$ ( A)
<b>AMP</b>	764	20.24	0.443	16.43	0.347
<b>PROTO</b>	764	20.10	0.411	16.89	0.367
		0.69%	7.22%	2.8%	5.7%
<b>AMP</b>	1099	20.26	0.419	18.23	0.418
<b>PROTO</b>	1099	20.61	0.469	16.79	0.507
		1.69%	11.3%	7.9%	20%
<b>AMP</b>	602	19.92	0.294	16.57	0.278
<b>PROTO</b>	602	20.01	0.267	16.29	0.225
		0.4%	9.1%	1.68%	19.1%
<b>AMP</b>	546	19.34	0.255	15.45	0.247
<b>PROTO</b>	546	19.97	0.236	17.15	0.257
		3.26%	7.4%	13.2%	4.04%
<b>AMP</b>	530	16.43	0.270	15.48	0.232
<b>PROTO</b>	530	17.14	0.258	16.34	0.216
		4.32%	4.44%	5.55%	6.89%

Debe tenerse en cuenta que al medirse simultáneamente en los dos paneles, se obtiene una menor variabilidad en los resultados debido a que la irradiancia instantánea se podría considerar constante. Sin embargo, se presentan otras fuentes de error, como son las tolerancias en las especificaciones de los paneles y otras asociadas con variables externas debido a que la medición se realiza en exteriores.

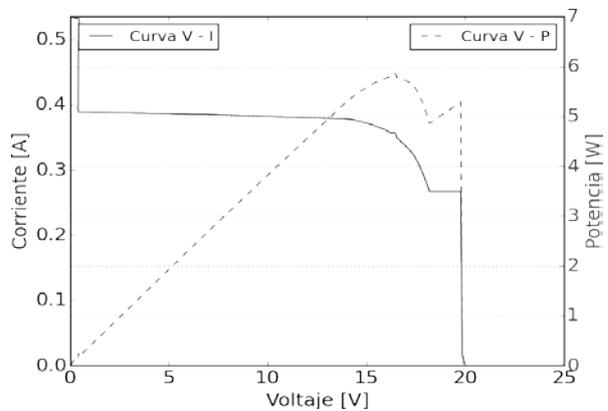
### 3.3 El problema de las sombras

El método de medida de curvas VI que emplea una carga capacitiva, se caracteriza por obtener una medida en tiempos breves. El tiempo necesario para recorrer toda la curva (desde el punto de cortocircuito hasta el punto de circuito abierto) está determinado por el tiempo de carga del capacitor. Normalmente, este tiempo estará en el orden de algunos cientos de milisegundos (dependiendo del valor de la capacitancia y de las resistencias internas del panel y del circuito analizador).

El analizador AMPROBE 600, utiliza un método de variación de carga, en el cual emplea un tiempo mucho más largo para recorrer completamente la curva IV (aproximadamente de un minuto). En las pruebas realizadas, este tiempo estuvo en el orden de varios segundos.

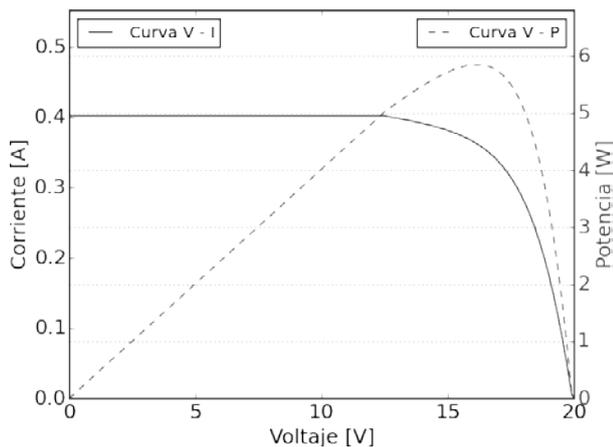
Las anteriores diferencias en el método, se vuelven apreciables cuando se realizan medidas en exteriores. En estas condiciones, debido a la presencia de nubosidad u otras interferencias, pueden presentarse variaciones transitorias de la intensidad solar. El largo periodo de escaneo del analizador AMPROBE aumenta la posibilidad de que las medidas se vean afectadas significativamente.

La figura 10, ilustra los resultados obtenidos con el analizador AMPROBE 600 en condiciones de nubosidad en el panel de 10W. Nótese como las curvas obtenidas presentan un comportamiento anómalo y por tanto no podrían considerarse como adecuadas a la hora de tomar alguna acción en cuanto a mantenimiento o desempeño del panel.



**Fig. 10.** Resultados obtenidos con el analizador AMPROBE 600 en presencia de nubes  $966W/m^2$ .

En las mismas condiciones, las medidas realizadas con el prototipo en el otro panel de 10W (figura 11), no presentan las variaciones tipo “escalón” de la prueba anterior.



**Fig. 11.** Resultados obtenidos con el prototipo en presencia de nubes. Irradiancia de  $966\text{W/m}^2$ .

#### 4. CONCLUSIONES

Se diseñó, implementó y validó un prototipo para evaluar el desempeño de paneles solares a través de la curva V-I obtenida a partir de la carga de un elemento capacitivo. Este prototipo es controlado a través de un programa implementado en LabView para realizar la adquisición de datos utilizando la tarjeta NI DAQ USB 6009, con ésta se registran las señales de corriente y voltaje medidas experimentalmente sobre el panel en evaluación.

El desempeño del prototipo se comparó con los resultados entregados por el analizador solar AMPROBE600, para ello se hicieron pruebas sobre 3 paneles solares: dos de características similares de 10W y otro de 55W. Las pruebas fueron realizadas en condiciones de exteriores.

Al comparar los resultados obtenidos con el prototipo con los obtenidos con el AMPROBE 600, se observa que los estos son coherentes en cuanto a las tendencias de las curvas V-I. El error numérico encontrado en la estimación de los parámetros es consecuente con el hecho de que las pruebas fueron realizadas bajo condiciones cambiantes de iluminación.

Es de resaltar que el prototipo desarrollado obtiene los datos en un tiempo mucho menor al utilizado por el analizador AMPROBE 600, esto es del orden

de segundos mientras que el AMPROBE esta del orden del minuto. Por tanto la irradiancia en el caso del prototipo podría considerarse casi constante mientras que el caso del AMPROBE 600 esto no se podría garantizar.

Por lo anterior, se recomienda la caracterización de los paneles solares utilizando el método de la carga capacitiva cuando la medida deba realizarse en exteriores y/o se tenga la probabilidad de variaciones transitorias de la irradiancia.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen su colaboración al proyecto Sostenibilidad 2014-2015, Universidad de Antioquia y al proyecto "Celdas solares nanoestructuradas" financiado por EPM

#### 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OsterwaldCarl. Standards, Calibration, and Testing of PV Modules and Solar Cells. En: Practical Handbook of Photovoltaics.2012 Elsevier Ltd. 1045-1064.
- [2] NREL. National Renewable Energy Laboratory. Standards for PV Modules and Components – Recent Developments and Challenges. September 24-28, 2012. From: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56531.pdf>
- [3] Standard IEC 60904-1, Photovoltaic Devices, Part 1: Measurement of Photovoltaic Current–Voltage Characteristics, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland. Ed 2. 2006.
- [4] Standard IEC 60904-9, Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland. Ed 2. 2006.
- [5] NREL. National Renewable Energy Laboratory. Uncertainty Analysis of Certified Photovoltaic Measurements at the National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-

- 520-45299 August 2009. From <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45299.pdf>
- [6] International Electrotechnical Commission, IEC 60891. Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices. Ed 2. 2009
- [7] IEC 61215, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules—design qualification and type approval, Ed. 2, 2005.
- [8] IEC 61646, Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules—design qualification and type approval, Ed. 2, 2008.
- [9] IEC 62108, Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies—design qualification and type approval, Ed. 1, 2007.
- [10] European Commission Joint Research Centre, Guidelines for PV Power measurement in Industry. Disponible en: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC57794/eur-24359-en.pdf> [consultado el 21 de agosto de 2015].
- [11] EPRI 2014. Journal Beyond Speculation and Sci-Fi: Researchers Help Drive Plans and Technologies to Secure the Grid. Winter 2015. From: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000003002004850>
- [12] ASTM E948-09. Standard Test Method for Electrical Performance of Photovoltaic Cells Using Reference Cells Under Simulated Sunlight.
- [13] NATIONAL INSTRUMENTS, USB-6009 Dispositivo DAQ Multifunción de Bajo Costo de 14 Bits, 48 kS/s. Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201987> [consultado el 21 de agosto de 2015].
- [14] Jiménez K, Londoño C, Restrepo S, Valencia J, Velilla E. Obtención de los parámetros del modelo de un diodo para la modelación de paneles solares utilizando el Método de Nelder-Mead. Revista Asociación de Ingenieros Electricistas de la UdeA, AIE. Septiembre de 2015.
- [15] Cristaldi L, Faifer M, Rossi M, Ponci F. A Simple Photovoltaic Panel Model: Characterization Procedure and Evaluation of the Role of Environmental Measurements. IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 61, no. 10, 2012.
- [16] D.T. Cofas, P.A. Cofas, S. Kaplanis "Methods to determine the dc parameters of solar cells: A critical review". Renewable and Sustainable Energy Reviews 28 (2013) 588–596.
- [17] AMPROBE, Amprobe SOLAR-600 Solar Power Analyzer. Disponible en: <http://www.amprobe.com/amprobe/usen/Environmental-Test/Solar-Meters-and-Analyzers-/AMP-SOLAR-600.htm?PID=73346> [consultado el 21 de agosto de 2015].
- [18] AMPROBE, Amprobe SOLAR-100 Solar Power Meter. Disponible en: <http://www.amprobe.com/amprobe/usen/environmental-testers/solar-meters-and-analyzers-/amp-solar-100.htm?pid=73342#> [consultado el 21 de agosto de 2015].