

## **CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BASADO EN UN CONVERTIDOR SEPIC**

M. Alvarez, M. Maldonado, S. Lovera, F. Magnago

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Río Cuarto – UNRC C.P. 5800 – Río Cuarto

Tel. 0358-4676246 – Fax 0358-4676246 – e-mail: slovera@ing.unrc.edu.ar

*Recibido 13/08/19, aceptado 21/10/19*

**ABSTRACT:** El objetivo de este trabajo es el de desarrollar un sistema electrónico para caracterizar módulos fotovoltaicos mediante la determinación de la curva I-V y P-V estándar.

El barrido de la curva I-V del módulo ensayado, se realiza utilizando un convertidor SEPIC, que permite la variación de la impedancia conectada al módulo fotovoltaico, permitiendo realizar el barrido de manera rápida y eficiente.

Los resultados experimentales son contrastados con los parámetros y curvas provistos por los fabricantes de los módulos ensayados, verificando un buen comportamiento del sistema implementado.

**Palabras clave:** SEPIC, coeficientes de temperatura, ensayos fotovoltaicos.

### **INTRODUCCIÓN**

Los fabricantes de módulos fotovoltaicos (FV) proporcionan las características I-V, P-V y los principales parámetros bajo las condiciones de ensayo Estándar (STC: 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiación, temperatura de celda de 25 ° C).

Sin embargo, los procesos de fabricación de los módulos, y más específicamente de las celdas fotovoltaicas, no permiten la obtención de elementos idénticos, por lo que algunos parámetros pueden diferir de manera significativa, aún para módulos provenientes del mismo fabricante. Por lo tanto, solo las mediciones experimentales de las curvas *I-V* permiten conocer con precisión los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos. A pesar de lo expuesto, el avance tecnológico actual en los procesos de fabricación de las celdas y módulos FV, sumado a las estrictas normas de calidad de los productos comerciales, minimizaron las desviaciones de los principales parámetros que describen a los productos finales respecto a los valores de referencia de catálogo (De Blas et al., 2002; King et al., 1997).

La característica *I-V* de un módulo fotovoltaico es provista por los fabricantes a partir de condiciones ambientales de irradiación y temperatura estrictamente controladas en ambientes de laboratorio. Las variaciones rápidas y aleatorias de las condiciones ambientales exteriores, dificultan la tarea de reproducir dichas características de manera eficiente y precisa. Una manera de minimizar los problemas mencionados, es a partir de la variación de la carga aplicada, en un rango que permita realizar un barrido completo de la curva en el menor tiempo posible.

Varios métodos se mencionan en la bibliografía aplicados a la caracterización de las curvas I-V, algunos de los cuales se describen brevemente en este trabajo, mencionando ventajas y desventajas de cada uno de ellos [Kuay y Yuvarajan, 2006; Muñoz y Lorenzo, 2006; Van Dyk et al., 2002; Durán et al, 2008; Álvarez et al, 2017; Sarikh et al, 2017].

El objetivo de este trabajo es el de diseñar e implementar un dispositivo portátil capaz de caracterizar módulos fotovoltaicos, mediante la medición de las curvas *I-V* y *P-V* de los módulos y de los

coeficientes asociados al mismo, que caracterizan el comportamiento del panel para diferentes condiciones ambientales. La implementación del equipo está basada en un convertidor SEPIC, el cual es ampliamente utilizado en técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en sistemas fotovoltaicos [Marcial et al, 2015; Renduchintala et al, 2016].

Para ello, se organiza este trabajo del siguiente modo: Se realiza una breve descripción de las características eléctricas de los módulos FV en función de las condiciones ambientales; se describen algunos de los métodos más usuales para la obtención de las curvas  $V-I$  y  $V-P$ ; se realiza el diseño de un conversor SEPIC; descripción del algoritmo para control del conversor y adquisición de datos; por último, se presentan los resultados experimentales obtenidos y se extraen las conclusiones finales.

## CARACTERÍSTICAS $I-V$ Y $P-V$ DE LOS PANELES SOLARES

Los fabricantes de módulos FV proporcionan información de las características de los mismos en condiciones estándar. La tabla 1 muestra las características estándar del panel disponible para ensayo proporcionadas por el fabricante.

<b>Tensión a circuito abierto (<math>V_{ocn}</math>)</b>	22,2 V
<b>Tensión de operación óptima (<math>V_{mpn}</math>)</b>	17,8 V
<b>Corriente de cortocircuito (<math>I_{scn}</math>)</b>	5,11 A
<b>Corriente de operación óptima (<math>I_{mpn}</math>)</b>	4,78 A
<b>Potencia máxima</b>	85 W
<b><math>\alpha</math></b>	0,037 %/°C
<b><math>\beta</math></b>	-0.34 %/°C

Tabla 1: Parámetros del panel fotovoltaico para una irradiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  y  $T_{an} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  y la tensión de vacío  $V_{oc}$  de un módulo FV dependen de las variaciones de irradiación y temperatura. Por otro lado, los módulos fotovoltaicos en condiciones de campo pueden, con el paso del tiempo y en condiciones climáticas extremas, sufrir una significativa degradación de su rendimiento. Una forma de detectar este fenómeno es a partir de la obtención de la curva  $I-V$  estándar actual y compararla con la que provee el fabricante [Sarikh et al, 2017].

Para la realización del ensayo se toma como base las recomendaciones provistas en la norma IEC60891, que describe diferentes procedimientos para la obtención de la característica  $I-V$  estándar de un panel fotovoltaico, a partir de ensayos del panel a diferentes condiciones de irradiación y temperatura. [Priya et al, 2015; Da Costa Po, 2011].

Las ecuaciones (1) y (2) propuestas por la norma, permiten, a partir de la realización del ensayo del módulo, la obtención de los parámetros estándar de corriente y tensión:

$$I_{s1} = I_{sn} * \left(\frac{H_1}{H_n}\right) * (1 + \alpha(T_1 - T_{an})) \quad (1)$$

$$V_{oc1} = V_{ocn} * (1 + \beta(T_1 - T_{an})) - R_s * (I_{sc1} - I_{scn}) + V_T * \ln\left(\frac{H_n}{H_1}\right) \quad (2)$$

Donde:

$V_{ocn}/I_{scn}$ : Tensión y corriente del Módulo en condiciones estándar [V]

$V_{oc1}/I_{sc1}$ : Tensión y corriente del Módulo en condiciones de ensayo [V]

$\alpha/\beta$ : Coeficientes de temperatura para la corriente [A/°C] y tensión [V/°C]

$T_{an}/T_{a1}$ : Temperatura estándar y de ensayo [°C]

$R_s$ : Resistencia serie del Módulo [ $\Omega$ ]

$V_T$ : Tensión térmica del Módulo [V]

$H_n/H_1$ : Irradiación en condiciones estándar y de ensayo [ $\text{W/m}^2$ ]

$V_T$  para una celda voltaica, es posible calcularla a partir de la ecuación (3):

$$V_T = \frac{n * k * T}{q} \quad (3)$$

En donde:

$n$ : varía entre 1 y 2, dependiendo del proceso de fabricación y de los materiales empleados.

$k$ : constante de Boltzmann ( $1,3 * 10^{-23}$  J/K)

$T$ : Temperatura ambiente [ $^{\circ}$ K]

$q$ : carga del electrón [ $1,6 * 10^{-19}$  C]

A temperatura ambiente de 25  $^{\circ}$ C,  $V_T$  para una celda solar es de aproximadamente 25 mV. El módulo ensayado consta de 36 celdas, por lo que  $V_T \cong 0,9$  V. Por otro lado, si el nivel de irradiación medido durante el ensayo, difiere de la irradiación estándar en valores inferiores al 20 %, es posible despreciar el último término de la ecuación (5), con un error inferior al 1,5 % respecto del valor estándar de la tensión de circuito abierto del módulo.

Más aún, si en la ecuación (5), en vez de comparar con los valores estándar, se realizan dos ensayos a temperaturas diferentes del módulo, y las condiciones atmosféricas referidas a la radiación, no varían de manera considerable, el término referido es prácticamente nulo. Del mismo modo, el término que involucra a  $R_s$ , también adquiere valores poco significativos y su valor se corresponde con la pendiente de la porción de la curva  $I-V$  del módulo fotovoltaico comprendida entre  $V_{mp}$  y  $V_{oc}$ , estando acotado entre un máximo y un mínimo descrito por la ecuación (4) [Siddique et al, 2013].

$$\frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} > R_s > 0 \quad (4)$$

La estrategia de realización de dos ensayos a diferentes condiciones de temperatura, permite la caracterización completa del panel ensayado, ya que es posible la obtención de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  sin necesidad de recurrir a los datos proporcionados por el fabricante. Esto se describe en las ecuaciones (5) y (6) [Alvarez et al, 2017].

$$\alpha = \frac{\left(\frac{I_{sc2}}{I_{sc1}}\right) * \left(\frac{Rad_1}{Rad_2}\right) - 1}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\left(\frac{V_{oc2}}{V_{oc1}}\right) - 1}{T_2 - T_1} \quad (6)$$

Con estos coeficientes, y las curvas  $I-V$  obtenidas del ensayo, es posible, además, la obtención de la curva  $I-V$  estándar (1000 W/m<sup>2</sup>, 25  $^{\circ}$ C).

## MÉTODOS PARA OBTENCIÓN DE CARACTERÍSTICAS I-V Y P-V

### *Resistor variable.*

La figura 1 muestra el procedimiento por el cual es posible realizar un barrido completo de la curva  $i-v$  de un módulo FV a partir de una resistencia variable. Una operación manual para la variación de R implica un procedimiento lento del ensayo en donde, en especial, la temperatura del ensayo no permanecerá constante.

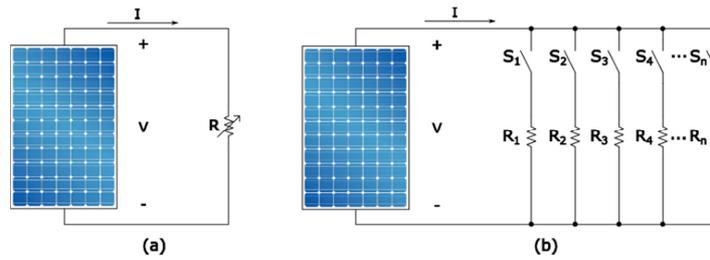


Figura 1: Ensayo con carga resistiva a) Resistor variable, b) Resistores en paralelo.

Con llaves electrónicas, combinación de resistencias en paralelo (figura 1(b)) y un adecuado sistema de adquisición de datos, es posible optimizar el ensayo [Van Dyk et al, 2005].

La necesidad de una mayor densidad de puntos en la región del codo de la curva  $I-V$  del módulo FV, requiere de una cuidadosa selección de los valores de cada una de las resistencias para cada módulo a ensayar.

### Carga Capacitiva.

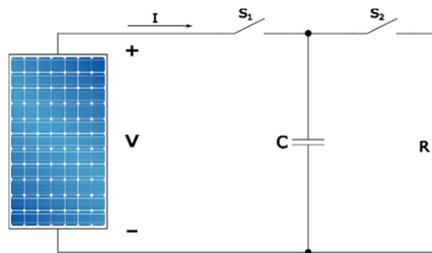


Figura 2: Ensayo con carga capacitiva.

La figura 2 muestra el método de carga capacitiva. El ensayo comienza con  $S_1$  abierto y  $S_2$  cerrado, de modo de asegurar la descarga total de  $C$ . Posteriormente se abre  $S_2$  y se cierra  $S_1$ , de manera que en el instante inicial la corriente es  $I_{sc}$ , y al final del ensayo la corriente se anula y la tensión sobre  $C$  es  $V_{oc}$ .

Es necesario un diseño con un banco de capacitores de baja resistencia serie. Por otro lado, el tiempo de duración del ensayo para un mismo banco de capacitores, es dependiente de las características del módulo FV a ensayar, y de la irradiación presente al momento del ensayo. Esto dificulta la implementación del algoritmo a implementar para cada caso [Brito et al, 2014].

### Carga Electrónica.

El método de carga electrónica mostrado en la figura 3, utiliza un transistor (generalmente un MOSFET) como carga; la resistencia entre el drenaje y la fuente (y por consiguiente el flujo de corriente suministrado por el módulo FV) se controlan a través de la tensión de la compuerta-fuente aplicada [Sahbela et al., 2013; Sarikh et al, 2017].

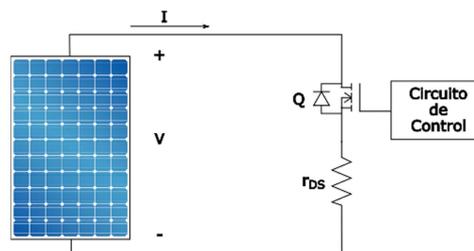


Figura 3: Ensayo con carga electrónica.

Cuando se utiliza este método para trazar la curva  $I-V$  del módulo, el MOSFET debe operar en sus tres modos de funcionamiento (corte, región activa y óhmica). Como resultado, la mayor parte de la potencia entregada por el módulo tendrá que ser disipada por este dispositivo.

#### Conversor DC-DC.

La carga variable aplicada durante el ensayo, puede ser obtenida a partir de convertidores  $DC-DC$ , tal como se muestra en la figura 4. El convertidor es conectado al módulo FV actuando como un adaptador de impedancia. Modificando el valor del ciclo de trabajo  $D$  del convertidor, podemos ajustar la impedancia reflejada sobre el panel desde condición de cortocircuito a circuito abierto, y de esa manera barrer toda la curva  $I-V$  del módulo (Moham et al., 2009).

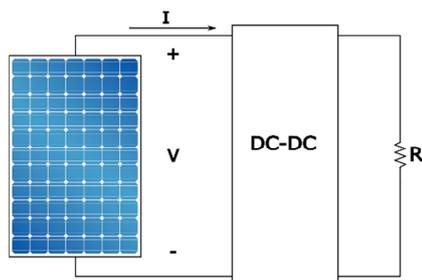


Figura 4: Ensayo con convertidor DC-DC.

De las tres topologías básicas de convertidores, solo la Step-Down/Step-Up es capaz de emular una impedancia de entrada  $R_{in}$  variable desde cero a infinito a partir de un barrido del ciclo de trabajo  $D$  desde uno a cero (Falin, 2008; Erickson, 2007; Soedibyo et al., 2015). La ecuación (7) describe la variación de  $R_{in}$  en función de la impedancia de salida  $R_{out}$  para el convertidor mencionado.

$$R_{in} = R_{out} * \frac{(1 - D)^2}{D^2} \quad (7)$$

El método de medición a partir de convertidores  $DC-DC$  permite: 1) Realizar el barrido de la curva en ambas direcciones, de  $I_{sc}$  a  $V_{oc}$  o de  $V_{oc}$  a  $I_{sc}$ ; y 2) Reproducir parcialmente la curva  $I-V$ . El rendimiento de estos convertidores conmutados oscila alrededor de un 90 %, por lo que la disipación de potencia es reducida y, por consiguiente, es posible el ensayo de módulos fotovoltaicos de gran potencia con mínimos costos.

#### DISEÑO DEL CONVERTOR SEPIC

Se propone en este trabajo, la implementación de un convertidor Step-Down/Step-Up en configuración SEPIC (Soedibyo et al., 2015) con una potencia de 500 W y tensión máxima de entrada de 70 V. Estas consignas permitirán ensayar una extensa variedad de módulos fotovoltaicos comerciales. Entre las ventajas de este tipo de convertidor, pueden mencionarse la ausencia de inversión de polaridad de la salida y el bajo rizado de la corriente de entrada.

El diseño se realizó considerando al convertidor en modo de conducción continua (MCC), esto es, que en todo momento la corriente instantánea sobre las inductancias  $L_1$  y  $L_2$  de la figura 5 sea mayor a cero. La llave  $S_1$  permite registrar la corriente de cortocircuito del panel a ensayar, previo a la realización del barrido.

En base a los sensores de corriente utilizados, se establece como la mínima corriente media del módulo fotovoltaico  $I_{Lmin}$ , a partir de la cual es posible realizar una correcta medición, en 300 mA.

Una relación de compromiso entre un bajo *ripple* de corriente en los inductores y un moderado transitorio, es tomar un  $\Delta I_L$  entre un 20 y 40 % de la corriente [Falin, 2008]. En nuestro caso:

$$\Delta I_L = \frac{0,3I_{Lmin}}{\eta} = 100 \text{ mA}$$

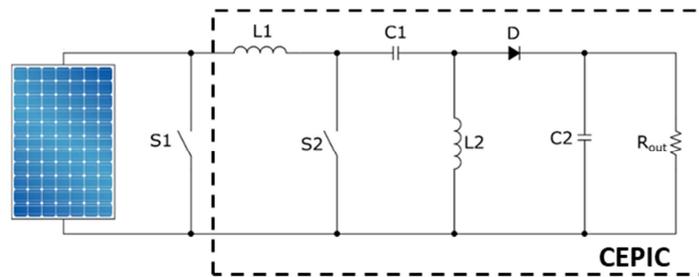


Figura 5: Conversor DC-DC SEPIC.

En donde  $\eta = 0,9$  tiene en cuenta la desviación cometida en la obtención de las expresiones matemáticas para el diseño del conversor (inductancias, capacitores y llaves semiconductoras ideales).

La ecuación (8) nos permite hallar los valores mínimos para ambas inductancias.

$$L_{1min} = L_{2min} = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f} = 4,67 \text{ mHy} \quad (8)$$

En donde  $V_{in}=70 \text{ V}$ ,  $D=0,2$  y frecuencia de conmutación  $f$ , limitada a  $30 \text{ kHz}$  de modo de lograr una inmunidad de ruido aceptable para los sensores de corriente utilizados.

Se establece un resistencia de carga  $R_{out}$  de  $5 \text{ Ohm}$  y una variación del ciclo de trabajo comprendido entre  $D_{min}$  y  $D_{max}$ . Los valores límites de  $D$  variarán en cada caso de acuerdo a las características de los módulos fotovoltaicos y de las condiciones ambientales al momento del ensayo, de modo de respetar las corrientes mínimas establecidas en las inductancias (MCC). Para ello, se colocan sensores de corriente tanto a la entrada como a la salida del conversor.

Se fija un *ripple* para la tensión de entrada del 1% de la máxima tensión de diseño. Por consiguiente, los valores de  $C_1$  y  $C_2$  seleccionados son de  $470 \mu\text{F}$ .

En la tabla 2 se muestra un listado de los componentes utilizados para el conversor en base a las consignas y resultados presentados anteriormente.

$C_1; C_2$	470 $\mu\text{F}$ ; 450 V
$L_1; L_2$	5 mHy
$S_1; S_2$	IRFS4227PbF (200 V; 130 A; 22 m $\Omega$ )
$D$	RHRP30120 (30 A; 1200 V; Hyperfast)

Tabla 2: Componentes del Conversor.

## IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL

La figura 6 muestra un esquema general del banco de ensayo. La tabla 3 describe los sensores de tensión, corriente, irradiación y temperatura, como así también el procesador para implementación del algoritmo.

El equipo consta de sensores de corriente y tensión de salida que permite la realimentación de las señales para su control. El algoritmo de control implementado es genérico (PID), de forma de asegurar la estabilidad del trazador ante perturbaciones tales como variación de tensión de entrada, o carga del regulador.

Los valores de tensión, corriente, irradiación y temperatura medidos durante el ensayo, son almacenados en el procesador y posteriormente enviados y procesados en PC. La comunicación entre el procesador y la interfaz gráfica en PC, se realiza a partir del protocolo Modbus RTU. El entorno

gráfico para la realización del ensayo y del reporte del mismo, se implementó con lenguaje de programación Python.

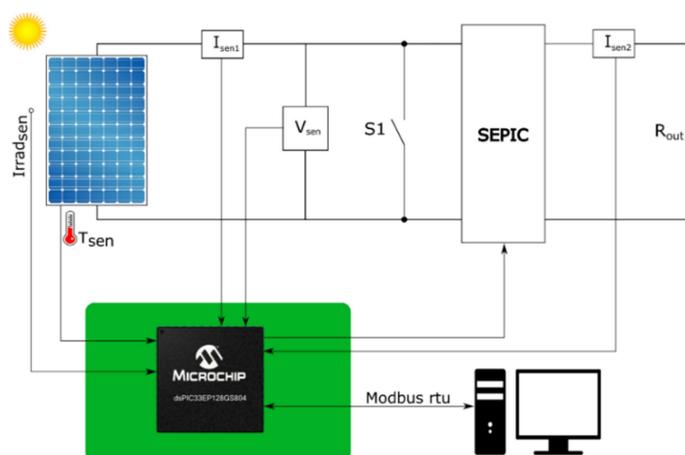


Figura 6: Esquema general del equipo de ensayo.

$I_{sen1};$ $I_{sen2}$	ACS723LLCTR (10A AC/DC)
$Irrad_{sen}$	LI-COR, modelo LI-200
$T_{sen}$	LM35 (10 mV/°C)
$V_{sen}$	Divisor Resistivo
$S_1; S_2$	IRFS4227PbF (200 V; 130 A; 22 mΩ)
<b>Procesador</b>	dsPIC 33EP128GS804

Tabla 3: Descripción de sensores y procesador empleados.

El ensayo comienza con el convertidor inactivo y con  $S_1$  cerrado, con lo que el módulo se encuentra en cortocircuito y se almacenan los valores de corriente y tensión ( $I_{sc}; 0$ ); luego se abre  $S_1$  y, con el módulo en vacío, se almacenan el segundo par de datos  $I-V$  ( $0; V_{oc}$ ). Simultáneamente, se almacenan los valores de irradiación y temperatura del módulo FV. A partir de este momento se pone en marcha el convertidor variando el ciclo de trabajo  $D$ , desde un mínimo valor al máximo posible, respetando la condición de MCC. Se toman cuarenta pares de valores de  $I-V$  en todo el barrido, almacenándolos en una tabla.

Concluida la primera etapa del ensayo, el sistema queda en espera hasta que la temperatura del módulo haya variado 10°C respecto de la registrada durante el primer barrido. Alcanzada esta temperatura, el proceso de ensayo de la segunda etapa es idéntico a lo descrito previamente.

El tiempo de duración de cada una de las etapas, tiene una restricción importante; a cada variación del ciclo de trabajo, le corresponde un transitorio en las señales de tensión y corriente, que deben ser evitados al momento de tomar las mediciones de corriente y tensión. Es por ello que la duración de cada una de las etapas, se estableció en 10 segundos.

Una variación del ciclo de trabajo ( $D$ ) a paso constante desde  $D_{min}$  a  $D_{max}$  no asegura una adecuada distribución de puntos a lo largo de la curva  $P-V$ . De modo de asegurar una cantidad suficiente de pares de puntos  $I-V$  en la región de  $P_{max}$ , se procede de la siguiente manera:

1. Se realiza un primer barrido a paso constante de modo de determinar en forma aproximada el valor de  $P_{max}$ , y a qué valor de  $D$  corresponde. Se establecen tres intervalos para el trazado de la curva, comprendidos entre  $D_{min}-D_1$ ,  $D_1-D_2$  y  $D_2-D_{max}$ . El intervalo  $D_1-D_2$  estará centrado en el valor de  $D$  correspondiente a  $P_{max}$ , y su  $\Delta D$  se establece en 0,2. Luego, se asigna para cada intervalo el paso adecuado para el incremento de  $D$ , de modo que para el primer y tercer intervalo le corresponden cinco pares de puntos a cada uno; los treinta pares de puntos restantes son asignados al intervalo  $D_1-D_2$ .
2. Se comienza con el ensayo del módulo según lo descrito anteriormente.

3. Los resultados se muestran en PC de modo de obtener una información completa de las características de panel fotovoltaico. La figura 7 muestra una foto del equipo desarrollado.

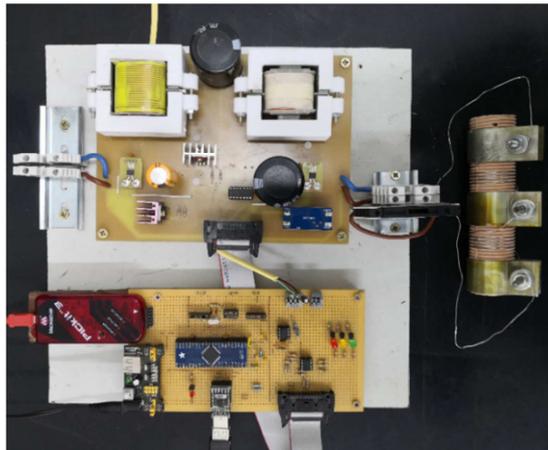


Figura 7: Equipo para realización del ensayo.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Es posible realizar dos tipos de procedimientos para verificar los valores estándar del módulo FV a ensayar.

En el primer procedimiento, se toman los resultados de cualquiera de los dos barridos realizados, y a partir de los datos de  $\alpha$  y  $\beta$  provistos por el fabricante, con las ecuaciones (1) y (2) se procede al cálculo de las características eléctricas estándar del módulo.

Si se elige el segundo procedimiento, con los datos registrados en los dos barridos, y a partir de las ecuaciones (5) y (6), se obtienen los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  del módulo FV. Posteriormente se calculan las características eléctricas estándar.

En la figura 8, haciendo uso de Matlab, se grafican las curvas I-V y P-V de ambos barridos. Las condiciones ambientales del ensayo se muestran en la tabla 4.

La figura 9 muestra las capturas de pantalla de los reportes obtenidos para cada uno de los procedimientos descritos. En la pestaña “Configuración” es posible seleccionar el procedimiento aplicado. Si se quiere utilizar los coeficientes de temperatura  $\alpha$  y  $\beta$  provistos por el fabricante del módulo FV, éstos deberán ser cargados en forma manual previo a la realización del ensayo.

La figura 10 muestra las curvas estándar V-I y V-P obtenidas en el reporte del ensayo, según se utilice el primer o segundo procedimiento respectivamente.

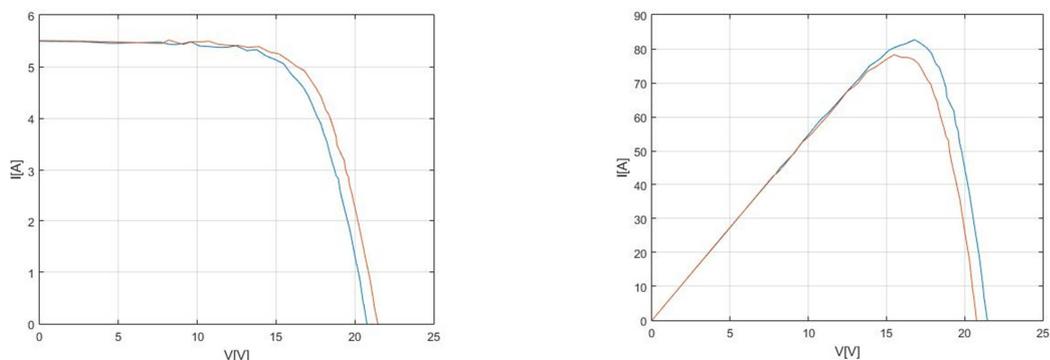


Figura 8: Curvas V-I y V-P obtenidas del ensayo.

	Temperatura de ensayo [°C]	Irradiación [W/m <sup>2</sup> ]
Primer barrido	28,1	1004
Segundo barrido	38,1	1013

Tabla 4: Condiciones ambientales del ensayo.

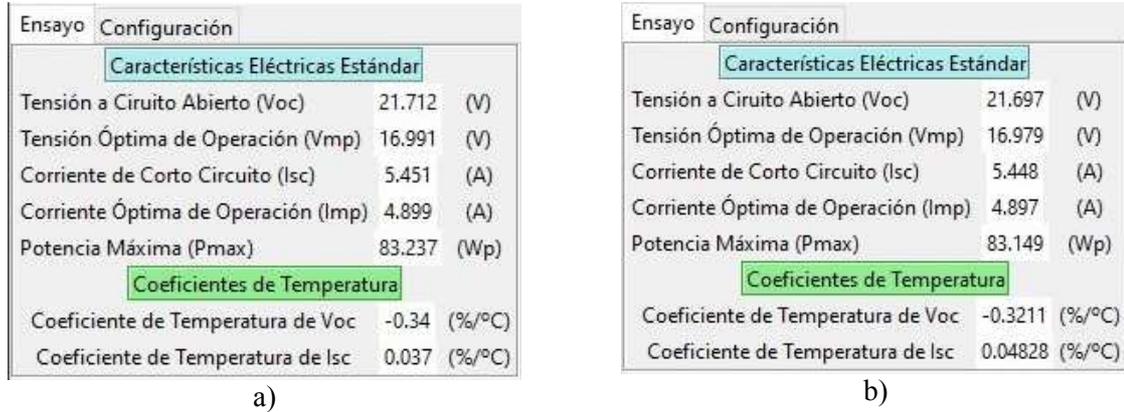


Figura 9: Reportes del ensayo: a)  $\alpha$  y  $\beta$  provistos por el fabricante. b)  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos de ensayo.

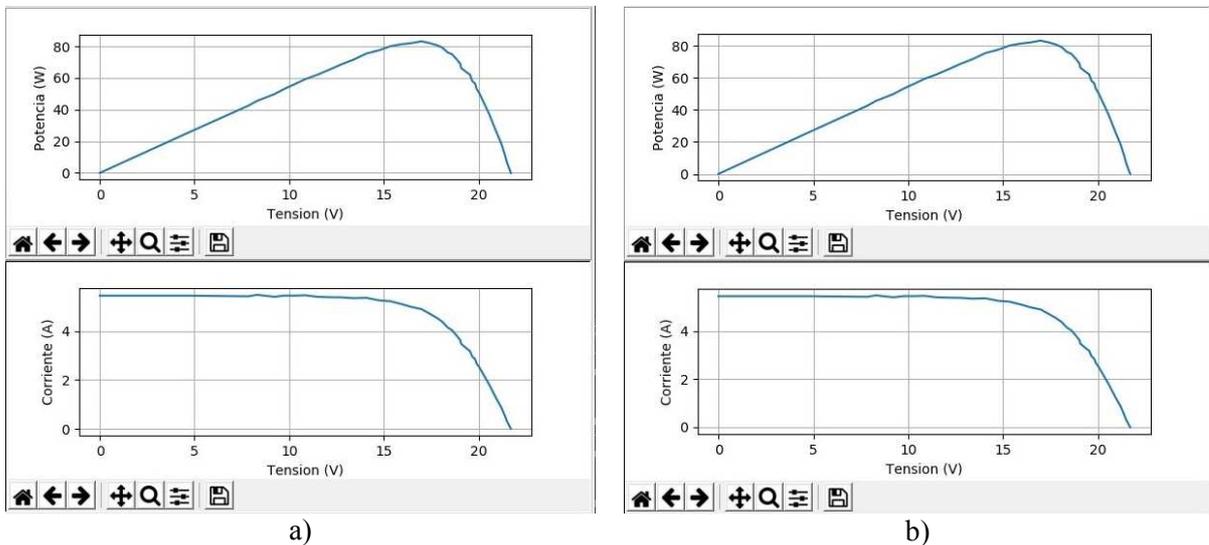


Figura 10: Curvas V-I y V-P estándar: a)  $\alpha$  y  $\beta$  provistos por el fabricante. b)  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos de ensayo.

## CONCLUSIONES

Se ha propuesto en este trabajo la caracterización de módulos FV a partir de un convertidor SEPIC. Las conclusiones más relevantes de los ensayos realizados, pueden ser extraídas a partir del análisis de las figuras 9 y 10.

Se utilizaron dos procedimientos para la obtención de las características estándar de los módulos FV; el primero hace uso de los coeficientes de temperatura provistos por el fabricante (método más usualmente utilizado), y el segundo procedimiento propone determinar previamente dichos coeficientes.

De la observación de la figura 9, se observan diferencias sustanciales entre los coeficientes calculados y los especificados por el fabricante. El error cometido respecto a los valores provistos, es de un 5,5 % para  $\beta$  y de un 29 % para  $\alpha$ . La determinación de este último coeficiente requiere de sensores de medición de corriente con una alta precisión. Los sensores de efecto Hall utilizados, si bien proveen aislamiento galvánico, requieren de un esfuerzo adicional en la corrección del offset, por lo que un sensor

shunt es la solución más conveniente, a la vez que permite aumentar la frecuencia de conmutación del convertidor, reduciendo considerablemente el tamaño de sus componentes (inductancias y capacitores).

A pesar de lo expuesto, se observa una desviación insignificante en el cálculo del resto de los parámetros eléctricos estándar. Para  $P_{max}$  el error es del 0,1 %, para  $I_{mp}$  del 0,04 % y para  $V_{mp}$  del 0,07 %, por lo que el resultado de las curvas estándar obtenidas en las figuras 10 a) y 10 b), son prácticamente idénticos.

Analizando la figura 8, se puede concluir que un aumento en la cantidad de muestras adquiridas mejoraría la precisión en la determinación de los parámetros eléctricos asociados a  $P_{max}$ . Sin embargo, esto implica una mayor duración del ensayo, y por consiguiente un riesgo en la modificación de las condiciones ambientales.

Existen en el mercado equipamiento importado que permiten realizar análisis similares al propuesto. El desarrollo propuesto posibilita, primero sustituir la importación de los mismos, segundo, al utilizarse en un instituto de validación de curvas, validar en forma independiente los cálculos realizados, y tercero su flexibilidad posibilita modificar los algoritmos de acuerdo con los avances de los requerimientos y la tecnología. En síntesis, el desarrollo propuesto representa el estado del arte en el área, de trazadores de curvas I-V y verificación de performance de PV, sustituyendo productos importados a muy bajo costo comparativo.

## REFERENCIAS

- Alvarez M., Maldonado M., Lovera S. y Magnago F. (2017). Plataforma de ensayo para caracterización de módulos fotovoltaicos comerciales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente AVERMA*, 21, 59-70.
- Brito E., Antonio A., Cupertino A. y Pereira H. (2014). Characterization of solar panel using capacitive load. 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications INDUSCON 2014, 1-7.
- Da Costa Po J. (2011). Assessment of the IEC 60891 norm conversion methods under outdoor test conditions. Tesis de maestría en Ingeniería Energética y Ambiental. Universidad de Lisboa, Facultad de Ciencias, 1-53.
- De Blas M., Torres J., Prieto E. y García A. (2002), Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. *Renewable Energy* 25, 3, 371–380.
- Durán E, Piliouguine M., Sidrach de Cardona M., Galán J. y Andújar J. (2008). Different Methods to Obtain the I-V Curve of PV Modules: Review. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1-6.
- Erickson R. (2007). DC-DC Power Converters, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.
- Falin J. (2008). Designing DC/DC converters based on SEPIC topology. Texas Instruments Incorporated, *Analog Applications Journal*, 18-23.
- IEC60891 International Standard, Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. International Electrotechnical Commission (IEC) 2009.
- King D., Kratochvil J., y Boyson W. (1997). Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties and results. *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists*, 1183-1186.
- Kuay Y. y Yuvarajan S. (2006), An electronic load for testing photovoltaic panels. *Journals of Power Source (IJSR)*, 154, 308-313.
- Marcial F., Alvarez M., Maldonado M., Lovera S. y Magnago F. (2015). Diseño y Construcción de un Regulador de Tensión para Sistemas Solares con Seguimiento de Máxima Potencia. XXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente ASADES, 1-12.
- Moham N., Undeland T. y Robbins W. (2009). *Power Electronics. Converters, Applications and Design*, 3ª edición, pp 142–173. John Wiley & Sons, Inc.
- Muñoz J. y Lorenzo E. (2006), Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. *Solar Energy*, 80, 1489-1497.

- Priya S., Sastry O., Bora B. y Kumar A. (2015). Comparison of curve correction procedure of current and voltage as per IEC 60891 for thin film technology. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 1-4.
- Renduchintala U., Pang C., Pavan S. y Tatikonda K. (2016). Comparison of MPPT Techniques for SEPIC Converter Based Photovoltaic System. 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), 1-5.
- Sahbela A., Hassanb N., Abdelhameedb M. y Zekryb A. (2013). Experimental Performance Characterization of Photovoltaic Modules Using DAQ. Energy Procedia, 36, 323-336
- Sarikh S., Raoufi M., Bennouna A., Benlarabi A. y Ikken B. (2017). Design of an I-V Characteristic Tracer for Photovoltaic Systems. 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference, 1-5.
- Siddique H., Ping Xu P. y De Doncker R. (2013). Parameter Extraction Algorithm for One-Diode Model of PV Panels based on Datasheet Values. 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 7-13.
- Soedibyo, Amri B. y Ashari M. (2015). The Comparative Study of Buck-Boost, Cuk, Sepic and Zeta Converters for Maximum Power Point Tracking Photovoltaic Using P&O Method, 2nd Int. Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), Indonesia. 327-332.
- Van Dyk E., Gxasheka A. y Meyer E. (2002). Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules. Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1516-1519.
- Van Dyk E., Gxasheka A. y Meyer E. (2005). Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules. Renewable Energy, 30, 399-411.

## **PHOTOVOLTAIC MODULES CHARACTERIZATION BASED ON A SEPIC CONVERTER**

### **ABSTRACT**

This work aims to develop an electronic system to characterize photovoltaic modules by determining the standard I-V and P-V curves.

The scanning of the tested module's I-V curve is performed using a SEPIC converter, which allows the variation of the impedance connected to the photovoltaic module, allowing an efficient scanning.

The experimental results are contrasted against the parameters and curves provided by the manufacturers of the tested modules. Results demonstrate the excellent behavior of the implemented system.

**keywords:** SEPIC converters, temperature coefficients, photovoltaic tests systems.