

## ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR DESADAPTACIÓN EN CELDAS Y MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A. Firman<sup>1</sup>, V. Toranzos<sup>2</sup>, R. Sanchez<sup>2</sup>, A. Busso<sup>2</sup>, C. Cadena<sup>3</sup>, L. Vera<sup>2</sup>  
GER – Grupo en Energías Renovables - FaCENA – UNNE.  
Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina.  
Tel./Fax: (0379) 4473931 int 129, e-mail: afirman@ger-unne.com.ar

**RESUMEN:** El presente trabajo analiza el efecto que se produce en un módulo fotovoltaico o arreglo (FV) debido a una celda o módulo FV en condiciones de pérdidas por desadaptación eléctrica. Se utilizan modelos matemáticos de celdas FV a través de una herramienta de simulación de circuitos electrónicos de código abierto capaz de simular el comportamiento eléctrico de módulos o arreglos fotovoltaicos tanto en condiciones normales de generación como en condiciones de desadaptación eléctrica. La precisión obtenida en los resultados en base del contraste de curvas I-V experimentales con curvas I-V simuladas logra vincular el efecto producido por una celda defectuosa dentro de un módulo FV con los parámetros correspondientes al modelo equivalente eléctrico, y vincular el efecto que se produce en el sombreado parcial de una celda de un módulo FV. Como conclusión se destaca el hecho de que esta metodología ayuda a establecer que sucede en un arreglo fotovoltaico que presenta condiciones de pérdidas por desadaptación.

**Palabras clave:** energía solar, simulación de sistemas fotovoltaicos, curva I-V, mismatch.

### INTRODUCCIÓN

La generación en dispositivos fotovoltaicos (FV) puede encontrarse disminuida por diferencias debidas a pérdidas producidas por efecto inadecuado de acoplamiento entre módulos o entre celdas que componen el módulo FV. Estas pérdidas se denominan “*mismatch losses*” o “*pérdidas por desadaptación*”. Otro factor que ocasionan pérdidas por desadaptación pueden ser producidos por sombras parciales, inadecuado conexionado entre módulos, celdas FV con características eléctricas diferentes al resto que componen el módulo FV, o bien por asociar módulos con distinta capacidad de generación (Picault et al, 2010).

Las pérdidas por desadaptación ocasionan en las plantas generadoras fotovoltaicas una disminución en la potencia generada y por ende, inyectada a la red eléctrica lo que prolonga el tiempo de retorno de la inversión. Por lo que es de importancia conocer como este efecto se produce y altera el proceso de generación, lo que facilitaría la tarea de detectarlas y minimizarlas.

En la actualidad para minimizar el efecto de pérdidas por desadaptación se comercializan sistemas que son capaces de polarizar a cada módulo de un sistema FV en su punto de máxima potencia de forma independiente (Petroni y Ramos-Paja, 2011) por lo que se obtiene la máxima potencia que cada módulo puede entregar en las condiciones que se presenten. Este tipo de sistemas aún no se han popularizado en plantas de gran envergadura ni en las existentes en nuestra región.

El estudio de las pérdidas por desadaptación ya ha sido estudiado anteriormente y en la mayoría de los casos este estudio es asistido por herramientas de simulación como *CREARRAY*, *PSpice*, *Matlab*, etc., de manera de correlacionar los efectos producidos sobre el modelo equivalente eléctrico de la celda FV o del arreglo FV (Hecktheuer, 2001)(Castañer y Silvestre, 2002)(Zegaoui et al, 2011)(Di Dio et al, 2009).

Para representar el funcionamiento eléctrico de una celda FV o módulo FV, puede utilizarse el modelo equivalente eléctrico Ec. 1 que puede ser determinado por ajuste paramétrico sobre los datos de la curva corriente vs tensión (curva I-V) obtenida experimentalmente. (Firman et al, 2011)(Luque y Hegedus, 2003). Para el caso de una sola celda FV  $N=1$ .

$$I = I_{cc} \left[ 1 - \exp \left( \frac{V - V_{ca} + I.R_s}{m.N.V_t} \right) \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (1)$$

$$V_t = \frac{k.T.c}{q} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Becario ANPCyT-UNNE

<sup>2</sup> INENCO – UNSa – CONICET

<sup>3</sup> GER-UNNE

donde:  $I_{cc}$  es la corriente de cortocircuito del arreglo FV ensayado,  $V_{ca}$  su tensión de circuito abierto,  $R_s$  la resistencia serie,  $m$  el índice de idealidad del diodo,  $N$  el número de celdas conectadas eléctricamente en serie,  $R_p$  la resistencia paralelo y  $V_t$  el potencial térmico definido a su vez por el producto de  $k$  la constante de Boltzmann, por la temperatura de celda  $T_c$  dividido por la carga del electrón  $q$  (Ec 2) el cual posee un valor aproximado de 26 mV a 25 °C.

De esta manera se obtienen los valores que corresponden al modelo equivalente eléctrico de cinco parámetros (Fig. 1), los cuales son en nuestro caso según la Ec. 1, la corriente de corto circuito  $I_{cc}$ , el índice de idealidad del diodo  $m$ , la resistencia paralelo  $R_p$ , la resistencia serie  $R_s$  y la tensión de circuito abierto  $V_{ca}$ .

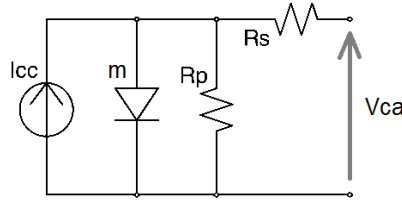


Figura 1: Modelo eléctrico equivalente de cinco parámetros de una celda fotovoltaica.

El circuito equivalente eléctrico de una celda puede interconectarse de manera de obtener el equivalente eléctrico de un módulo o de un arreglo FV completo, y a partir de él puede utilizarse programas de simulación de circuitos que responden al comportamiento del arreglo modelado, incluso se puede tener en cuenta a los diodos de *bypass* o diodos de derivación de cada módulo.

En este estudio se relaciona el efecto de disminución de la capacidad de generación de dispositivos FV en condiciones de funcionamiento y en condiciones que se producen pérdidas por desadaptación.

## METODOLOGÍA

Se analizarán las pérdidas de potencia por desadaptación de varios módulos fotovoltaicos que presentan una anomalía en el perfil de su curva I-V relacionados con factores de desadaptación con el modelo equivalente eléctrico de sus celdas FV. Para alcanzar dicho objetivo se utilizará la asistencia de un programa destinado a la simulación de circuitos electrónicos.

Las curvas I-V experimentales utilizadas fueron obtenidas por el empleo de un trazador de curvas características de dispositivos FV basado en una carga híbrida (Firman et al, 2010) (Fig. 2a). En el trazado de la curva I-V se emplea una celda calibrada de referencia de la misma tecnología de los módulos ensayados (silicio policristalino) necesaria para medir la irradiancia incidente en el plano de los módulos FV (Fig. 2b). Además se utiliza un sensor de temperatura tipo Pt 100 adosado en la parte posterior del módulo para medir su temperatura.



(a)



(b)

Figura 2. (a) Trazador de curvas I-V basado en una carga híbrida, (b) Celda de referencia utilizada para determinar la irradiancia en el plano de los módulos FV.

A partir de las curvas I-V en condiciones normales de generación se obtienen los parámetros de ajuste del modelo equivalente eléctrico de cinco parámetros (Ec. 1) y se trasladan los resultados a condiciones estándar de medida (IRAM 210013-2, 1998). En caso de curvas que presenten anomalías en su perfil que no pueden ser trasladadas a condiciones estándar de medida, se procederá a modelar considerando solamente la corriente de cortocircuito que entrega en esas condiciones y la temperatura de celda. Estos parámetros se utilizan como punto de partida para obtener el modelo de una única celda FV por aplicación de las Ec. 3, 4 y 5, para el módulo ensayado.

$$R_{st} = \sum_{i=1}^N R_{sc} \quad (3)$$

$$R_{pt} = \sum_{i=1}^N (R_{sc} + R_{pc}) \quad (4)$$

donde:  $R_{st}$  es la resistencia serie total del módulo,  $R_{sc}$  la resistencia serie de cada celda FV.  $R_{pt}$  es la resistencia paralelo total vista en los bornes del módulo y  $R_{pc}$  es la resistencia paralelo individual de cada celda. Aplicar estas ecuaciones implica considerar que todas las celdas que componen el módulo FV tienen la misma característica eléctrica.

De esta manera se realiza el modelado de un dispositivo FV a través de la construcción individual de cada celda que compone el módulo y se puede analizar las pérdidas por deficiencias de acoplamiento que se producen por medio de un programa de simulación de circuitos de código abierto de nombre *Qucs*, que utiliza como base el motor de simulación *PSpice* (Qucs, 2004). Este programa ya ha sido empleado con anterioridad en publicaciones en el área fotovoltaica (Schmid et al, 2011). En los modelos implementados además se tienen en cuenta los diodos *bypass* o diodos de derivación los que son conectados de la misma manera en que se encuentran presentes en el módulo FV. La ventaja de utilizar un programa libre, multiplataforma y de código abierto, como el que se menciona, radica en que otros investigadores pueden utilizarlo sin restricciones e intercambiar ideas sin necesidad de recurrir a herramientas de simulación cuyo precio puede resultar prohibitivo para ciertos grupos de investigación.

En el entorno del programa, a la fuente de corriente presente en el modelo de cinco parámetros se le otorga un valor igual a la  $I_{cc}$  del dispositivo a simular, (ya que las celdas están conectadas eléctricamente todas ellas en serie). La corriente de saturación inversa  $I_0$  del diodo necesaria para definir la juntura p-n en el modelo se la calcula a través de la aplicación de la Ec. 5 que es equivalente a la reportada en la bibliografía (Celik y Acikgoz, 2007) y se deduce de las ecuaciones básicas del diodo ideal. Las variables necesarias para aplicar dicha ecuación se extraen del trazado de la curva I-V trasladada a condiciones estándar de medida o en el caso de dispositivos fotovoltaicos que presentan defectos de generación, se hallan de forma iterativa y de los valores presentes en la curva I-V de comportamiento anómalo que no pueden trasladarse a condiciones estándar de medida.

$$I_0 \approx \frac{I_{cc} (R_{st} + R_{pt}) - V_{ca}}{R_{pt}} \cdot \exp\left(-\frac{V_{ca}}{m \cdot N \cdot V_t}\right) \quad (5)$$

El índice de idealidad del módulo  $m$ , se introduce en el modelaje por reemplazo del valor que compone el modelo *PSpice* del diodo denominado "índice de emisión" " $\lambda$ ". La Ec. 6 muestra el modelo matemático de diodo utilizado por el programa, donde  $I_d$  y  $V_d$  son respectivamente la corriente y la tensión de diodo.

$$I_d = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_d}{\lambda \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

Por medio la simulación paramétrica de una fuente de tensión variable conectada a la salida del modelo equivalente, se logra la excursión completa de este desde el estado de corto circuito (tensión igual a 0 V) hasta el estado de circuito abierto (tensión igual a  $V_{ca}$ ) de esta manera se obtiene la curva I-V del módulo o arreglo simulado, para ello se configura la simulación (Fig. 2a), partiendo de una celda FV. La interconexión de estas celdas en serie, en conjunto con los diodos de derivación conforma un módulo FV completo. La curva obtenida de una celda única puede verse en la Fig. 2b.

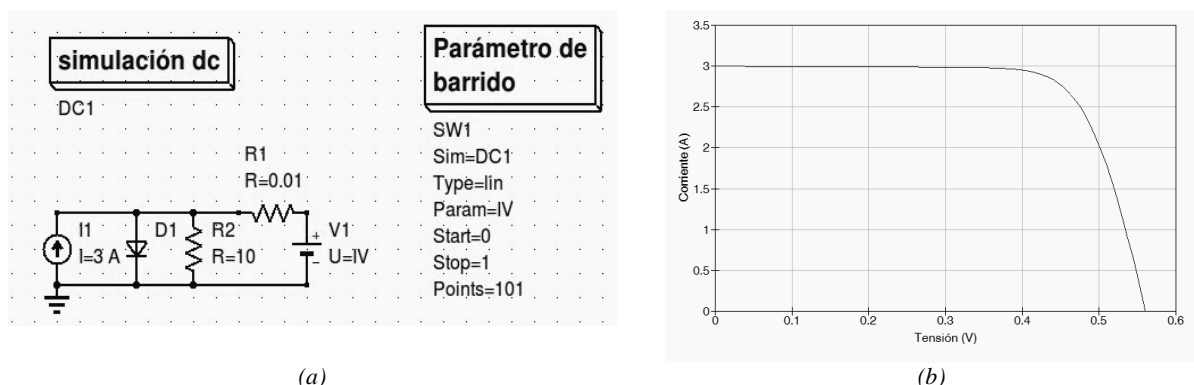


Figura 3: (a) Modelo de simulación de una celda FV, donde se aprecian los parámetros de simulación y la fuente destinada a producir el barrido de tensión para obtener la curva I-V. (b) Curva I-V obtenida de la celda modelada

Realizando la superposición y analizando cualitativamente los desvíos de la curva I-V simulada con la obtenida experimentalmente puede verificarse la precisión del modelo empleado.

## RESULTADOS

Para validar el método se procede a contrastar los valores medidos y simulados de un módulo de silicio policristalino de 50 Wp de 36 celdas. Los parámetros del modelo equivalente eléctrico son presentados en la Tabla 1. En el modelo también se tienen en cuenta los diodos de derivación de cada módulo. A partir de dicha información se determina el modelo equivalente eléctrico de una celda constituyente del mismo.

	$I_{cc}$ (A)	$V_{ca}$ (V)	$R_p$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	$m$	$N$	$I_o$ (A)
Módulo	2,81	21,81	254,91	0,48	1,15	36	4,33E-9
Celda	2,81	0,61	7,07	0,013	1,15	1	4,33E-9

Tabla 1: Valores de los parámetros del modelo de 5 parámetros del módulo de 50 Wp y los valores para cada celda componente calculados.

Las curvas I-V experimental y simulada se muestran en la Fig. 4. Puede notarse una concordancia en la zona correspondiente a la corriente de cortocircuito y en la zona correspondiente al codo de la curva. Mientras que en la zona de circuito abierto se produce una ligera diferencia en el ajuste, esto se debe a la sensibilidad de la exponencial en la ecuación del diodo, donde el producto  $m \cdot V_t$  resulta crítico ya que se trata de 36 celdas en serie. En rasgos generales se concluye que este método es adecuado para simular el comportamiento eléctrico de módulos FV en base a la reproducción de las condiciones experimentales.

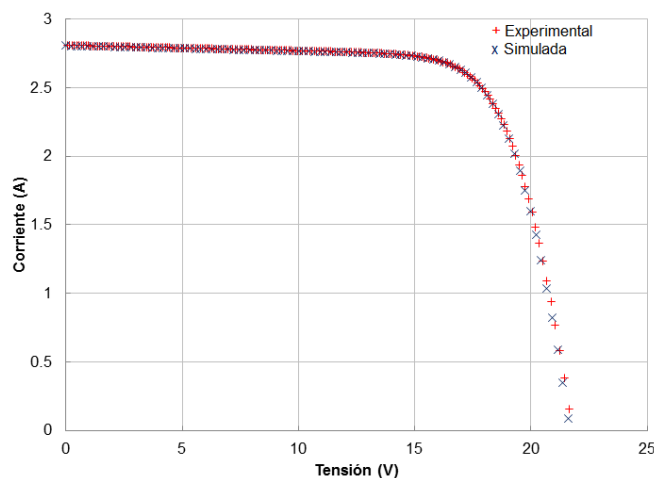


Figura 4: Curva I-V experimental y simulada para un módulo de 50 Wp.

Una vez verificado que el método reproduce adecuadamente el comportamiento eléctrico de la curva experimental se procede a analizar curvas I-V que presentan efectos de desadaptación eléctrica a partir de una gráfica experimental obtenida de dos módulos FV de 50 Wp interconectados eléctricamente en serie que presentan defectos de acoplamiento, se procede a simular dicho defecto construyendo virtualmente celda por celda ambos módulos, considerando de que uno de ellos entrega una corriente de cortocircuito menor, la que se obtiene a partir de las mediciones sobre la curva I-V experimental, para hallar el resto de los parámetros se aplica una metodología iterativa basada en el hecho de que se conoce su  $R_s$ , su  $V_{ca}$ . De esta manera se utiliza la  $R_p$ , el factor de idealidad  $m$  y la corriente de saturación inversa del diodo  $I_o$  como parámetros de ajuste. Lo que permite construir en el software de simulación de circuitos las 72 celdas que componen este arreglo.

Los resultados de la simulación arrojan los valores de los modelos de celda para cada módulo mostrados en la tabla 2.

	$I_{cc}$ (A)	$V_{ca}$ (V)	$R_p$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	$m$	$N$	$I_o$ (A)
Celda módulo 1	3,15	0,57	10	0,0072	1,136	1	1,22E-8
Celda módulo 2	2,93	0,57	7	0,0072	1,136	1	1,22E-8

Tabla 2: Valores de los parámetros de celda correspondientes a cada módulo del arreglo fotovoltaico de 100 Wp.

La Figura 5 muestra la curva I-V experimental de este arreglo y la curva I-V simulada obtenida a partir de la construcción y conexión de las 72 celdas que componen el arreglo de 100 Wp. Puede apreciarse un escalón de corriente alrededor de los 14 V producido por la asociación de dos módulos que en sus catálogos poseen igual potencia nominal. Dicho perfil es característico de los defectos de acoplamientos entre módulos FV, en donde la potencia máxima (punto que maximiza el área debajo de la curva) que este arreglo es capaz de entregar se ve disminuida por la acción de un segundo módulo de potencia menor.

En base a la reproducción de la curva experimental, se considera que la metodología empleada es de utilidad para determinar cualitativamente las causas que producen efectos de desadaptación eléctrica.

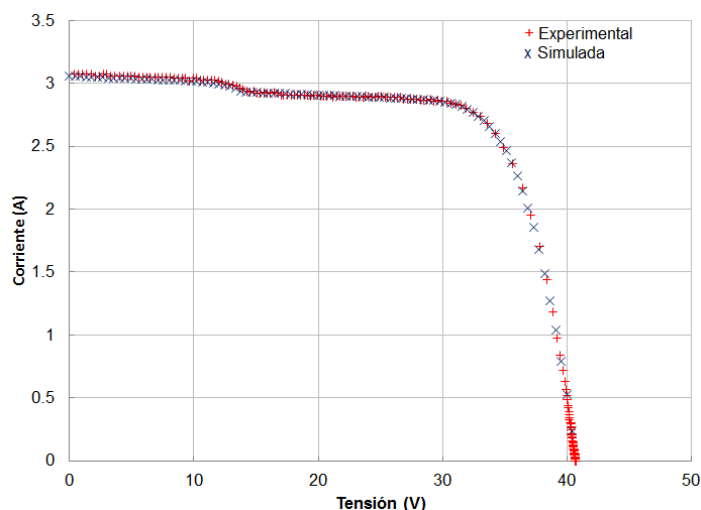


Figura 5: Curva I-V experimental y simulada del arreglo de 100 Wp donde se muestra el efecto de pérdidas por desadaptación.

A partir de la curva I-V obtenida experimentalmente de un módulo FV, que presenta un defecto inusual Fig. 6, se procede a vincular este efecto con los parámetros del modelo equivalente eléctrico que causan tal anomalía, mediante el empleo de una metodología iterativa sobre los componentes de cada célula FV del modelo. Para ello se planteó como hipótesis que el efecto está asociado a problemas que se encuentran sobre una sola celda y que el resto poseen igual comportamiento eléctrico. Se empleó para la simulación el arreglo conformado como muestra la Fig. 6b. Por simplicidad del esquema mostrado se hizo uso de subcircuitos, siendo estos, celdas individuales con la misma característica eléctrica.

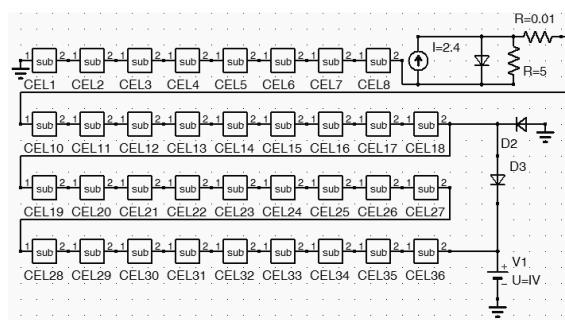
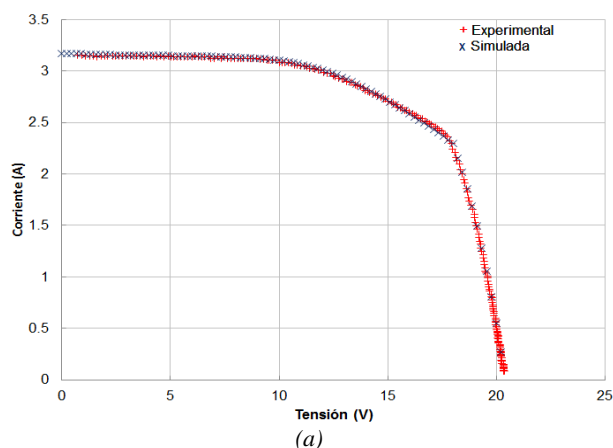


Figura 6: (a) Curva I-V experimental y simulada de un módulo de 50 Wp que presenta problemas de generación, (b) Captura de pantalla del modelo empleado donde se muestra la interconexión entre las celdas del módulo.

Para obtener una curva I-V simulada de características similares a la experimental se actuó sobre los parámetros de la novena celda y se necesitó de la combinación de valores de su equivalente eléctrico de 35 celdas iguales con la presencia de una anómala como se muestra en la Tabla 3.

	$I_{cc}$ (A)	$V_{ca}$ (V)	$R_p$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	$m$	$N$	$I_o$ (A)
Celda defectuosa	2,4	0,58	5	0,01	1,286	1	1,2E-8
Resto de las celdas	3,18	0,58	10	0,01	1,286	1	1,2E-8

Tabla 3: Valores empleados para modelar las celdas que componen al módulo de respuesta defectuosa.

Del análisis de los datos de la tabla 3, se verifica que el efecto anómalo puede ser producido por una sola celda menos eficiente o de menor área efectiva, que entrega en condiciones de corto circuito un 25% menos de corriente que las restantes y que a su vez su  $R_p$  se ve disminuida en un 50% con respecto a las restantes. Una posible explicación de este fenómeno, ya que se trata de un módulo nuevo sin uso, indicaría inadecuada selección de celdas o problemas constructivos en la línea de montaje relacionada a la interconexión de las mismas.

Un caso muy común que produce pérdidas por desadaptación es el debido a la presencia de sombras. En base a la curva I-V experimental obtenida de un módulo policristalino de 50 Wp en la que se produjo adrede una sombra parcial sobre una sola de las celdas que componen sus 36 celdas, se analiza por medio de la simulación el proceso que ocurre en ella. Las curvas I-V obtenidas son las mostradas en la Fig. 7a. La curva simulada resulta del trazado de la curva sobre el modelo mostrado en la Fig. 7b realizada con los valores mostrados en la Tabla 4. Debido a la dificultad de trasladar a condiciones estándar una curva

como la mostrada se procedió a realizar la simulación en la condición de temperatura en que se tomó tal curva. En esta ocasión se trató a la novena celda como la celda sombreada.

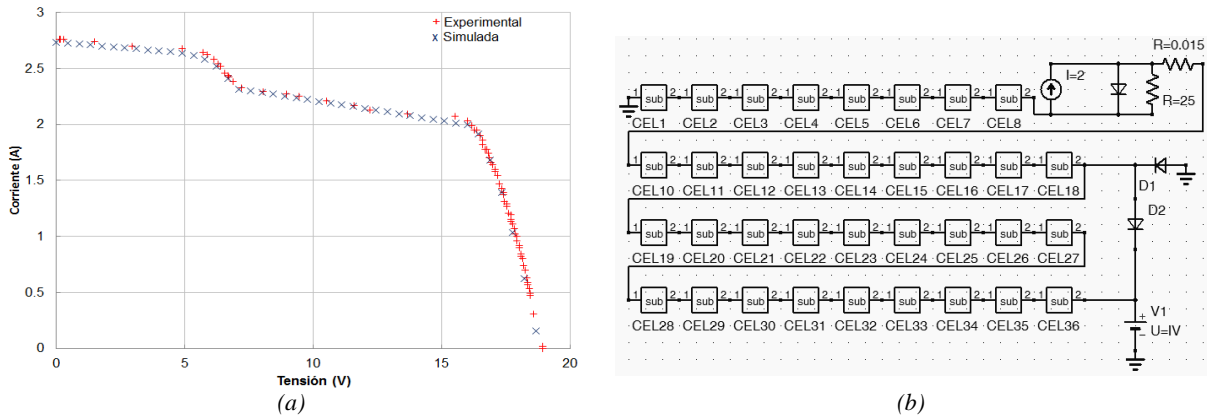


Figura 7: (a) Curva I-V experimental y simulada de un módulo de 50 Wp con una celda parcialmente sombreada, (b) Interconexión entre las celdas del módulo y los valores encontrados al actuar sobre la celda sombreada.

	$I_{cc}$ (A)	$V_{ca}$ (V)	$R_p$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	$m$	$N$	$I_o$ (A)
Celda sombreada	2,0	0,53	25	0,015	1,2	1	1,16E-7
Resto de las celdas	2,76	0,53	3	0,015	1,2	1	1,16E-7

Tabla 4 Valores empleados para modelar al módulo en el cual se sombrea una celda.

Del análisis de los valores del modelo hallado para las celdas que componen el módulo se infiere que la celda sombreada entrega un 38% menos de corriente de cortocircuito que las demás celdas debido a la reducción de su área efectiva de generación y para el ajuste del modelo se necesitó del aumento de la  $R_p$  en casi un orden. Este último resultado necesita ser profundizado con más experimentos para explicarlo desde el punto de vista de la física de sólidos, hecho que excede el objetivo de esta investigación.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolla una metodología útil para simular y analizar el comportamiento de módulos o arreglos fotovoltaicos tanto en condiciones normales de generación como en condiciones de desadaptación eléctrica.

Se utiliza simulaciones basadas en un *software* libre de código abierto, sin restricciones, multiplataforma, lo que facilita compartir datos, siendo esta una alternativa eficaz para la simulación de celdas, módulos o arreglos FV con respecto a otros programas cerrados o de elevado costo.

Esta metodología se comprobó en base a la reproducción obtenida con curvas I-V simuladas sobre curvas I-V experimentales obtenidas para un módulo FV en condiciones normales de funcionamiento partiendo del modelo equivalente eléctrico y luego para el caso de desadaptación simple en la serie de dos módulos con distinta capacidad de generación.

Se logró vincular el efecto producido por una celda defectuosa dentro de un módulo FV con sus parámetros correspondientes al modelo equivalente eléctrico de dicha celda FV defectuosa, de la misma manera se logró simular y vincular el efecto que se produce en el sombreado parcial de una celda única de un módulo FV. Por tales motivos se concluye que se satisface el objetivo de conocer el efecto que se produce dentro de una celda FV de un módulo en condiciones de pérdidas por desadaptación eléctrica.

Este trabajo puede continuarse con la realización de sucesivos experimentos y análisis del modelo para explicar las variaciones de los parámetros que se encontró en los casos de curvas anómalas.

## BIBLIOGRFÍA

Almonacid F., Rus C., Hontoria L., Fuentes M., Nofuentes G. (2009). Characterisation of Si-crystalline PV modules by artificial neural networks. *Renewable Energy* 34. pag. 941–949.

Bello C., Jimenez V., Toranzos V., Busso A., Vera L., Cadena C. (2009). Relevador portátil de curvas I-V de paneles fotovoltaicos como herramienta de diagnóstico in situ de sistemas de generación fotovoltaica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 13. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.

Castañier L. y Silvestre S. (2002). *Modelling Photovoltaic Systems using PSpice*. JOHN WILEY & SONS, LTD.

Celik A., Acikgoz N., (2007). Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models, *Applied Energy* 84, 1, pag. 1–15.

Di Dio V., La Cascia, D., Miceli R., Rando C. (2009). A Mathematical Model to Determine the Electrical Energy Production in Photovoltaic Fields Under Mismatch Effect. IEEE.

Firman A., Toranzos V., Busso A., Cadena C., Vera L. (2011). Determinación del punto de trabajo de sistemas fotovoltaicos conectados a red: Método simplificado de traslación punto a punto a condiciones estándar de medida. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 15. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.

Firman A., Toranzos V., Busso A., Cadena C., Vera L. (2010). Sistema híbrido para la caracterización eléctrica de arreglos fotovoltaicos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 14, ISSN 0329-5184.

Heckteuer L. (2001). Análise de associações de módulos fotovoltaicos. Tesis doctoral. UFRGS.

IRAM 210013-2: (1998). Módulos fotovoltaicos. Características eléctricas en condiciones normalizadas.

Luque A. y Hegedus S. (2003). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons, ISBN 0-471-49196-9, pag: 949-953.

Petrona G., Ramos-Paja C. (2011). Modeling of photovoltaic fields in mismatched conditions for energy yield evaluations. Electric Power Systems Research 81. pag. 1003–1013.

Picault D., Raison B., Bacha S., de la Casa J., Aguilera J. (2010) Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses. Solar Energy 84 pag. 1301–1309.

Qucs (2004). <http://qucs.sourceforge.net/> disponible on-line 01/08/2012.

Schmid J., Drapalik M., Kancsar E., Schlosser V., Klinger G., (2011). A study of power quality loss in PV modules caused by wind induced vibration located in Vienna. Solar Energy 85 pag. 1530–1536.

Zegaoui A., Petit P., Aillie M., Sawicki J., Belarbi A., Krachai M., Charles J., (2011). Photovoltaic Cell/Panel/Array Characterizations and Modeling Considering Both Reverse and Direct Modes. Energy Procedia 6 pag. 695–703.

## ABSTRACT

This paper analyzes the effect that occurs in a cell of a PV module in terms of electrical mismatch losses. PV cells Mathematical models are used through an open source simulation destined to electronic circuits, its can simulate the electrical performance of photovoltaic modules and arrays under normal conditions and in electrical mismatch. The accuracy obtained based on the results of experimental IV curves contrast with simulated IV curves related the effect achieved by a defective cell in a PV module with the parameters for the electrical equivalent model and link the effect produced in the shaded cell of a PV module. In conclusion highlights the fact that this approach helps to establish what happens in a photovoltaic array in conditions of mismatch losses.

**Keywords:** solar energy, simulation of photovoltaic systems, I-V curve, mismatch losses