

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/262651812>

Modelo genérico de celdas fotovoltaicas

Article · July 2008

CITATIONS

3

READS

2,060

4 authors, including:



Herman Fernández

Universidad Politécnica Antonio José de Sucre, UNEXPO

41 PUBLICATIONS 34 CITATIONS

SEE PROFILE



Abelardo Martinez

University of Zaragoza

63 PUBLICATIONS 415 CITATIONS

SEE PROFILE



Víctor Guzmán

Simon Bolivar University

87 PUBLICATIONS 569 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Libro de convertidores de potencia [View project](#)



Simulaciones equipos de energía de potencia en Power hardware in the loop [View project](#)

MODELO GENÉRICO DE CELDAS FOTOVOLTAICAS

Fernández, Herman
Guzmán, Víctor Manuel

Martínez, Abelardo
Giménez, María Isabel

Resumen: Este trabajo presenta el modelado y la simulación en PSpice de un circuito que se comporta eléctricamente como un panel solar. El modelo permite seleccionar un circuito que representa una única celda o combinaciones de múltiples celdas solares conectadas en serie y paralelo. La evaluación del modelo se realiza mediante una herramienta computacional, que permite ingresar parámetros relacionados con el número de celdas conectadas en distintas configuraciones serie-paralelo, las resistencias de una celda simple, un parámetro adimensional para el ajuste del voltaje a circuito abierto y la corriente de cortocircuito. El modelo calcula automáticamente la resistencia serie y paralelo cuando se trata de circuitos complejos formados por un arreglo de paneles solares. Ajustando debidamente los parámetros mencionados, se obtienen las curvas características de la corriente y de la potencia en función del voltaje de circuito abierto de arreglos con celdas fotovoltaicas comerciales. La aplicación del modelo se restringe a celdas fotovoltaicas sometidas a una misma radiación solar, ya que no se consideran los efectos de sombra sobre celdas en el arreglo. Tampoco se evalúan los efectos cuando cambia la temperatura. Los resultados obtenidos en la simulación demuestran un buen desempeño del modelo desarrollado, lo que permitirá su uso para simular instalaciones de sistemas fotovoltaicos formados por celdas solares, bancos de baterías y circuitos de conversión de energía.

Palabras clave: Paneles fotovoltaicos/ Simulación de celdas solares/ Conexión de paneles fotovoltaicos/ PSpice.

GENERIC PHOTOVOLTAIC CELL MODEL

Abstract: This work presents the modeling and the simulation in Pspice of a circuit that has the electric behavior of a solar panel. The model allows for the selection of a circuit representing a single cell or multi cell arrays connected in serie and parallel. Model evaluation is done using a computational tool that can input parameters related to the number of cells connected in the different serie-parallel combinations, the single cell resistances, a dimension-less parameter for open circuit tuning and the short circuit current. The model automatically calculates the serie and parallel resistance when working with complex circuits in a solar panel array. Tuning the above mentioned parameters the voltage and current characteristic curves of commercially available solar cell arrays are obtained. Model application is restricted to photovoltaic cells under the same solar radiation since the shadow effect over different cells is not considered. The results obtained in the simulation prove the model's good performance, making it useful in the simulation of photovoltaic systems with solar cells, battery banks and energy conversion circuits.

Keywords: Photovoltaic Panels/ Solar Cell Simulation/ Photovoltaic Panels Interconnection/ PSpice

I. INTRODUCCIÓN

Es notable actualmente el crecimiento de las instalaciones fotovoltaicas en Europa, Norte América y otras regiones del mundo. Los datos estadísticos recientes demuestran un mercado progresivo de instalaciones cuyos paneles solares forman parte de la estructura física en las edificaciones (paredes, techos, pasillos, balcones, etc.). También se ha incrementado su aplicación como fuente de energía en sitios rurales desprovistos del servicio de energía eléctrica. Las

aplicaciones de los sistemas con paneles fotovoltaicos son diversas: suministro de energía para viviendas, accionamientos de bombas centrífugas, sistemas de telemetría, satélites espaciales, centrales fotovoltaicas con conexión a la red eléctrica, etc. En la mayoría de las aplicaciones comentadas anteriormente no es posible disponer de la energía necesaria para satisfacer la demanda de la carga cuando se cuenta con una única celda fotovoltaica, razón por la cual en este trabajo se desarrolla un modelo sencillo capaz de representar matrices de múltiples unidades conectadas en

Manuscrito finalizado en Puerto Ordaz, Venezuela el 2007/12/01, recibido el 2008/01/17, en su forma final (aceptado) el 2008/03/29. El Dr. Herman Fernández es Profesor Titular en el Dpto. de Electrónica de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz, Telefax 0286-9621205, correo electrónico hermanfernand@gmail.com. El Dr. Abelardo Martínez Iturbe es Profesor Titular en el Centro de Estudios Superiores de la Universidad de Zaragoza, España. Teléfono 34-976-761974, fax 34-976-762111, correo electrónico amiturbe@posta.unizar.es. Los Dres. Víctor Guzmán Arguís y María Isabel Giménez son Profesores Titulares en el Dpto. de Electrónica y Circuitos, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas Baruta, Caracas, teléfono 0212-9063677, fax 0212-9063631, correos electrónicos vguzman@usb.ve. mgimenez@usb.ve. respectivamente.

serie, en paralelo o en una configuración mixta serie-paralelo de celdas comerciales. Los parámetros de entrada en el modelo son el número de celdas conectadas en serie y/o en paralelo, la resistencia serie y la resistencia en paralelo de la celda, un factor adimensional para el ajuste del voltaje a circuito abierto y la corriente de cortocircuito. La simulación de los circuitos con paneles fotovoltaicos se realiza con el programa PSpice. Los gráficos obtenidos permiten apreciar la familia de curvas características de las celdas solares, tales como la corriente generada y la potencia producida en función del voltaje en los extremos de salida. En los gráficos se puede identificar con precisión la corriente de cortocircuito, el voltaje a circuito abierto y la potencia máxima generada. Se considera para la evaluación del modelo que la radiación solar es uniforme en todas las celdas fotovoltaicas.

La metodología para la evaluación del modelo se basa en el desarrollo de distintos ensayos sobre el comportamiento de un arreglo de dos celdas comerciales ante una radiación solar variable.

Inicialmente se describe el circuito genérico de una celda fotovoltaica, posteriormente se explica el modelo PSpice desarrollado para representar distintas topologías de circuitos con paneles solares, a continuación se realizan las pruebas de simulación y por último se expone un análisis comparativo de los resultados generados por el programa respecto a los valores calculados teóricamente y a los suministrados por los fabricantes.

II. DESARROLLO

1. Celdas fotovoltaicas

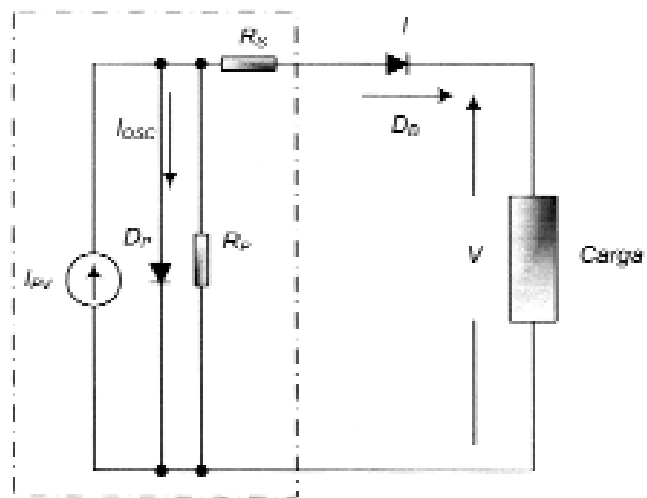
El circuito mostrado en la Fig. 1 describe el circuito equivalente de un panel fotovoltaico conectado a una carga genérica. La corriente entregada por la celda solar viene determinada por [1]:

$$I = I_{PV} - I_{OSC} \left(e^{\frac{V + I R_S}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_P} \quad (1)$$

donde V e I , I_{PV} , I_{OSC} , R_S y R_P son respectivamente el voltaje y la corriente generada por el panel, la corriente producida por el efecto fotoeléctrico, la corriente de oscuridad que circula por el diodo paralelo D_P , la resistencia serie y la resistencia paralelo de la celda solar, con $V_t = mkT/e \approx 25mV$ a $300^\circ K$. El diodo D_B , conectado en serie con la celda impide la disipación de energía del panel fotovoltaico cuando el voltaje en sus extremos es negativo durante la ausencia de radiación solar. Considerando despreciables los efectos de la resistencia paralelo, $(V + I_{PV} R_S) / V_t \gg 1$, igualando la corriente de

cortocircuito a la corriente generada, despreciando los elementos resistivos de interconexión entre celdas y suponiendo celdas idénticas en un mismo panel solar, la expresión (1) se reduce a:

$$I = I_{PV} - I_{OSC} \left(e^{\frac{V + I_{PV} R_S}{V_t}} \right) \quad (2)$$



Circuito equivalente de un Panel Fotovoltaico

Fig. 1. Circuito equivalente de un panel fotovoltaico conectado a una carga genérica. El modelo de la celda está conformado por la fuente de corriente IPV cuyo valor es proporcional a la radiación solar, la resistencia equivalente serie R_S y el circuito paralelo formado por el diodo D_P y la resistencia R_P .

2. Modelos de circuitos genéricos con celdas fotovoltaicas

Si bien es cierto que se han reportado varias propuestas para representar circuitos basados en celdas fotovoltaicas, algunos de los modelos requieren parámetros que no se encuentran disponibles en las hojas de especificaciones técnicas suministradas por los fabricantes, o necesitan de una cantidad considerable de datos para evaluar su funcionamiento [2]-[5]. Una de las ventajas del modelo desarrollado es su capacidad de operar con pocos parámetros de entrada para demostrar gráficamente el funcionamiento de circuitos con celdas fotovoltaicas. Esta característica lo hace ideal para ser usado con fines didácticos y en trabajos de investigación dedicados al estudio de los sistemas de regulación de convertidores de potencia conectados a celdas solares.

La Fig. 2 muestra el circuito en PSpice que representa el modelo desarrollado para representar circuitos genéricos de celdas

fotovoltaicas. Los componentes del modelo son la fuente de corriente I_1 , cuyo valor depende del número de celdas del circuito, la fuente de corriente dependiente IE_2 , equivalente a la corriente que circula por el diodo en antiparalelo cuando la celda no recibe radiación solar, la fuente de voltaje controlada por tensión, E_2 , que polariza al circuito paralelo $D23 - R2$ [6], con un valor asignado en la ganancia que depende del factor K_{factor} y del número de celdas conectadas en serie y R_1 como la resistencia serie equivalente del arreglo de celdas. A continuación se describen en detalle las expresiones matemáticas que caracterizan el circuito.

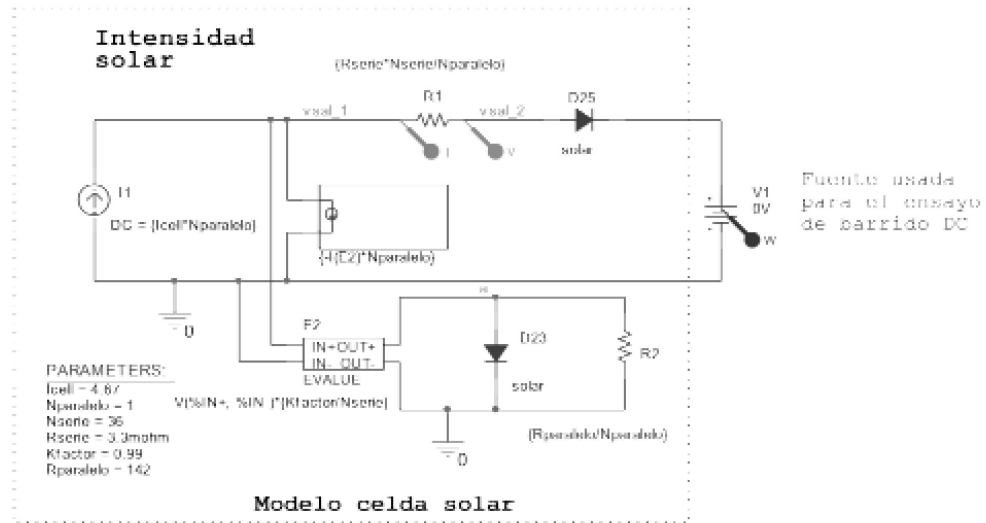


Fig. 2. Modelo genérico en PSpice de circuitos con celdas fotovoltaicas. Circuito equivalente y parámetros de entrada para la asignación de componentes en serie, paralelo, corriente por celda y factor de ajuste del voltaje a circuito abierto. La fuente V1 se usa para el ensayo del barrido DC, lo cual permite obtener la familia de curvas corriente y potencia en función al voltaje generado por el panel.

El valor de la máxima intensidad solar producida se ajusta en función al número de celdas en paralelo según la relación:

$$I_1 = I_{cell} \cdot N_{paralelo} \quad (3)$$

donde:

I_{cell} : corriente fotovoltaica por celda

$N_{paralelo}$: número de celdas en paralelo

El componente $D23$ simula el diodo en antiparalelo de la celda, al cual, conjuntamente con la resistencia paralelo $R2$, se le aplica una polarización a través de una fuente de voltaje controlada por voltaje, E_2 . Esta fuente produce en la resistencia $R2$ un voltaje determinado por la expresión:

$$V_{R2} = (V_{IN+} - V_{IN-}) \left(\frac{K_{factor}}{N_{serie}} \right) \quad (4)$$

donde:

V_{IN+} , V_{IN-} : voltaje de entrada de la fuente dependiente E_2 , que depende de la intensidad solar

K_{factor} ($0 < K_{factor} < 1$): se utiliza para hacer ajustes de la curva de datos comerciales de la tensión a circuito abierto y la intensidad de cortocircuito.

N_{serie} : grupo de paneles fotovoltaicos colocados en serie.

La resistencia equivalente conectada en paralelo es:

$$R_2 = \frac{R_{paralelo}}{N_{paralelo}} \quad (5)$$

La fuente de corriente dependiente IE_2 genera la corriente equivalente al circuito paralelo de la celda, igual a:

$$I_{osc} = I(E_2) \left(\frac{N_{paralelo}}{K_{factor}} \right) \quad (6)$$

Considerando la fuente de entrada I_1 constante al valor determinado por el factor indicado en la Figura 2, se puede determinar la corriente generada por la celda fotovoltaica como:

$$I = (I_{cell} N_{paralelo}) - I(E_2) \left(\frac{N_{paralelo}}{K_{factor}} \right) \quad (7)$$

El voltaje generado en los terminales de salida es:

$$V = (V_{IN+} - V_{IN-}) - \left[(I_{cell} N_{paralelo}) - I(E_2) \left(\frac{N_{paralelo}}{K_{factor}} \right) \right] R_1 \quad (8)$$

$$= (V_{IN+} - V_{IN-}) - \left[\left((I_{cell} N_{paralelo}) - I(E_2) \left(\frac{N_{paralelo}}{K_{factor}} \right) \right) \left(R_{serie} \frac{N_{serie}}{N_{paralelo}} \right) \right]$$

Examinando las dos últimas ecuaciones se puede apreciar que el parámetro K_{factor} es determinante en la corriente de cortocircuito y en el voltaje a circuito abierto de la celda fotovoltaica.

3. Resultados y discusión

Los resultados de la simulación se exponen considerando paneles fotovoltaicos comerciales. Los ensayos permiten obtener las curvas de corriente y potencia en función del voltaje de salida del panel solar, aplicando primero un valor

fijo y luego una variable de radiación solar (en ambos casos uniforme en todo el panel), modelados por una fuente de intensidad variable.

Para validar el modelo se seleccionaron dos celdas comerciales con el fin de comparar los resultados obtenidos en la simulación con los datos suministrados por los fabricantes. Generalmente los datos proporcionados en las hojas de especificaciones técnicas son la potencia máxima, el voltaje y la corriente a la potencia máxima, la potencia mínima garantizada, la corriente de cortocircuito, el voltaje a circuito abierto y los coeficientes de temperatura del voltaje, de la corriente y de la potencia de la celda fotovoltaica. Desafortunadamente, no se dispone en las especificaciones técnicas de los valores de la resistencia serie y la resistencia paralelo de la celda, a no ser que se obtengan experimentalmente. No obstante, ajustando arbitrariamente en el modelo los valores de la resistencia del circuito, se logró representar con precisión las curvas características de celdas solares comerciales.

Para obtener la curva característica $I(v)$ de celdas solares comerciales empleando el circuito de la Fig. 2, se aplica el análisis de barrido disponible en el Pspice con dos fuentes DC ($I1$ y $V1$) operando en modo anidado (Nested DC Sweep). A cada valor de intensidad de la fuente $I1$, la fuente $V1$ varía gradualmente hasta alcanzar un valor máximo que

corresponde con el voltaje a circuito abierto de la celda solar. Automáticamente, se le asigna un nuevo valor a la fuente de corriente $I1$ y se repite el mismo procedimiento con la fuente de voltaje $V1$. El análisis culmina cuando $I1$ alcanza el valor máximo que equivale a la corriente de cortocircuito a la máxima radiación solar. El diodo $D25$ en serie conectado en la salida evita la circulación de corriente reversa de la fuente $V1$ hacia la celda cuando su valor supera al voltaje producido en los extremos de $IE2$.

Para el primer ensayo se ha seleccionado el panel solar ISOFOTÓN I-75S-12[7], con valores especificados por el fabricante resumidos en la Tabla I. Para la simulación, se le ha asignado al parámetro I_{cell} el valor correspondiente a la corriente de cortocircuito, se ha seleccionado un panel solar de 36 celdas, un $K_{factor}=0,99$ (que de ser necesario se puede ajustar para conseguir un valor preciso del voltaje a circuito abierto) y valores aleatorios de la resistencia serie y paralelo (no indicadas por el fabricante). Se ha asignado $V1$ como fuente primaria, la cual se ajusta desde 0 a 22V, lo que permite hallar el voltaje de circuito abierto del modelo con el fin de compararlo con el especificado por el fabricante de la celda. Se elige a $I1$ como fuente secundaria, la cual se fija al valor de corriente de cortocircuito. Los resultados de la simulación se muestran en la Fig. 3, que se corresponde con la característica corriente y potencia en función al voltaje de una celda solar.

Tabla I Comparación de los datos del fabricante y los resultados de la simulación para la celda solar ISOFOTON I-75S / 12 (36 células en serie, $I_{cell}=4.67A$)

Característica eléctrica	Datos nominales	Resultados de la simulación	Diferencia
Potencia máxima (Pmax)	75W \pm 10%	75,004W	<0,005%
Voltaje a Pmax (Vmp)	17,3V	17,309V	<0,052%
Corriente a Pmax (Imp)	4,34A	4,333A	<0,161%
Corriente de cortocircuito (Isc)	4,67A	4,6698A	<0,00004%
Voltaje a circuito abierto (Voc)	21,6V	21,94V	<1,6%

La Tabla I muestra los valores certificados por el fabricante, las cifras obtenidas en PSpice y la diferencia porcentual de cada valor. Como puede observarse, el máximo error porcentual es menor de 1,6% y la mayoría de las diferencias porcentuales están por debajo de 0,1%, con lo que queda demostrada la validez del modelo desarrollado, lo que permite utilizarlo para representar circuitos con paneles solares.

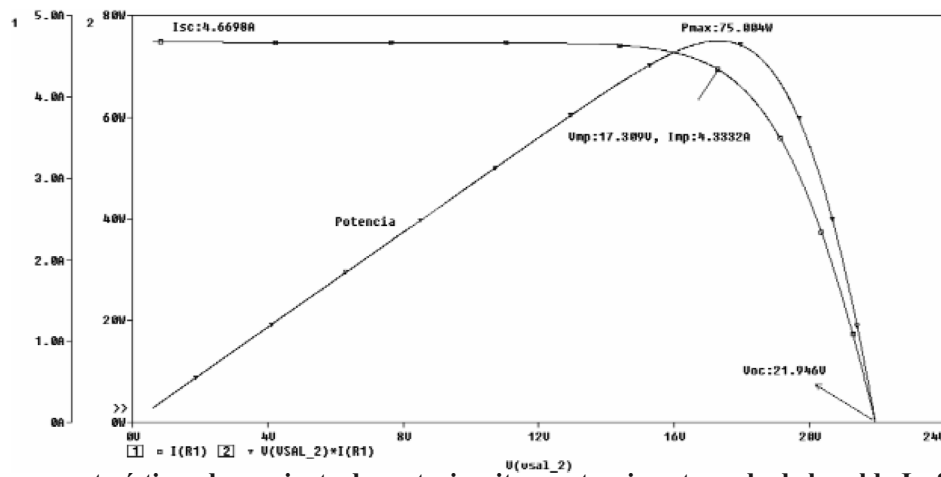


Fig. 3. Curvas características de corriente de cortocircuito y potencia entregada de la celda Isotón I-75S-12.

Se ha escogido otro panel comercial para realizar una validación adicional del modelo. Se trata de la celda solar BPSX170 desarrollada por la empresa BPsolar [8]. Los parámetros suministrados por el fabricante son: el voltaje a circuito abierto: 44,2V, la corriente de cortocircuito: 5A, la potencia máxima: 170W \pm 10%, la corriente a la máxima potencia: 4,8A y el voltaje al valor de máxima potencia: 35,4V. Se ha ajustado el K_{factor} a 0,917 y se ha considerado un arreglo de 68 celdas en serie. Usando los cursores de corriente (I) y de potencia (W) del programa se obtuvieron las curvas características mostradas en la Fig. 4.

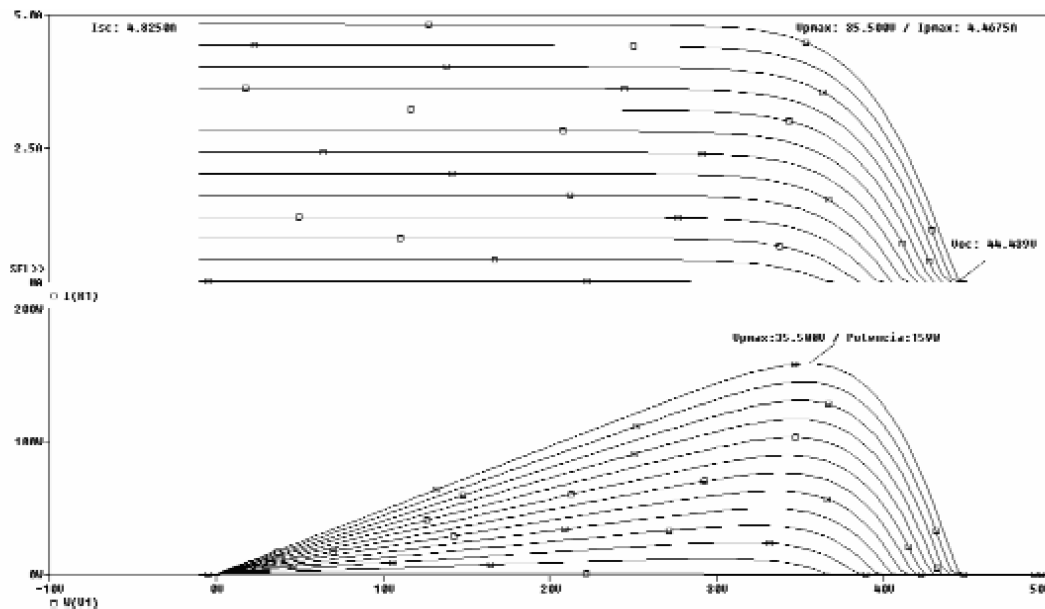


Fig. 4. Curvas características de corriente y potencia para la celda BPSX170.

La Tabla II agrupa los datos especificados por el fabricante y los obtenidos en la simulación. Se observa que se ha incrementado el margen de error respecto al ensayo anterior. La diferencia obtenida se debe a las siguientes razones: 1) A mayor voltaje de operación, el diodo paralelo de la celda aumenta la corriente de conducción, lo que afecta la corriente disponible en la salida de la celda, 2) La caída de voltaje en conducción del diodo serie, y 3) La asignación aleatoria de los valores de las resistencias internas de la celda. Para lograr mejorar la precisión del modelo, se recomienda mejorar la

característica de voltaje – corriente de los diodos D23 y D25, ajustando el parámetro AREA y otros valores del modelo, para reducir las pérdidas internas. En todo caso el error porcentual es siempre menor del 10%, valor usual para la tolerancia de los componentes de los circuitos electrónicos comerciales. A consecuencia de esto, y a pesar de las diferencias encontradas, se han obtenido resultados satisfactorios cuando el modelo desarrollado se ha utilizado para comprobar mediante pruebas de simulación y ensayos experimentales un algoritmo para la obtención de la máxima potencia en paneles solares [9].

Tabla II Datos de fabricante y resultados de la simulación de la celda solar BPSX170

Característica eléctrica	Datos nominales	Resultados de la simulación	Diferencia
Potencia máxima (Pmax)	170+/-10% W	159W	<6,47% sin considerar el valor porcentual
Voltaje a Pmax (Vmp)	35,4V	35,500V	<0,282%
Corriente a Pmax (Imp)	4,8A	4,4675A	<6,92%
Corriente de cortocircuito (Isc)	5A	4,825A	<3,5%
Voltaje a circuito abierto (Voc)	44,2V	44,439V	<0,54%

III. CONCLUSIONES

1. El modelo desarrollado permite graficar satisfactoriamente las curvas características de paneles fotovoltaicos comerciales.
2. El circuito requiere de pocos parámetros de entrada para evaluar el desempeño de circuitos simples y complejos de celdas solares.
3. Variando el parámetro Kfactor, se consigue con precisión el voltaje a circuito abierto del panel solar.
4. De ser necesario, se puede mejorar la respuesta del modelo ajustando los parámetros de los diodos internos, con el fin de reducir las pérdidas de conducción.

IV. REFERENCIAS

1. Gimeno, S., et al. "Convertidores electrónicos: energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño". Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, 2002, pp.25-30.
2. Jaboori, M. G., Saied, M. M. and Hanafy, A. A. "A contribution to the simulation and design optimization of photovoltaic systems". IEEE Transactions on energy conversion, vol.6, no.2, September 1991, pp. 401-406.
3. Gow, J. A. and Manning, C. D. "Development of a model for photovoltaic arrays suitable for use in simulation studies of solar energy conversion systems". Proceedings of the 6th International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. Nottingham University, London, September 1996, pp. 6.
4. Takigawa, K. and Kobayashi, H. "A Development of high accuracy and wide range modular PV array simulator". Proceedings of the 9th international PVSEC. Miyazaki, Japan, September 1996, pp. 8.
5. Gow, J. A. and Manning, C. D. "Development of photovoltaic array model for use in power electronics studies". IEE Proceedings on electric power applications, vol.146, no.2, March 1999, pp. 193-200.
6. Tatakis, E. "Modelling power diodes for power electronics circuits simulation with SPICE2". EPE Journal, vol.2, no.4, December 1992, pp.259-268.
7. Panel fotovoltaico I-75S/12 (Junio2006). Disponible en www.isofoton.com.
8. BPSX170 BP solar panel (2006). Disponible en www.bpsolar.com.
9. Fernández, H., "Contribución al diseño de células de generación mixtas fotovoltaica y eólica para emplazamientos aislados". Tesis de doctorado Universidad de Zaragoza, septiembre, 2007, pp.83-89.