

Maximizando la potencia en celdas solares: Un enfoque pedagógico

Jesús González-Llorente

Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia, jesusd.gonzalez@correo.usa.edu.co

John Farah

OptiCOMP, Inc, Cambridge, USA, johnfarah@hotmail.com

RESUMEN

El problema de maximizar la potencia obtenida de las celdas fotovoltaicas representa una oportunidad para el desarrollo de proyectos de aula y de semilleros de investigación en los programas de ingeniería. Este artículo describe las características eléctricas de las celdas fotovoltaicas según modelos matemáticos, los cuales usan información accesible desde la hoja de datos del fabricante. Además se usan aproximaciones del comportamiento de la celda solar a casos ideales para facilitar su entendimiento mediante el uso de las curvas corriente-voltaje y potencia-voltaje de las celdas solares, las cuales son aproximadas por líneas rectas para ilustrar el concepto sin pérdida de generalidad. Se explica el problema de obtener la potencia eléctrica máxima a partir de la energía solar cuando la resistencia de la carga es diferente a la resistencia óptima. La solución a este problema se basa en el acople de la carga a la fuente, para obtener la máxima transferencia de potencia, mediante el uso de transformadores de corriente continua. Tanto el problema como su solución son tratados desde un enfoque pedagógico mediante el uso de gráficas y modelos simples, de manera que se motive a los estudiantes de ingeniería a desarrollar proyectos en sistemas solares fotovoltaicos.

Palabras claves: celdas solares, energía fotovoltaica, máxima potencia, investigación, educación en ingeniería

ABSTRACT

The problem of maximizing the power output of photovoltaic cells is an opportunity to develop classroom projects and research in engineering programs. This article describes the electrical characteristics of photovoltaic cells based on mathematical models and datasheet information. In addition, the solar cells behavior is approximated to ideal I-V and PV curves using straight lines for better insight. It also explains the problem of obtaining maximum electrical power from solar panel, by using both current-voltage and power-voltage curves; the solution is based on load matching by using power converters as transformers when the load resistance is different to the optimal resistance. Both the problem and the solution are presented using a pedagogical approach, in such way that undergraduate engineering student are encouraged to develop project in photovoltaic systems.

Keywords: solar cells, photovoltaic energy, maximum power point, undergraduate research, engineering education

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar ha ganado interés en los últimos años debido a que es un tipo de energía ampliamente disponible, sin emisiones y renovable; por lo que tiene diversos campos de aplicación como: sistemas residenciales, vehiculares, aeroespaciales, y navales (Khaligh & Onar, 2009). Una forma de obtener la energía solar es por medio de las celdas fotovoltaicas, las cuales convierten la luz solar en electricidad directamente (Ropp, 2007). Dado que es importante aprovechar al máximo la energía solar, especialmente en picosatélites de tipo CubeSats

que son de tamaño restringido (i.e. 10cm x 10cm x 10cm), el número de investigaciones en métodos de obtención de la máxima potencia de las celdas solares se ha incrementado últimamente.

Las celdas fotovoltaicas operan sobre un rango de voltajes y corriente. El voltaje varía desde cero hasta el voltaje de circuito abierto; mientras que la corriente varía desde la corriente de corto circuito hasta cero; por lo tanto, la curva corriente vs. voltaje de las celdas fotovoltaicas pueden obtenerse variando la resistencia que alimentan desde cero hasta infinito (Khaligh & Onar, 2009). Esta variación del voltaje y de la corriente de la celda solar conlleva a variaciones de la potencia entregada, y para lograr la máxima potencia se requiere de interfaces que adapten la carga vista por el panel.

Modelos que describen el comportamiento de las celdas fotovoltaicas, así como también el análisis y la simulación de circuitos con fuentes de energía renovable, han sido usados como estrategia para incentivar a los estudiantes de pregrado a participar en investigaciones (Ortiz-Rivera, Gonzalez-Llorente, & Salazar-Llinas, 2009). Ortiz-Rivera afirma que usar modelos que describen el comportamiento de las celdas, los cuales son más fáciles de entender y de usar que modelos basados en los principios físicos ha atraído el interés de los estudiantes hacia el campo de las energías renovables (Ortiz-Rivera et al., 2009).

Un incentivo adicional que atrae a los estudiantes hacia el desarrollo de proyectos con celdas fotovoltaicas es la oportunidad de trabajar en el desarrollo de un nanosatélite bajo el estándar CubeSat; ya que las celdas fotovoltaicas son la tecnología más usada para obtener energía en los satélites y recargar sus baterías (Patel, 2005). Por lo tanto, el desarrollo del sistema de energía para CubeSats requiere de un claro conocimiento de los modelos de las celdas fotovoltaicas y los retos que implica su uso. De manera que pueda continuarse con los desarrollos aeroespaciales iniciados en Colombia por la Universidad Sergio Arboleda, con el lanzamiento del pico-satélite Libertad 1 en el 2007 (USA, 2007)

En el presente artículo se realiza una descripción pedagógica del problema de obtener la potencia máxima en las celdas fotovoltaicas; de manera que se facilite la comprensión de los estudiantes de la temática y los retos que involucra el uso de fuentes renovables como los paneles fotovoltaicos. Así mismo, se presenta una aproximación a la solución de este problema, tratándolo gráficamente y mostrando la necesidad del uso de transformadores como acopladores de la carga.

2. MODELADO DE LAS CELDAS SOLARES

Una de las características más importantes de los elementos, para describir su comportamiento, es la relación entre el voltaje y la corriente entre sus terminales; esta relación es conocida como la relación corriente – voltaje, o simplemente la curva corriente – voltaje. Por ejemplo, la relación de corriente voltaje para un resistor está dada por la ley de Ohm: $V = R \cdot I$ y su curva corriente voltaje es mostrada en la Figura 1, donde también se muestra la relación corriente voltaje para una fuente de voltaje ideal y para una fuente de corriente ideal (Agarwal & Lang, 2005).

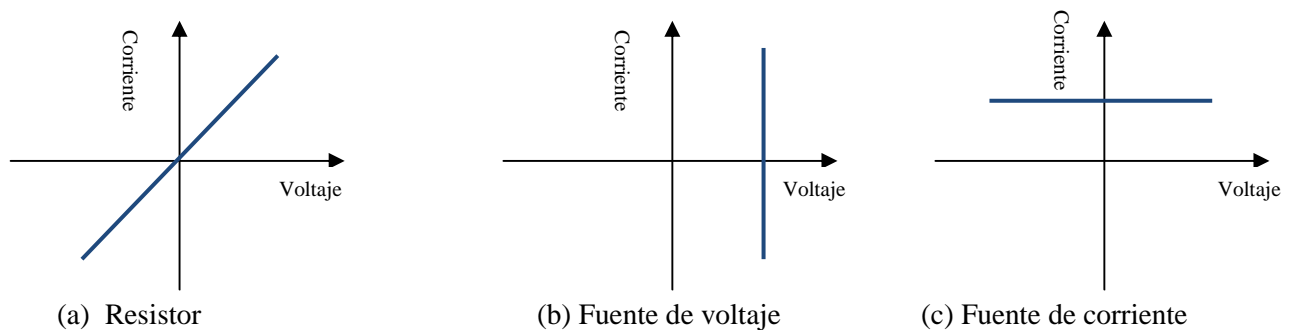


Figura 1: Característica corriente – voltaje elementos de circuitos.

Existen diferentes modelos para representar el comportamiento eléctrico de las celdas solares mediante la relación corriente - voltaje, muchos de ellos basados en la física y en parámetros que no son fácilmente conocidos (Villalva, Gazoli, & Filho, 2009). Otras aproximaciones son más prácticas, ya que describen el comportamiento basado en los datos obtenidos de la hoja de especificaciones del fabricante (Gil-Arias & Ortiz-Rivera, 2008).

La relación entre la corriente (I) y el voltaje (V) de la celda solar está dada por la ecuación:

$$I = \frac{I_x}{1 - \exp\left(-\frac{1}{b}\right)} \left[1 - \exp\left(\frac{V}{bV_x} - \frac{1}{b}\right) \right] \quad (1)$$

donde V_x es el voltaje de circuito abierto, I_x es la corriente de corto circuito del panel y la constante b es una constante característica del panel (Gil-Arias & Ortiz-Rivera, 2008). Dado que los modelos son abstracciones de los elementos, estos no son una representación exacta; es decir, tienen errores. Los modelos más complicados son más exactos; sin embargo, el incremento en la complejidad puede que no justifique el incremento en la exactitud (Agarwal & Lang, 2005). Con el propósito de fomentar el entendimiento más que la exactitud se puede aproximar la relación corriente - voltaje de las celdas por dos rectas.

La Figura 2 muestra la característica corriente - voltaje obtenida del modelo descrito anteriormente en la ecuación (1), mientras que la Figura 3 muestra la aproximación usando líneas rectas. Las características ilustradas en la figuras 2 y 3 corresponden a un panel solar para un CubeSat de una unidad (1U), cuyos parámetros son listados en la hoja de especificaciones (Clyde-Space, 2011). Es importante aclarar que esta curva corresponde a la irradiación y temperatura de pruebas (1353W/m^2 y 28°C respectivamente), ya los puntos extremos de la curva son ampliamente afectados por estas dos variables. Como se observa en la Figura 3, hasta el punto V_{mpp} , la celda se comporta como una fuente de corriente ideal, mientras que entre V_{mpp} y V_x como una fuente de voltaje.

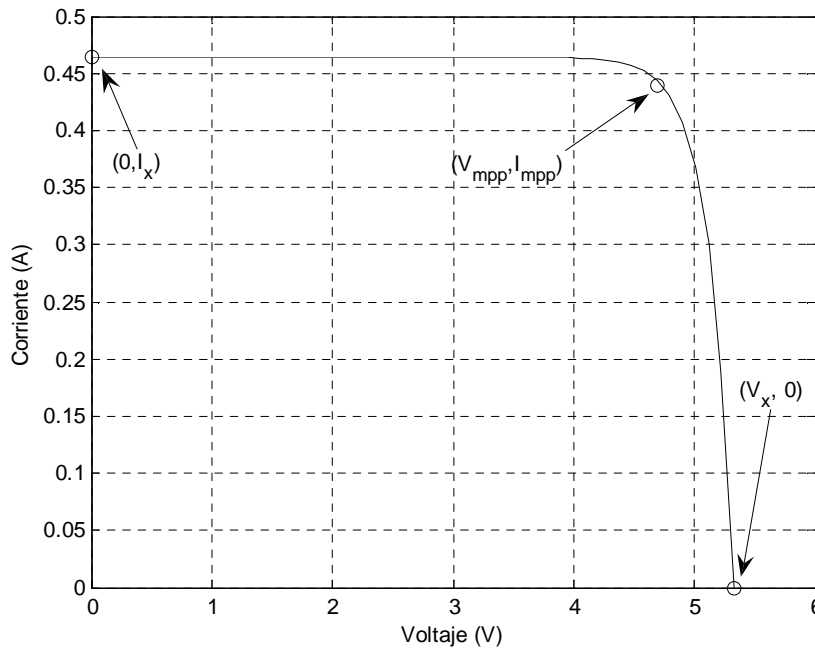


Figura 2: Característica corriente – voltaje de las celdas solares.

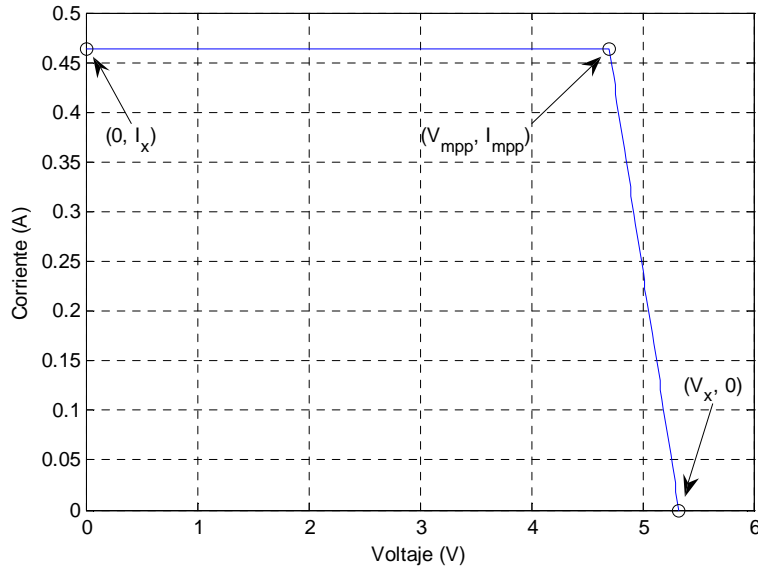
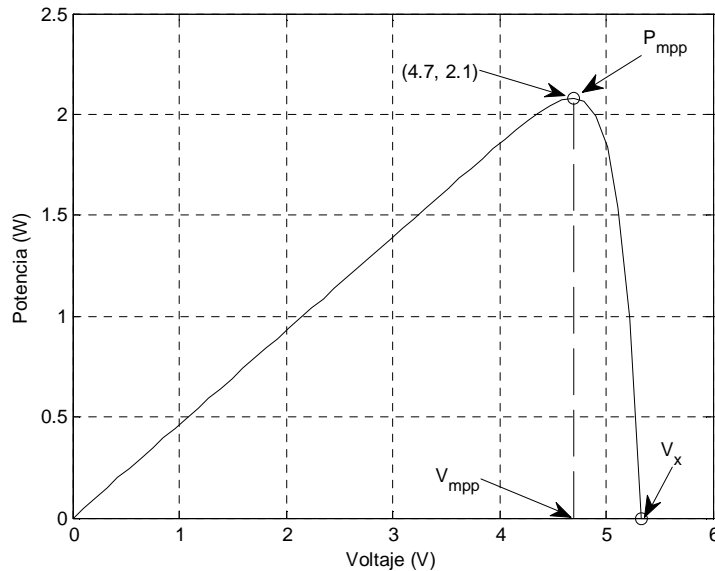


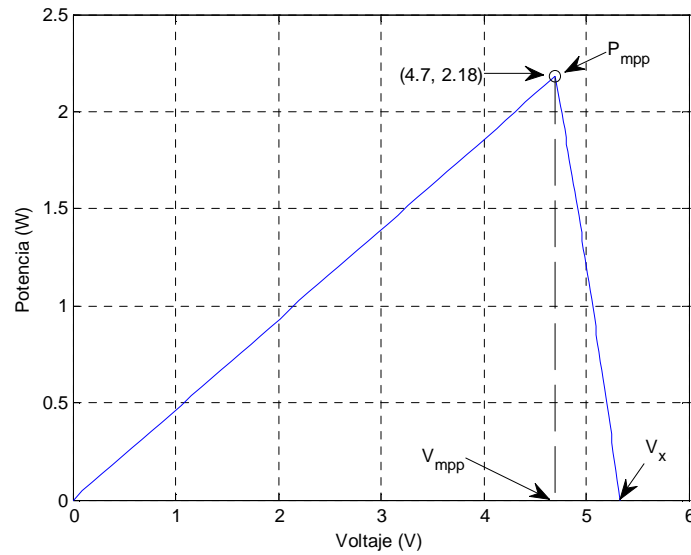
Figura 3. Aproximación de la relación corriente – voltaje del panel mediante rectas

3. PROBLEMA DE LA OBTENCIÓN DE LA MÁXIMA POTENCIA EN CELDAS SOLARES

La potencia suministrada por las celdas fotovoltaicas corresponde al producto de la corriente de la celda (I) y el voltaje (V); el cual es mostrado en la Figura 4. Se observa que existe un único valor de voltaje donde la potencia es máxima; y según la curva corriente - voltaje mostrada en la sección anterior, existe una corriente correspondiente a dicho voltaje. Estos valores de corriente y voltaje se conocen como el punto de máxima potencia. La Figura 4(a) muestra la potencia según el modelo de (Gil-Arias & Ortiz-Rivera, 2008); mientras que la Figura 4(b) muestra la potencia basado en la aproximación de líneas rectas.



(a) Según modelo de ecuación (1)



(b) Aproximación

Figura 4: Variación de la potencia de las celdas según el voltaje de operación.

El punto máximo se puede determinar usando los conceptos de máximos y mínimos del cálculo diferencial, para esto determinamos la expresión de la potencia en la aproximación de líneas rectas:

$$P(V) = \begin{cases} I_{mpp}V & \text{para } V \leq V_{mpp} \\ \frac{I_{mpp}(V_x - V)V}{V_x - V_{mpp}} & \text{para } V \geq V_{mpp} \end{cases} \quad (2)$$

Tomando la derivada de la potencia con respecto al voltaje según la ecuación (2), se tiene

$$\frac{dP(V)}{dV} = \begin{cases} I_{mpp} & \text{para } V \leq V_{mpp} \\ \frac{I_{mpp}(V_x - 2V)}{V_x - V_{mpp}} & \text{para } V \geq V_{mpp} \end{cases} \quad (3)$$

Para $V \leq V_{mpp}$ la derivada es I_{mpp} , que representa la pendiente, y dado que es un valor positivo la función es creciente en todo el intervalo, por lo tanto el máximo es el valor final del intervalo, este V_{mpp} . Para el intervalo $V \geq V_{mpp}$, la derivada es negativa si $V_x < 2V$ o $V_x < 2V_{mpp}$, por lo tanto la función es decreciente en el intervalo y el valor máximo esta dado por el valor inicial, este es V_{mpp} . Por lo tanto V_{mpp} corresponde al punto de máxima potencia.

Cuando una carga resistiva es conectada directamente a las celdas solares, el punto de operación de las celdas corresponde al voltaje y a la corriente que la carga exige, el cual está dado por la ley de Ohm; es decir, el punto de operación de las celdas solares corresponde a la intersección de las curvas corriente - voltaje de la celda fotovoltaica y de la carga como se muestra en la Figura 5.

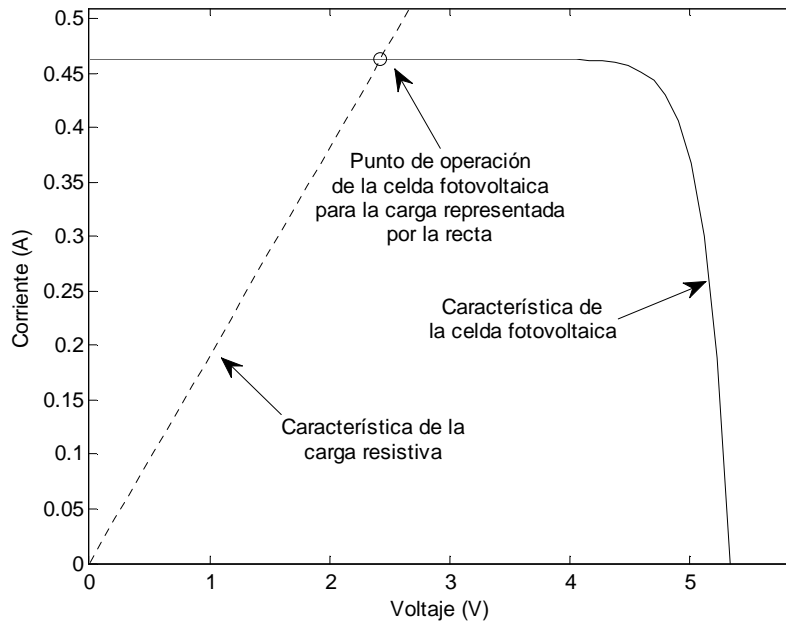


Figura 5: Descripción del punto de operación de la celda para una carga resistiva

Dado que la potencia está dada por el producto del voltaje y su corriente correspondiente, se puede mostrar la potencia gráficamente como el área del rectángulo cuya diagonal va desde el origen de la gráfica (punto 0,0) al punto de operación, como se muestra en la Figura 6. Por tanto el punto de máxima potencia corresponde al rectángulo de mayor área, este punto está en la región de curvatura como se muestra en la Figura 6, donde I_{mpp} y V_{mpp} son la corriente y el voltaje de máxima potencia.

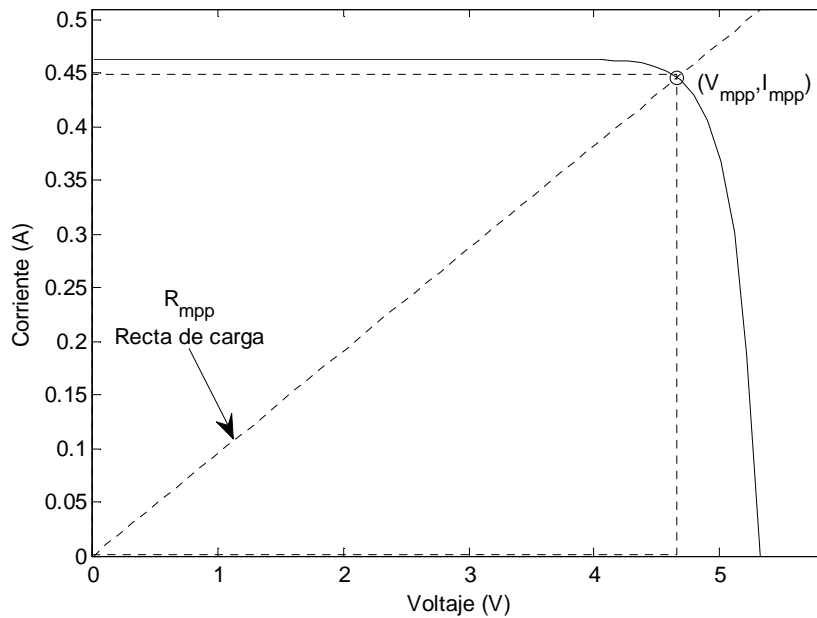


Figura 6: Punto de máxima potencia de la celda solar y rectángulo de potencia

Debido a que el punto de operación está dado por la carga conectada a la celda fotovoltaica, existe una única carga que asegura el punto de operación en el punto de máxima potencia, donde la potencia es P_{mpp} ; esta resistencia se conoce como la resistencia de máxima potencia (R_{mpp}). Si la resistencia de la carga conectada a la celda no coincide con R_{mpp} , el panel solo suministrará la potencia exigida y no la potencia máxima que podría suministrar; por lo tanto si se quiere extraer la máxima potencia de un panel fotovoltaico, se debe asegurar que siempre sea cargado por una resistencia R_{mpp} ; esto es descrito en la siguiente sección.

En aplicaciones prácticas, diferentes métodos para determinar el punto de máxima potencia han sido implementados, los cuales varían en número de sensores requeridos, velocidad de convergencia, efectividad y complejidad de implementación, una comparación de las diferentes técnicas puede ser encontrada en (Esrám & Chapman, 2007). Entre las técnicas más populares está el método de fracción de voltaje de circuito abierto; sin embargo es dependiente de las características de la celda fotovoltaica; por su parte el método de perturbación y observación, el cual es un método de búsqueda que no depende de los parámetros de la celda solar, ha sido ampliamente usado por su bajo costo de implementación (Femia, Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, 2005).

4. UNA APROXIMACIÓN A LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE POTENCIA MÁXIMA EN CELDAS SOLARES

Si se conoce la potencia máxima, entonces la corriente requerida para suministrar dicha potencia en función del voltaje está dada por la ecuación:

$$I = \frac{P_{mpp}}{V} \quad (4)$$

La carga consume la potencia máxima (P_{mpp}), cuando se alimenta con el voltaje y la corriente dada por la intersección de la recta de carga con la ecuación (4), como se muestra en la Figura 7. En esta figura también se muestra que la carga consume la potencia P_{mpp} a un voltaje y una corriente diferente del punto de máxima potencia de la celda, lo que implica una transformación del voltaje suministrado por el panel, al voltaje requerido por la carga para consumir la potencia máxima.

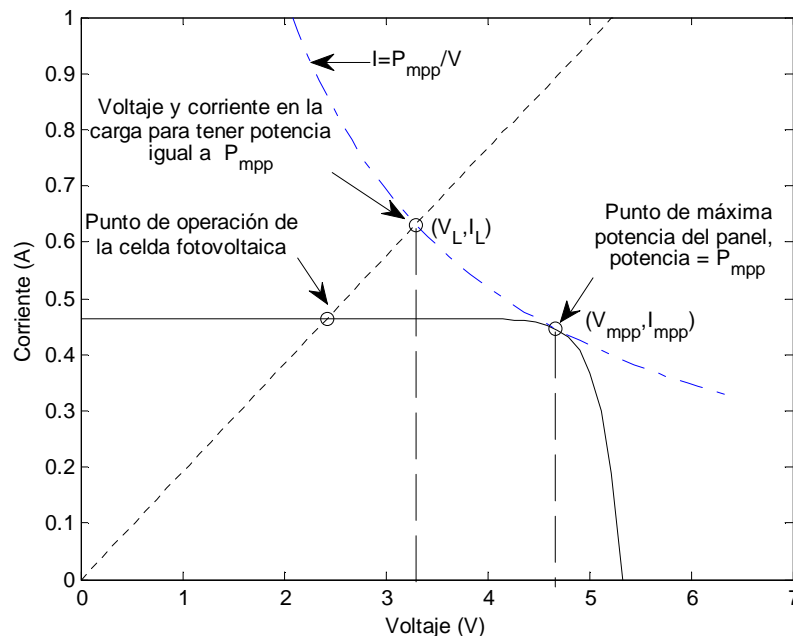


Figura 7: Traslación del punto de máxima potencia de la celda solar a la carga, caso reductor.

Dado que se requiere transformar el voltaje y la corriente del punto de potencia máxima (V_{mpp} e I_{mpp} respectivamente) de manera que dicha potencia se suministre a la carga, es necesario usar una interface entre la celda fotovoltaica y la carga, la cual es responsable de aumentar o disminuir el voltaje. Además, esta interface no debe consumir potencia; solo debe cambiar los niveles de voltaje y corriente de manera que toda la potencia de la celda fotovoltaica sea entregada a la carga.

Se ha mostrado que si la resistencia conectada a la carga es diferente de la resistencia R_{mpp} , se requiere transformar el voltaje para entregar la potencia máxima. Para determinar si es necesario aumentar o disminuir el voltaje entregado se consideran dos casos: primero, si la resistencia es menor que R_{mpp} y segundo si la resistencia de la carga es mayor que R_{mpp} .

El primer caso es mostrado en la Figura 7. Si el panel opera en su punto de potencia máxima, esta potencia corresponde al punto (V_L, I_L) en la recta de la carga. Es decir que se debe reducir el voltaje V_{mpp} al voltaje V_L , lo cual aumenta la corriente de I_{mpp} a la corriente I_L ; manteniendo que $V_{mpp} \cdot I_{mpp} = V_L \cdot I_L$. Por lo tanto, si la resistencia de la carga es menor que R_{mpp} se requiere un transformado reductor.

El segundo caso es mostrado en la Figura 8; donde se muestra que para una resistencia mayor que R_{mpp} la potencia en la carga corresponde a un voltaje mayor que V_{mpp} ; esto es, se requiere aumentar el voltaje de V_{mpp} a V_L , de manera que $V_{mpp} \cdot I_{mpp}$ sea igual a $V_L \cdot I_L$. Por lo tanto, si la resistencia de la carga es mayor que la resistencia R_{mpp} , la interfaz debe actuar como un transformador elevador.

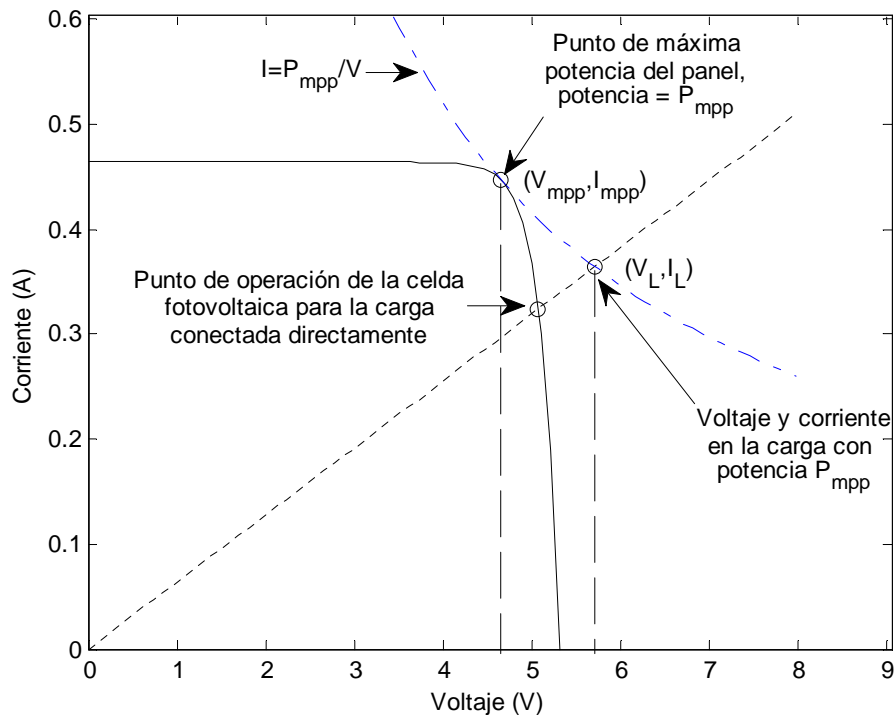


Figura 8: Traslación del punto de máxima potencia de la celda solar a la carga, caso elevador.

Para verifica estos dos casos se deriva la relación de transformación del transformador. Dado que el panel opera en el punto de máxima potencia, la resistencia vista por él o resistencia de entrada del transformador está dada por

$$R_{mpp} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (5)$$

Considerando que el transformador tiene una eficiencia del 100%, entonces la potencia en la carga es igual a la máxima potencia del panel, esto es:

$$\frac{V_L^2}{R_L} = V_{mpp}I_{mpp} \quad (6)$$

De donde se puede derivar la relación V_L/V_{mpp} , y expresarla en términos de R_{mpp} al sustituir la ecuación (5), entonces la relación de transformación está dada por:

$$\frac{V_L}{V_{mpp}} = \sqrt{\frac{R_L}{R_{mpp}}} \quad (7)$$

A partir de la relación de transformación dada por la ecuación (7), se puede deducir que si R_L es menor que R_{mpp} entonces la relación de transformación V_L/V_{mpp} es menor que 1 y por lo tanto el transformador debe reducir el voltaje. Por el contrario si R_L es mayor que R_{mpp} , la relación de transformación de voltaje es mayor que 1 y el transformador debe actuar como elevador

Los transformadores de voltaje requeridos para extraer la máxima potencia de las celdas solares son implementados con convertidores de voltaje de corriente continua; una descripción de la teoría de estos convertidores está más allá del alcance de este documento, la cual puede ser consultada en (Kazimierczuk, 2008), mientras que su estudio como interfaces para celdas solares es descrito en (Xiao, Ozog, & Dunford, 2007).

5. CONCLUSIONES

Este artículo describió un modelo de las celdas fotovoltaicas basado en su comportamiento eléctrico, el cual ha sido usado para el análisis y simulación de circuitos; además se presentó una aproximación basado en líneas rectas como una forma de facilitar el entendimiento. Este modelo fue usado para derivar tanto las curvas corriente – voltaje como potencia – voltaje de un panel solar usado en un CubeSat de una unidad. El modelo se basó únicamente en las características de la hoja de datos del fabricante.

Se mostró mediante diagramas los diferentes puntos de operación de las celdas solares según la carga que alimentan. Se presentaron los tres casos: primero cuando la resistencia de la carga es igual a la resistencia óptima de la celda fotovoltaica, en este caso la celda suministra la máxima potencia; los otros dos casos fueron cuando la resistencia de carga es mayor y cuando es menor que la resistencia óptima. En estos dos últimos casos se mostró la necesidad de aumentar o disminuir el voltaje para obtener la máxima potencia en la carga.

El uso de modelos o aproximaciones a los sistemas físicos es clave para el entendimiento del comportamiento de los elementos. En este trabajo se mostró que la aproximación por líneas rectas de las características corriente voltaje de las celdas solares permite analizar su comportamiento por regiones sin pérdida de generalidad.

REFERENCIAS

- Agarwal, A., & Lang, J. (2005). *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits* (1st Editio.). San Francisco, Ca. USA.: Morgan Kaufmann.
- Clyde-Space. (2011). Cubesat Solar Panel 1U. Glasgow, Scotland. Retrieved from <http://www.clyde-space.com/documents/2410>
- Esram, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439-449. doi:10.1109/TEC.2006.874230
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2005). Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), 963-973.
- Gil-Arias, O., & Ortiz-Rivera, E. I. (2008). A general purpose tool for simulating the behavior of PV solar cells, modules and arrays. *2008 11th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics* (pp. 1-5). IEEE. doi:10.1109/COMPEL.2008.4634686
- Kazimierczuk, M. (2008). *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters* (First Editio.). John Wiley & Sons.
- Khaligh, A., & Onar, O. (2009). *Energy Harvesting Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems* (First Editio.). CRC Press.
- Ortiz-Rivera, E. I., Gonzalez-Llorente, J., & Salazar-Llinas, A. (2009). Bringing renewable energy to the electrical engineering undergraduate education and research at UPRM. *2009 39th IEEE Frontiers in Education Conference* (pp. 1-6). IEEE. doi:10.1109/FIE.2009.5350778
- Patel, M. (2005). *Spacecraft Power System* (1st Editio.). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.
- Ropp, M. (2007). Photovoltaic Systems. In S. Anwar & B. Capehart (Eds.), *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology* (1st Editio., pp. 1147-1667). CRC Press.
- USA. (2007). CubeSat - Proyecto espacial Colombia en Órbita. Retrieved February 28, 2012, from http://www.usergioarboleda.edu.co/proyecto_especial/index.htm
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198-1208. doi:10.1109/TPEL.2009.2013862
- Xiao, W., Ozog, N., & Dunford, W. G. (2007). Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(3), 1696-1704. doi:10.1109/TIE.2007.894732

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito