

Estudio de las características de una celda fotovoltaica para el uso eficiente de la energía solar

Solar cell characteristics study for solar energy efficient use

Eduardo Huerta Mascotte*, Ruth Ivonne Mata Chávez*, Julián Moisés Estudillo-Ayala**, Juan Manuel Sierra Hernández*, Igor Guryev*, Rocío Alfonsina Lizárraga Morales*

RESUMEN

Las celdas solares son interesantes por generar electricidad con energía solar. Sin embargo, esta tecnología está limitada, y se requiere investigación continua de materiales y sus características ópticas para su uso eficiente. En este trabajo se estudia una celda fotovoltaica como un diodo ideal en paralelo con un generador de corriente I_{sc} . La corriente de corto circuito queda en función del número de pares electrón-hueco generados por la absorción de la luz solar. El estudio parte de una plataforma teórica de donde se resalta la importancia de dos parámetros ópticos: la irradiancia y las características espectrales de la luz, donde las propiedades ópticas de los materiales de las celdas solares son importantes. Las ecuaciones básicas se utilizan para determinar las características eléctricas de salida de dichas celdas, y se realizan mediciones para corroborar el comportamiento y determinar el uso eficiente de la energía solar.

ABSTRACT

Solar cells are interesting devices due to the generation of electricity via solar energy. However, this technology is limited and requires further investigation on materials optical characteristics for their efficient use. In this work a photovoltaic cell is studied as an ideal diode in parallel with a current generator, I_{sc} . The short circuit current is in function of the electron-hole pair generated by the absorption of solar light. The study starts from theory where the importance of two optical parameters as irradiance and spectral characteristics of light, where the optical properties of solar cells materials are important. Basic equations are used to determine the electrical output of such cells and measurements to check its behavior and determine its efficient use of solar energy.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, el agotamiento del petróleo y su consecuente alza de precio, así como diversos factores ambientales originados por contaminación y devastación humana en el mundo, están en la actualidad motivando a ciertas organizaciones y a la industria de la energía para desarrollar tecnologías de energía verde amigable para su aplicación tanto en el mercado comercial como el residencial. Una de estas tecnologías fue inventada en 1894 por Charles Fritts, y es conocida como *celdas fotovoltaicas* (Nelson, 2003). Las celdas solares convierten la luz solar en energía eléctrica, la cual puede abastecer a la red eléctrica, disminuyendo precios y contaminación. De corte ecológico, la primera celda fotovoltaica creada por Fritts tenía una eficiencia energética del 1%. Sin embargo, las celdas solares mono-unión tienen eficiencias de hasta el 23% (Turner & Doty, 2007). Las nuevas tecnologías fotovoltaicas han demostrado una mejora en la eficiencia del uso de la energía. Estas nuevas tecnologías se basan en celdas multi-unión, dispositivos de desplazamiento de frecuencia y sistemas de concentración fotovoltaica (CPV, por sus siglas en inglés), pero aún estas tecnologías son costosas tanto

Recibido: 1 de julio de 2015

Aceptado: 29 de enero de 2016

Palabras clave:

Fotovoltaico; celdas solares; óptica.

Keywords:

Photovoltaics; solar cells; optics.

Cómo citar:

Huerta Mascotte, E., Mata Chávez, R. I., Estudillo-Ayala, J. M., Sierra Hernández, J. M., Guryev, I., & Lizárraga Morales, R. A. (2016). Estudio de las características de una celda fotovoltaica para el uso eficiente de la energía solar. *Acta Universitaria*, 26(NE-1), 30-34. doi: 10.15174/au.2016.868

* Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Av. Universidad s/n, Col. Yacatitas, Yuriria, Gto. Tel.: (445) 4589040, ext. 1750. Correos electrónicos: eduardoh9@hotmail.com; ruth@ugto.mx; jm.sierrahernandez@ugto.mx; guryev@ugto.mx; ra.lizarragamorales@ugto.mx

** Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5 + 1.8, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., México, C.P. 36885. Tel.: (464) 6479940. Correo electrónico: julian@ugto.mx

para comprarse como para su mantenimiento, por lo cual no han sido utilizadas a gran escala (Yang, Yuan, Lee & Yin, 2012). La investigación básica sobre celdas fotovoltaicas se sigue haciendo de forma continua con el fin de aumentar su eficiencia por diversos grupos en el mundo. Para este propósito se deben conocer las características ópticas básicas de los materiales a utilizar, así como las ecuaciones básicas que rigen el comportamiento elemental de una celda solar fotovoltaica, las cuales son la estructura medular que describen los temas importantes de este trabajo y que pueden coadyuvar al desarrollo de tecnologías innovadoras como trabajo a futuro.

Principios básicos de celdas solares fotovoltaicas

Un material o dispositivo tiene características fotovoltaicas cuando al exponerse a la luz, la que se absorbe por el material, es capaz de transformar la energía de los fotones en energía eléctrica, con la cual se obtiene una corriente y un voltaje (Bube, 1998). La naturaleza espectral de la luz es importante para el diseño de este tipo de dispositivos. En una aproximación ideal, se considera que el sol es un emisor perfecto de radiación o cuerpo negro a una temperatura cercana a los 5800 °K. La constante solar medida fuera de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos a una distancia de 1 UA del sol es en promedio 1366.1 W/m², y también se conoce como espectro Air Mass 0 (AM0) (American Society for Testing & Materials [ASTM] E-490 2000). Cuando la radiación pasa a través de la atmósfera de la tierra, ésta sufre cierta atenuación debido a los diversos procesos que se generan a su paso. Dichos procesos se conocen como *dispersión Rayleigh* y *dispersión Mie*, además de la absorción por selección en longitud de onda por gases y el vapor de agua. Estos procesos provocan la descomposición de la luz, y aunado a la longitud de camino que recorre la luz por la atmósfera se puede determinar la potencia total. El espectro AM1.5 estandarizado a una potencia global es el que se usa como patrón para la medición de las características eléctricas de las celdas solares para aplicaciones terrestres, y se divide en AM1.5G, el cual es importante en mediciones de paneles fotovoltaicos planos, ya que consta de radiación directa y difusa con una densidad de potencia integrada de 1 KW/m² y el AM1.5D, aplicado para concentradores fotovoltaicos, pues consiste en radiación directa del sol y tiene una densidad de potencia integrada de 900 W/m². La figura 1 muestra los espectros mencionados anteriormente.

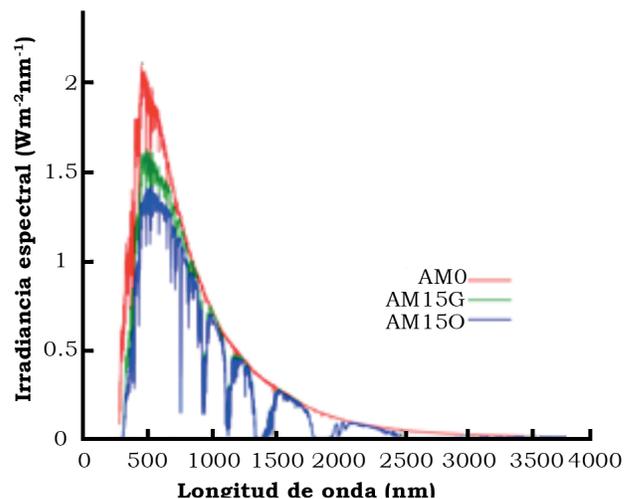


Figura 1. The AM0, AM1.5G and AM1.5D spectrums.

Fuente: ASTM E-490 2000.

Estos espectros pueden utilizarse para determinar el número de fotones que pueden producir electrones en una celda solar.

La escala de longitud de onda en el espectro solar puede convertirse en energía de fotón, e , de la siguiente relación:

$$\text{Energía}_{\text{fotón}} \equiv e = \frac{hc}{\lambda} [\text{eV}]. \quad (1)$$

Para convertir la irradiancia solar, P , se utiliza la siguiente relación:

$$\frac{d\Gamma}{de} = \Gamma_e = \frac{d\Gamma}{d\lambda} \frac{d\lambda}{de} = \Gamma \lambda \frac{\lambda}{e} = \frac{P\lambda}{e} \frac{\lambda}{e}. \quad (2)$$

Donde e es la energía del fotón y Γ es la densidad de flujo del fotón. Esta relación es útil para establecer los límites de la fotocorriente de una celda solar.

Propiedades ópticas de los materiales de las celdas solares

Cuando se determina la *absorción* de la luz de una celda solar, el parámetro óptico conocido como *absorción* es el más útil cuando se evalúan materiales absorbedores potenciales para celdas solares, o cuando se optimiza un material absorbedor dado para una celda solar. La absorción cuántica es la fracción de la luz entrante a cierta energía fotónica, e , que es absorbida por el material para producir un estado excitado como un par electrón-hueco. Se mide y se calcula como una función

de la energía fotónica, conduciendo a $A(e)$ o de forma alternativa puede expresarse como una función de la longitud de onda fotónica, conduciendo a $A(\lambda)$. La absorción puede multiplicarse por el flujo de fotones entrante para determinar cuántos pares electrón-hueco pueden producirse. Multiplicando este resultado por la carga elemental, q , e integrando sobre el espectro solar conlleva al límite superior para cuanta corriente puede extraerse de un dispositivo hecho con el material absorbedor solar. La absorción puede medirse directamente o puede calcularse usando las propiedades ópticas básicas que son constantes para un material. No toda la absorción en un material de la celda solar crea pares electrón-hueco.

Las propiedades ópticas de un material también dependen en el índice de refracción complejo n_c , dada por la relación $n_c = n - ik$, en donde la parte imaginaria de n_c es el coeficiente de extinción k . La parte real de n_c es el índice de refracción n . El coeficiente de extinción se relaciona con el coeficiente de absorción por la relación siguiente ecuación:

$$A(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda}. \quad (3)$$

El coeficiente de absorción describe la disminución de la intensidad de la luz conforme un haz de luz se propaga por el material como en una celda solar. Si el número de fotones por unidad de tiempo por área es Γ , entonces el cambio en esta densidad de flujo fotónico como una función de la posición está dada por:

$$\frac{d\Gamma}{dx} = -A\Gamma. \quad (4)$$

Donde x es la posición en el material absorbente a lo largo del haz. En este caso, la reflexión se desprecia y sólo la luz que ha entrado el material que absorbe la luz se considera. Al integrar la ecuación anterior sólo se obtiene el número de fotones no absorbidos. Esto está dado por la siguiente expresión:

$$\Gamma = \Gamma_0 \exp(-At). \quad (5)$$

Donde t es el grosor del material y Γ_0 es el número de fotones que inicialmente entraron al material. La transmisión es la relación Γ/Γ_0 . Otro parámetro óptico importante para las celdas solares es la región prohibida óptica del material absorbedor de la celda solar. Ésta es la energía mínima necesaria para elevar un electrón al estado excitado, o nivel superior de energía, de manera que pueda ser conducido a través de la celda solar hacia la carga. El coeficiente de absorción puede utilizarse para establecer la banda prohibida, E_g , del material

absorbedor utilizado en la celda solar. La relación entre el coeficiente de absorción y la banda prohibida para materiales de banda prohibida directa es:

$$A(e) = C_d \sqrt{e - E_g}. \quad (6)$$

Donde $C_d \sim 2 \times 10^4$ si A está dada en cm^{-1} .

Ecuaciones de las celdas solares

La figura 2 muestra el funcionamiento básico de una celda solar, donde se observa la excitación de la luz, la separación de las cargas, la migración y colección de las mismas. La curva de corriente-voltaje de una celda solar es de suma importancia para su caracterización, representa las características eléctricas de salida que son el resultado de los procesos mostrados en dicha figura.

La característica I-V se describe por la siguiente ecuación:

$$I(V) = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{\gamma kT}\right) - 1 \right]. \quad (7)$$

El término γ es el factor de calidad del diodo o el factor ideal. Para un diodo perfecto $\gamma = 1$, pero en dispositivos típicos, su valor puede estar en un rango de 1 a 2; I_0 es la corriente de saturación en polarización inversa en la oscuridad. El lado derecho de esta ecuación se conoce como *ecuación del diodo*, la cual es usada para describir las características eléctricas de un rectificador. De la ecuación (7), y resolviendo para el voltaje en circuito abierto ($I = 0$), se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{oc} = \frac{\gamma kT}{q} \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right). \quad (8)$$

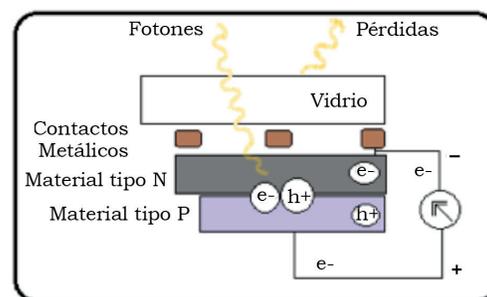


Figura 2. Vista lateral de una celda solar donde se muestran las diversas capas, los procesos de separación y transporte de carga y su recolección en los contactos externos.

Fuente: Elaboración propia.

El voltaje de circuito abierto está en función de las corrientes de luz y oscuridad, así como del factor de calidad del diodo. Otra forma de ver la celda solar es con el modelo eléctrico. La entrada de la energía solar se conoce como *generador de corriente* I_{sc} . La recombinación se muestra como un resistor *shunt* y un resistor en serie bloquea el paso de la corriente I a la carga externa por medio de los contactos. En este circuito, el voltaje se muestra con el término qV que dimensionalmente es igual a la energía por partícula, donde la unidad más conveniente para una celda solar es el eV/electrón. El término μ simboliza la energía libre de *Gibbs*, que en celdas solares representa la diferencia en los lados opuestos, entre la energía por electrón y la energía por hueco. Este potencial químico representa la máxima fuerza controladora que puede generarse en una celda solar sin pérdidas, como los resistores *shunt* y en serie. Este concepto tiene una relación con la luminiscencia y las propiedades ópticas de un convertidor solar cuántico (figura 3).

La ecuación I-V puede modificarse para incluir las pérdidas resistivas debido a las resistencias en serie y *shunt*, quedando de la siguiente manera (Pareja-Aparicio, Peligrí-Sebastiá, Segorb & Llarío, 2013):

$$I(V) = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV - IR_s}{\gamma kT}\right) - 1 \right] - \frac{V - IR_s}{R_{sh}}. \quad (9)$$

La resistencia en serie R_s se debe a la conductividad de los materiales y al grosor de las capas. La resistencia *shunt* R_{sh} se debe a los trayectos de corto circuito que permiten a los portadores de carga recombinarse antes de que puedan ser colectados en los contactos y forzados a realizar trabajo en un circuito externo.

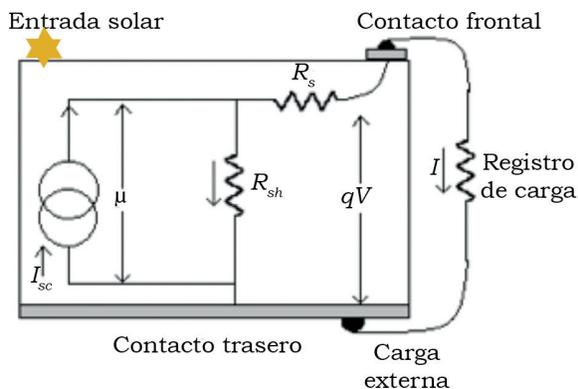


Figura 3. Circuito eléctrico para un convertidor eléctrico convencional. Fuente: Elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Mediciones

Para poder realizar mediciones se utilizó el siguiente diagrama básico para obtener las características I-V de una celda solar policristalina hasta un máximo de irradiación solar. Esto se realizó haciendo diversas mediciones a diferentes tiempos del día usando un circuito similar al de la figura 4.

Materiales

Los materiales para las mediciones consistieron de una celda fotovoltaica policristalina PS-683 Steren, un voltímetro, un amperímetro MUL-010 CE y un potenciómetro de hasta 2 K Ω (figura 5).

RESULTADOS

Inicialmente las medidas resultaron erráticas al dejar expuesta la celda solar y sin carga. Las pruebas, en este caso, se realizan a diferentes horas del día en el área exterior soleada del Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, localizado en Yuriria, Guanajuato, México. El máximo valor en voltaje a circuito abierto medido es $V_{oc} = 5.5V$ con una corriente máxima de 199 mA con luz solar directa a la celda policristalina. Usando el circuito de la figura 4 se obtuvo la gráfica I-V, la cual se muestra en la siguiente gráfica de la figura 6. En comparación con el modelo teórico, se observa que la parte de la curva de 0 V a 3 V, la corriente no es muy constante, aunque tiende a disminuir gradualmente, sin embargo muestra una pendiente $\Delta V/\Delta I$. Además, con la aplicación de la carga, se registra una disminución del voltaje y corriente, aunque también depende de la intensidad solar. En este caso, la corriente en corto circuito es de $I_{sh} \approx 35$ mA y el voltaje $V_{oc} \approx 3.4$ V en sombra (figura 7).

También se hicieron pruebas a plena luz solar y la gráfica coincide con otros estudios realizados, donde obtienen la curva I-V.

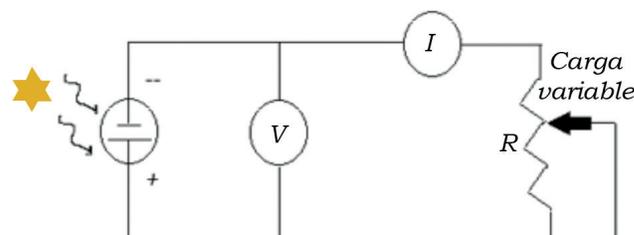


Figura 4. Configuración de carga variable para determinar la corriente y voltaje. Fuente: Elaboración propia.

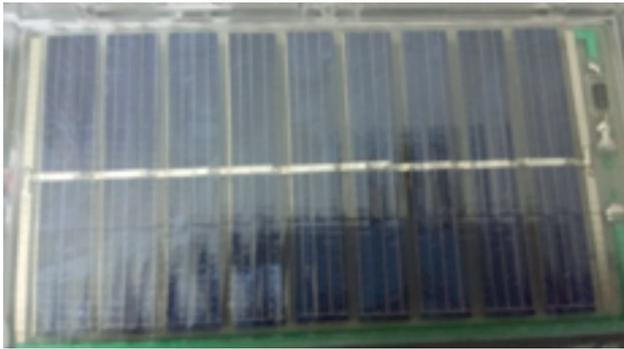


Figura 5. Celda solar policristalina.
Fuente: Elaboración propia.

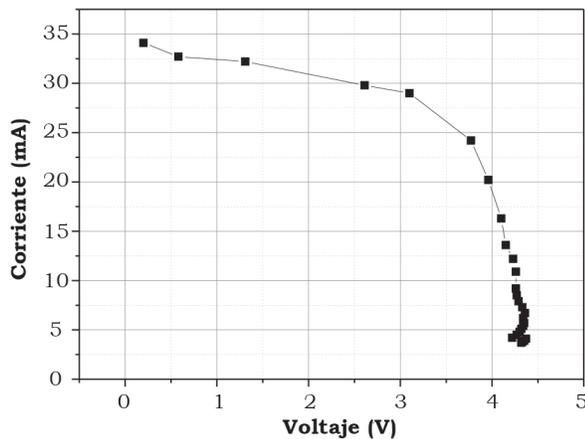


Figura 6. Resultados experimentales con carga variable con luz.
Fuente: Elaboración propia.

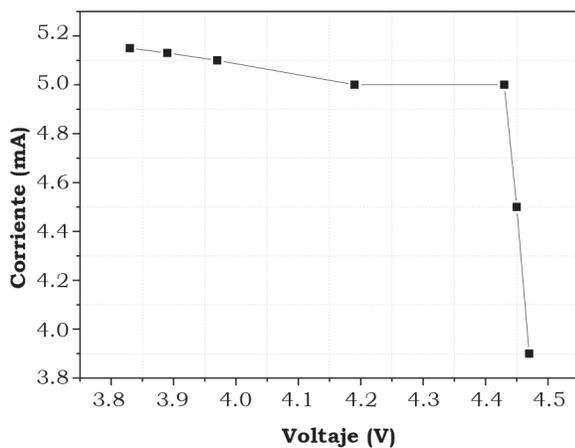


Figura 7. Resultados experimentales con carga variable con sombra.
Fuente: Elaboración propia.

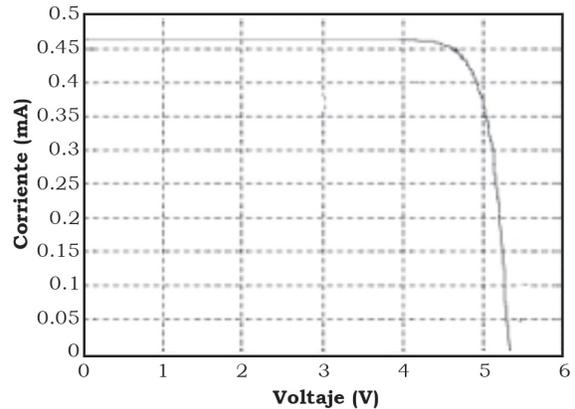


Figura 8. Resultados teóricos usando las ecuaciones 7 y 9.
Fuente: Elaboración propia.

Teóricamente se pueden utilizar las ecuaciones (7) y (9) para modelar el comportamiento ideal de las celdas solares, donde los resultados difieren por la diferencia de la carga (figura 8).

CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados de esta investigación preliminar, es necesario tomar en cuenta los efectos de una carga variable, la cual va a diferir con el modelo teórico hasta en un 20%. También se debe tener en cuenta la reflexión y la irradiación solar. En el modelo teórico se puede observar que hasta el punto del cambio de la curva, la celda se comporta como una fuente de corriente ideal, y del codo hasta cero se comporta como una fuente ideal de voltaje, lo que no sucede completamente con las pruebas experimentales.

REFERENCIAS

- ASTM E-490. 2000 American Society for Testing & Materials (ASTM) standard extraterrestrial solar spectrum reference E-490-00 (2000). Recuperado de <http://rredc.nrel.gov/solar/spectral/am0/>
- Bube, R. H. (1998). *Series on properties of semiconductor materials*. Photovoltaic materials. Imperial College Press.
- Nelson, J. (2003). *The physics of solar cells*. London: Imperial College Press.
- Pareja-Aparicio, M., Peligri-Sebastiá, J., Segorb, T., & Llario, V. (2013). Modeling of photovoltaic Cell using free software application for training and design circuit in Photovoltaic solar energy. InTech (Ed.), *New developments in renewable energy* (pp. 121-142). Recuperado de <http://dx.doi.org/10.5772/51925>
- Turner, W., & Doty, S. (2007). *Energy management Handbook* (6th Ed.). Lilburn: The Fairmont Press.
- Yang, D. J., Yuan, Z. F., Lee, P. H., & Yin, H. M. (2012). Simulation and experimental validation of heat transfer in a novel hybrid solar panel. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 55(4), 1076-1082. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.003