

# DETERMINACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR EN CIEGO DE ÁVILA Y MORÓN, PARA SU USO EN SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR

Determination Of The Solar Irradiance In Blind Of Ávila And Morón, For Use In Systems Of Use Of Solar Energy

Francisco García Reina<sup>1</sup>  
,Ing. Aday Tania Pérez Molina<sup>2</sup>  
Ing. Mairodys Veloz Ulacia<sup>3</sup>

## Resumen

Para el diseño, montaje y puesta a punto de sistemas fotovoltaicos de conversión de la energía solar en eléctrica, es necesario conocer las características volt - ampéricas (I-V) de las celdas individuales que componen los paneles solares, ya que estas características definen la eficiencia energética de dicha conversión. De estas características se obtienen la corriente en la oscuridad de la celda (mientras más baja mayor es la eficiencia cuántica interna) y la resistencia "shunt" asociada a los contactos óhmicos (mientras más baja menos pérdidas por calentamiento en los contactos). Se presenta el montaje de una tecnología digital para la caracterización de las celdas y evaluar su efecto en la eficiencia de las celdas y los paneles solares

**Palabras clave:** fotocelda de Si, característica I-V, corriente oscura, resistencia shunt..

## Abstract

For design, set-up and setting of photovoltaic conversion systems of the solar energy in electric, it is necessary knowing the volt - ampere characteristics ( I - V ) of the individual cells that fix the solar panels, since the energetic conversion efficiency is defined from these characteristics. To obtain the dark current of the cell of these I-V characteristics (while bottom principal is the quantum efficiency internal) and the resistance shunt associated to the ohmic contacts ( while bottom minus losses for heating in the contacts) a digital technology's set-up is up for its characterization cells and evaluating his effect in the efficiency of the solar cells and the solar panels.

**Keywords:** Si photocell, characteristic I - V, dark current, shunt resistance.

---

<sup>1</sup> Doctor. Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Ciego de Ávila (UNICA). pancho@ingeniería.unica.cu, Cuba.

<sup>2</sup> Maestría. Facultad de Electromecánica, UC.

<sup>3</sup> Maestría Facultad de Electromecánica, UC.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las fuentes de contaminación están provocando el fenómeno de calentamiento global, perjudicial para todos (Pardo-García & Castellanos-González, 2017). Por ello, se debe enfatizar en la fabricación de dispositivos que nos ayuden a aprovechar la energía alternativa que tenemos hoy en día, reduciendo costos y aumentando la eficiencia para así poder tener acceso a esta tecnología y no contaminar más al medio ambiente (Martínez-Bernal, 2013; Reyes-Caballero et al., 2016; Ruiz-Ayala et al., 2018).

Las celdas solares hoy en día son una de las pocas fuentes de energía no contaminante (Criollo et al., 2014). Estas desempeñan un rol muy importante en los paneles fotovoltaicos, los cuales están formados por arreglos de celdas solares, que están conectadas en serie (Figueroa-Cuello et al., 2017). Las celdas constituyen la unidad básica del panel, y la potencia eléctrica deseada determina la cantidad de paneles, según las diversas aplicaciones (Leal-González & Hernández-Cely, 2013). Para ello se realizan en laboratorios varias pruebas de diferentes tipos de semiconductores para la manufactura de estos dispositivos, algunos son caros y no muy accesibles, o se requiere de más tecnología costosa (Vera-Dávila et al., 2018). Por eso se estudia más el silicio que, comparado con otros, es más accesible y barato; estudiando más este material se podría obtener una celda solar de alta eficiencia (Ginley, 2008).

La conversión directa de energía solar a electricidad por medio de celdas fotovoltaicas en sistemas de potencia solar concentrados, está surgiendo como uno de los principales contendientes para la producción de potencia verde de la siguiente generación (Gómez-Rojas et al., 2016). El área fotovoltaica se está desarrollando rápidamente, basada en nuevos materiales y enfoques de deposición (Rueda & Hernández, 2015).

En la actualidad, los sistemas fotovoltaicos predominantemente están basados en silicio cristalino y policristalino y está creciendo más allá de 40% por año, con la producción acercándose a 3 GW por año, con los sistemas fotovoltaicos proporcionando menos del 1% de energía usada en el mundo (Bautista-Ruiz et al., 2017; Estrada-Rodríguez et al., 2017). Incrementar la eficiencia de la celda y reducir el costo de fabricación, son parámetros críticos para alcanzar costos razonables de sistemas fotovoltaicos (Mejía-Bugallo et al., 2017). Las celdas solares de películas de CdTe, han reportado un costo de fabricación de \$1.25 por watt. Hay también la promesa de incrementar la eficiencia al usar celdas multiuniones o dispositivos híbridos organizados en la nanoescala (Morales-Acevedo, 2004). Esto puede llevar a eficiencias de conversión mayores a 50%. La conversión de energía solar en constante aumento representa uno de los negocios nuevos más grandes que van emergiendo en cualquier sector de la economía.

Los resultados del estudio de las características de paneles solares nos permitirán plantear una mejora encaminada a la obtención de un mayor rendimiento energético (San Gil, 2008).

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Una célula solar es un sistema semiconductor que absorbe luz (energía solar) y la convierte de forma directa en energía eléctrica. Esta generación de energía, de manera general, parte del efecto fotoeléctrico sobre el gap de energía de un semiconductor. En todo sólido cristalino existen dos bandas de energías llamadas banda de conducción y banda de valencia, debido a los electrones compartidos de los átomos de la red. Estas pueden estar solapadas en el caso de los conductores, muy separadas en el caso de los aislantes o con una pequeña separación como es el caso de los semiconductores (Ramírez-Hurtado et al., 2016). La separación entre ambas es conocida como gap de energía.

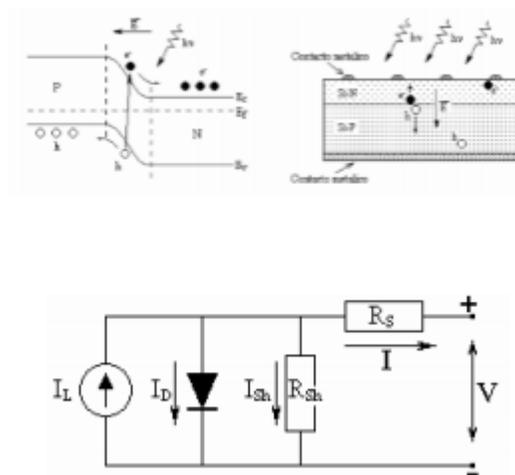


Figura 1: Esquema de la juntura p-n, fotocelda de Si y circuito equivalente.

La celda solar puede modelarse por medio del circuito equivalente mostrado en la figura 1; empleando las leyes de teoría de circuitos se obtiene el siguiente modelo matemático para la celda solar (Morales-Acevedo, 2004)

$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{A_0 k_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

Los parámetros en esta ecuación están descritos en el circuito eléctrico de la Fig.1 y se describen mas detalladamente en Green-Martin (2016). En esta sección empleamos la expresión (1) para obtener la potencia máxima que adquiere la celda solar; es decir, buscamos el potencial que hace que la corriente tenga un valor máximo. Aplicando el procedimiento normal para

encontrar un extremo y empleando el método de diferenciación explícita, encontramos la expresión siguiente (Morales-Acevedo, 2004):

$$-\frac{qI_0}{A_0k_B T} \exp\left[\frac{q(V+IR_s)}{A_0k_B T}\right] + \frac{V}{R_p} + I \left\{1 + \frac{R_s}{R_p} + \frac{qI_0 R_s}{A_0k_B T} \exp\left[\frac{q(V+IR_s)}{A_0k_B T}\right]\right\} = 0 \quad (2)$$

(2)

Las ecuaciones (1) y (2), se resuelven simultáneamente para encontrar  $I_m$  y  $V_m$ . Con ayuda del programa MathCAD encontramos los parámetros de interés de la fotocelda: corriente oscura  $I_0$  y resistencia shunt  $R_s$  (Morales-Acevedo, 2004).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS:

Para determinar la irradiancia solar se usó un panel fotovoltaico de la marca NUMEN que se muestra en la siguiente figura y a continuación sus características.



Figura 1: panel fotovoltaico

Tabla 1:

Modelo	DSM-5L
Número de serie	20115056
Condiciones estándares de prueba	AM 1.5, 1000 W/ m <sup>2</sup> , 25°C
Potencia Nominal (W)	5
I <sub>mpp</sub> (A)	0.32
I <sub>sc</sub> (A)	0.35
V <sub>mpp</sub> (V)	16.5
V <sub>oc</sub> (V)	20.5
Tolerancia (%)	+/-5



Figura 2 y 3: Medición del Voltaje y la Corriente a la salida de la fotocelda.

Con este montaje se determinó las características de corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto.

#### 4. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

A continuación se muestran en la Figura 4 las gráficas de dependencia de la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) en función de la irradiancia. Como se observa, la corriente es perfectamente lineal mientras que el voltaje no, por eso, usaremos el voltaje.

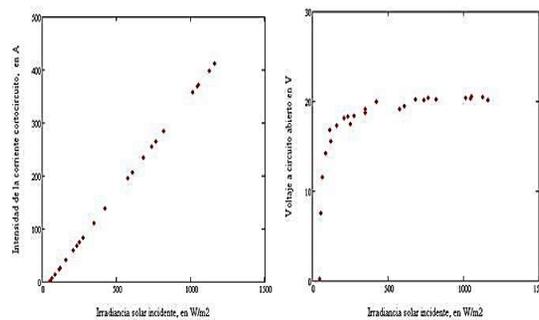


Figura 4: dependencia de la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) en función de la irradiancia.

Se presenta en la Figura 5 las mediciones de la irradiancia en los 6 días que medimos. El día de menor irradiancia fue el día 17 porque estuvo muy nublado, en los demás se comportó normalmente

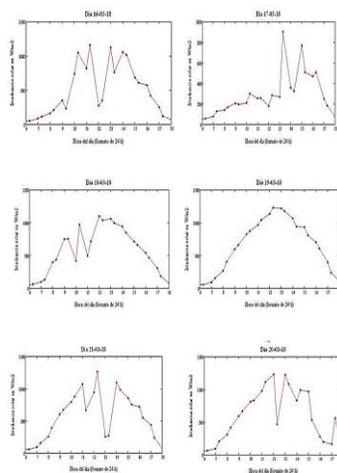


Figura 5: mediciones de la irradiancia.

La Figura 6 muestra las gráficas de la medición de la irradiancia de los 6 días, para poder comparar; como se observa el grueso de la radiación ocurre cerca del mediodía.

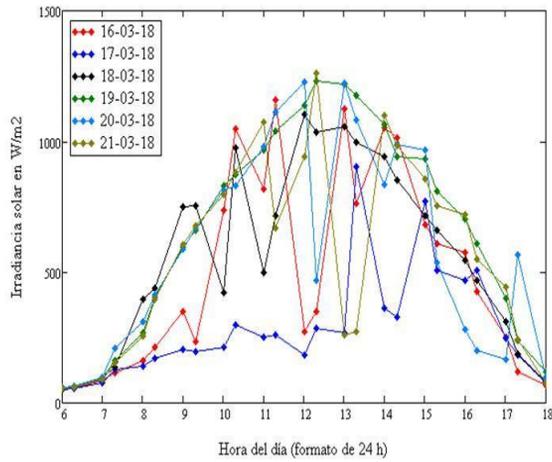


Figura 6: medición de la irradiancia de los 6 días para poder comparar

Integrando en el tiempo los datos de las mediciones anteriores, se obtiene la energía total incidente por unidad de superficie (en kWh para poder comparar con tablas de la NASA).

De esta integración, se muestran en la siguiente figura los 6 días estudiados, se presentan como puntos experimentales y las líneas horizontales es el promedio en el tiempo para 22 años que presenta la NASA para locaciones de la provincia de Ciego de Ávila. Estos resultados garantizan que la calibración del panel es correcta.

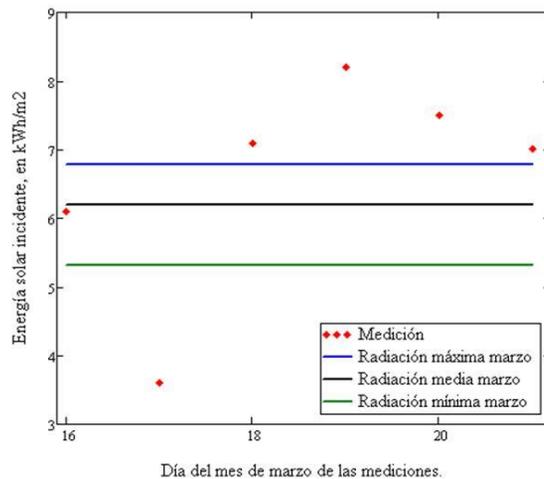


Figura 7

Mostramos en la Figura 8 el gráfico de la irradiancia máxima o irradiancia pico, que no es más que la máxima irradiancia que cayó en 1 día, en este caso para cada uno de los 6 días estudiados.

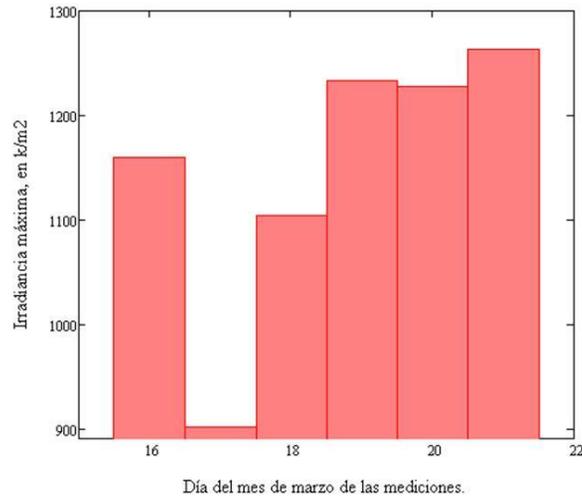


Figura 8: irradiancia máxima o irradiancia pico

Se muestra en la Figura 9 la tramitancia atmosférica en por ciento (%); ella junto a la irradiancia pico son los dos parámetros fundamentales en el estudio de la energía fotovoltaica, porque es necesario saber qué cantidad de energía fotovoltaica cayó y cuanta transmitió a la atmósfera (Leal-González & Hernández-Cely, 2013).

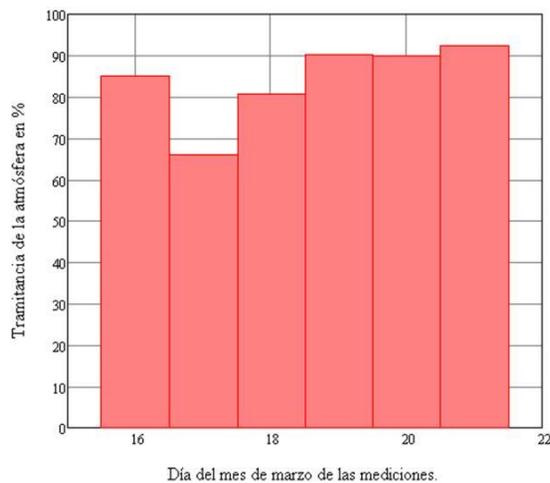


Figura 9: tramitancia atmosférica en por ciento (%)

## 5. CONCLUSIONES

Luego del profundo estudio realizado en las locaciones de Ciego de Ávila, podemos decir que la energía solar, siendo un recurso inagotable, se hace muy necesaria e importante, pues a partir de ella se genera electricidad, y su utilización para este fin no genera dificultades o desechos al medio ambiente.

El panel fotovoltaico marca NUMEN utilizado en la investigación permite el uso para todas las aplicaciones de esta energía tan imprescindible para todos.

## REFERENCIAS

Bautista-Ruiz, W. A., Díaz-Lagos, M., & Martínez-Ovalle, S. A. (2017). Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(1), 135-146. doi: 10.19053/20278306.v8.n1.2017.7374

Criollo, B., Alvarado, J., & Numpaque, H. (2014). Control PID de temperatura y dosificación de ph para la producción de gas metano a partir de la digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2 (24), 134-141. doi: <https://doi.org/10.24054/16927257.v24.n24.2014.2339>

Estrada-Rodríguez, C. A., Parra-Vargas, C. A., & Pimentel-Junior, J. L. (2017). Propiedades estructurales, eléctricas y magnéticas en el sistema Na<sub>0.25</sub> Ba<sub>0.75</sub>CoO<sub>3</sub>. *BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 15 (1). doi: <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2017.2557>

Figueroa-Cuello, A., Pardo-García, A., & Díaz-Rodríguez, J. (2017). Sistema control supervisor de clientes con acceso remoto para sistemas solares fotovoltaicos autónomos. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 7(2), 367-378. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.v7.n2.2017.6104>

Ginley, D., Green, A. A., & Collins, R. (2008), Solar Energy Conversion Toward 1 Terawatt. *Bulletin M R S*, 33 (4), 355.

Gómez-Rojas, O., Díaz-Lagos, M., Blandón-Montes, A., & Martínez-Ovalle, S. (2016). Presencia de elementos contaminantes como Cd, As, Pb, Se y Hg en carbones de la zona Cundiboyacense, Colombia. *REVISTA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN*, 7(1), 141-150. Doi: <http://dx.doi.org/10.19053/20278306.v7.n1.2016.5604>

Green -Martin, A., (2016). Solar Cell, Operating principles, technology, and system applications. Prentice-Hall. Recuperado de: <http://www.maplesoft.com/applications/view.aspx?SID=33045>

Leal-González, F. A., & Hernández-Cely, M. M. (2013). Estudio del potencial eólico y solar de Cúcuta, Norte de Santander. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2 (22). Recuperado de: [http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs\\_viceinves/index.php/RCTA/article/view/407](http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/407)

Martínez-Bernal, M. S. (2013). Determinación de la productividad y competitividad de la pequeña minería del distrito minero del norte de Boyacá. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 3 (2), 72-86. doi: 10.19053/20278306.2168

Mejía-Bugallo, D., Peña-Cortés, C. A., & Riaño-Jaimes, C. I. (2017). SISTEMA SOLAR PARA LA OPERACIÓN DE UN ROBOT AGRÍCOLA. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1 (26). Recuperado de: [http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs\\_viceinves/index.php/RCTA/article/view/2533](http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/2533)

Morales-Acevedo, A., (2004)., Diseño optimo y realización de celdas solares de silicio para producción industrial. *Revista Mexicana de Física*, 45, 89-98.

Pardo-García, A., & Castellanos-González, L. (2017). Automatización de ambientes en invernaderos simulando escenarios futuros. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1 (29).

Ramírez-Hurtado, A. L., Gil-Monsalve, J., Medina-Barreto, M. H., & Cruz-Muñoz, B. (2016). Implementación en entorno Labview de un sistema multifuncional de medidas magnetoópticas y magnetoeléctricas para caracterización de materiales. *BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 14 (2), 116-125. doi: <https://doi.org/10.24054/01204211.v2.n2.2016.2188>

Reyes-Caballero, F., Fernández-Morales, F., & Duarte, J. (2016). Panorama energético. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 7(1), 151-163. doi: <http://dx.doi.org/10.19053/20278306.v7.n1.2016.5605>

Rueda, J., & Hernández, A. (2015). Growth of single-cristalline strontium titanate fibers using LHPG. *BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 13 (2), 24-28. doi: <https://doi.org/10.24054/01204211.v2.n2.2015.1796>

Ruiz-Ayala, D., Vides-Herrera, C., & Pardo-García, A. (2018). Monitoreo de variables meteorológicas a través de un sistema inalámbrico de adquisición de datos. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(2), 333-341. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7971>

San Gil, P. (2008). *Electricidad en el futuro*. Ecuador: CONACYT.

Vera-Dávila, A., Delgado-Ariza, J., & Sepúlveda-Mora, S. (2018). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab. Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, 8(2), 343-356. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>