

Evaluación de eficiencia en celdas solares según parámetros electro-ópticos

Evaluation of efficiency in solar cells according to electro-optic parameters

Autores: Yadelvys García Figueredo

<https://orcid.org/0000-0003-0040-0808>

Juan Antonio Martín Alfonso

<https://orcid.org/0000-0003-3146-699X>

Francisco García Reina

<https://orcid.org/0000-0001-5721-3363>

Institución: Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba

Correo electrónico: ygfigueredo@unica.cu

jamartin@unica.cu

pancho@unica.cu

Resumen

En el presente trabajo, se emplea para el estudio 95 celdas solares fotovoltaicas de Si multicristalino de tecnología china, procedentes del Combinado de Componentes Electrónicos de la provincia Pinar del Río, que se clasifican según los parámetros electro-ópticos dados por el fabricante, y se evaluó su eficiencia para su uso en paneles solares fotovoltaicos con diferentes aplicaciones finales. Los puntos experimentales se extrajeron de las imágenes obtenidas a través del Solar Simulator HSM2 utilizando el programa OriginPro 2017 de procesamiento de datos. Se analizó el valor medio de la eficiencia de la muestra con sus respectivos errores máximos y mínimos, y se encontró que 77 celdas solares poseen mayor calidad, 13 mediana calidad y 5 menor calidad.

Palabras clave: Eficiencia, Fococelda de Si, Parámetros electro-ópticos.

Abstract

In the present work, 95 multicrystalline Si photovoltaic solar cells of Chinese technology are used for the study, coming from the Electronic Components Complex of the Pinar del Río province, which are classified according to the electro-optical parameters given by the manufacturer, and are evaluated its efficiency for use in photovoltaic solar panels with different end applications. The experimental points were extracted from the images obtained through the Solar Simulator HSM2 using the OriginPro 2017 data processing program. The average value of the efficiency of the

sample was analyzed with its respective maximum and minimum errors, and it was found that 77 solar cells have higher quality, 13 medium quality and 5 lower quality.

Keywords: Efficiency, Electro-optical parameters, Si photocell.

Introducción

El sistema energético mundial actual está basado en fuentes de energía no renovables (García, 2018) que acarrearán efectos sociales y económicos del cambio climático (Gálvez *et al.*, 2021).

Las energías renovables (energía eólica, solar fotovoltaica, solar térmica, hidráulica, de la biomasa y la de los residuos orgánicos) (Beltrán, 2015) ofrecen la oportunidad de obtener energía útil para diversas aplicaciones, su aprovechamiento tiene menores impactos ambientales que el de las fuentes convencionales y poseen el potencial para satisfacer todas nuestras necesidades de energía presentes y futuras. Además, su utilización contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables y propicia el desarrollo. Es por ello que, la Eficiencia Energética y el aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía (FRE), especial la energía solar, se presentan como una necesidad impostergable para el desarrollo sostenible de países y comunidades, por lo que ésta debe constituir una solución prioritaria ante la creciente demanda nacional de energía eléctrica, el aumento de los precios del petróleo y otros combustibles fósiles, la disminución de sus reservas naturales y la amenaza ecológica que representa el esquema energético global actual de rebasar los límites de la capacidad del planeta para asimilar los impactos ambientales que ocasiona (Morales, 2004; Opálková *et al.*, 2018; Kapoor, 2017; Díaz, 2018).

La eficiencia de las celdas solares es determinante para reducir los costos de los sistemas fotovoltaicos, ya que su producción es la más cara de todo el sistema (Iqbal, 1983). Los tres factores que rigen la producción de energía en un panel son: tamaño, eficiencia y cantidad de radiación electromagnética que incide sobre él.

Como aclara Torres *et al.* (2018), a medida que la tecnología avanza, la eficiencia también lo hará. Un logro que se recalca mucho entre los diversos laboratorios, es la eficiencia del 45 % de las células fotovoltaicas MULTIUNION en 2018, seguido por las células de silicio con costos aceptables. Los laboratorios apuestan mucho por este tipo de células, las cuales cuentan con una eficiencia de conversión teórica máxima del 33.7 % de la energía solar en electricidad. Pero para que esto se logre comercialmente

aún faltan algunos años. Por otro lado, Apolonio (2019), reporta que William Shockley y Hans Queisser determinaron que, para lograr mayor eficiencia, hay que usar celdas combinadas de varias capas o concentraciones; siendo silicio, el elemento más usado, con un límite de 29 %. Para el uso común se usan paneles de silicio por su alta fiabilidad a precios razonables. Paneles de celdas monocristalinas son las más eficientes, seguidas por las policristalinas. Mientras los mejores paneles monocristalinos superan ligeramente el 20 %, la mayoría de los paneles en producción captan alrededor del 16 % de la energía disponible de la luz.

En Cuba se ensamblan paneles fotovoltaicos con celdas de Si multicristalino de tecnología china (con eficiencia según las especificaciones del productor, entre un 16.8 % y un 18.4 %), en el Combinado de Componentes Electrónicos de la provincia de Pinar del Río (SOPELIA, 2016), las cuales son examinadas para su correcto funcionamiento, sin embargo, no son separadas según la evaluación de su eficiencia, lo cual puede conllevar a la disminución de la eficiencia del panel y/o parque fotovoltaico del que formará parte. Con una mejor clasificación se podrían ensamblar paneles de mayor o menor eficiencia para diferentes aplicaciones tecnológicas, para lo que según la media real a determinar de la eficiencia de la muestra.

Incluso en celdas del mismo tipo es difícil encontrar dos paneles fotovoltaicos idénticos, pues los procesos de fabricación de los paneles generalmente causan diferencias en los parámetros electro-ópticos. Así, solo la medición experimental de la curva Intensidad-Voltaje permite conocer con precisión los parámetros eléctricos de éste, lo que proporciona información muy relevante para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos (Durán *et al.*, 2008).

García *et al.* (2022) en su trabajo incluye la evaluación de celdas solares proponiendo un criterio de clasificación de calidad según los parámetros electro-ópticos Temperatura (T), Tensión de Circuito Abierto (V_{oc}), Intensidad de Corriente de Corto Circuito (I_{sc}), Potencia Máxima ($P_{m\acute{a}x}$), Intensidad (I_m) y Tensión (V_m) en el punto de máxima potencia, Factor de Llenado (FF), Resistencia en Serie (R_s), Resistencia en Paralelo (R_{sh}) y Eficiencia de la celda (Eff). Tomaron como muestra los gráficos de las características I-V correspondientes a 95 fotoceldas de celdas solares ensambladas en la Unidad Empresarial de Base (UEB) de energía fotovoltaica, Combinado de

Componentes Electrónicos (CCE) de Pinar del Río. Sin embargo, no se hace un análisis de los resultados ni del criterio de clasificación en sí.

El objetivo del trabajo es evaluar celdas solares a partir de parámetros electro-ópticos dados por el fabricante, según criterio propuesto para celdas solares ensambladas en la UEB de energía fotovoltaica CCE Combinado de Componentes Electrónicos de Pinar del Río.

Materiales y métodos

Las celdas solares estudiadas son de silicio multicristalino de tecnología china de la Jiangxi Risun Solar Energy Co. LTD, de Jiangxi. La figura 1 muestra sus principales características, para el momento del estudio.



Figura 1. Principales Características de las Celdas SF Empleadas.

Las principales características electro-ópticas de las celdas solares y la curva I-V se obtienen mediante el empleo del Solar Simulator HSM2 que se muestra en la figura 2.

Citar como:

GARCÍA, Yadelvys, MARTÍN, Juan A. y GARCÍA, Francisco (2024). Evaluación de eficiencia en celdas solares según parámetros electro-ópticos. *Universidad & ciencia*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11479770>

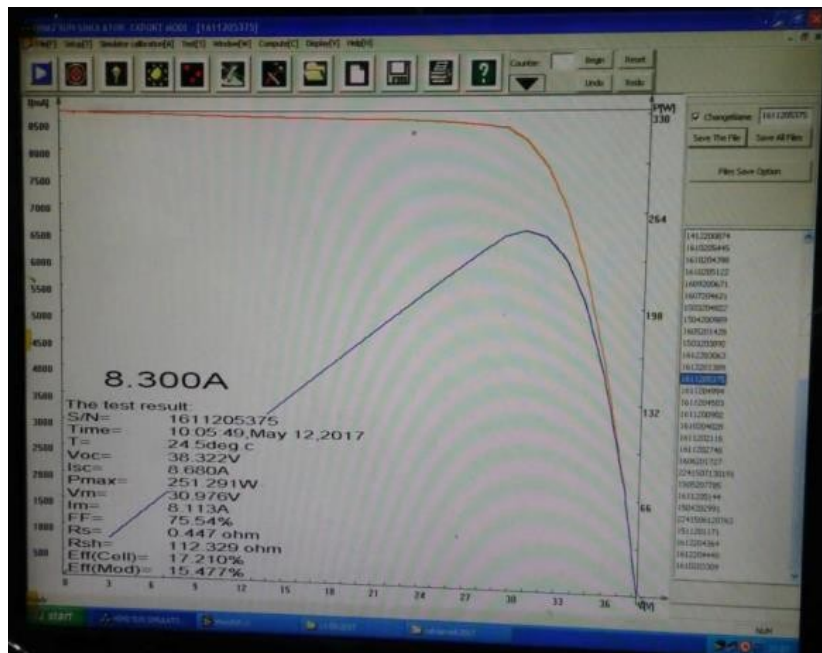


Figura 2. Programa Solar Simulator HSM2 Empleado para Obtener las Curvas I-V.

Para medir la eficiencia de celdas solares fotovoltaicas (η) es necesaria su caracterización electro-óptica (características volt-ampéricas) y para lograr altas eficiencias de conversión eléctrica se requiere tener los máximos valores de V_{oc} , Densidad de Corriente de Corto Circuito J_{sc} , y FF (Cata y Rodríguez, 2015; Apolonio, 2019).

La ecuación para el cálculo de la eficiencia (figura 3) es:

$$\eta = FF \cdot \frac{V_{oc} \cdot J_{sc}}{P_{in}}$$

Donde: $FF = \frac{V_m \cdot J_m}{V_{oc} \cdot J_{sc}} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{V_{oc} \cdot J_{sc}}$ $P_{in} = E \cdot A_{cell}$ entonces, $\eta = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{in}}$

Figura 3. Ecuación cálculo de eficiencia.

E- Irradianza

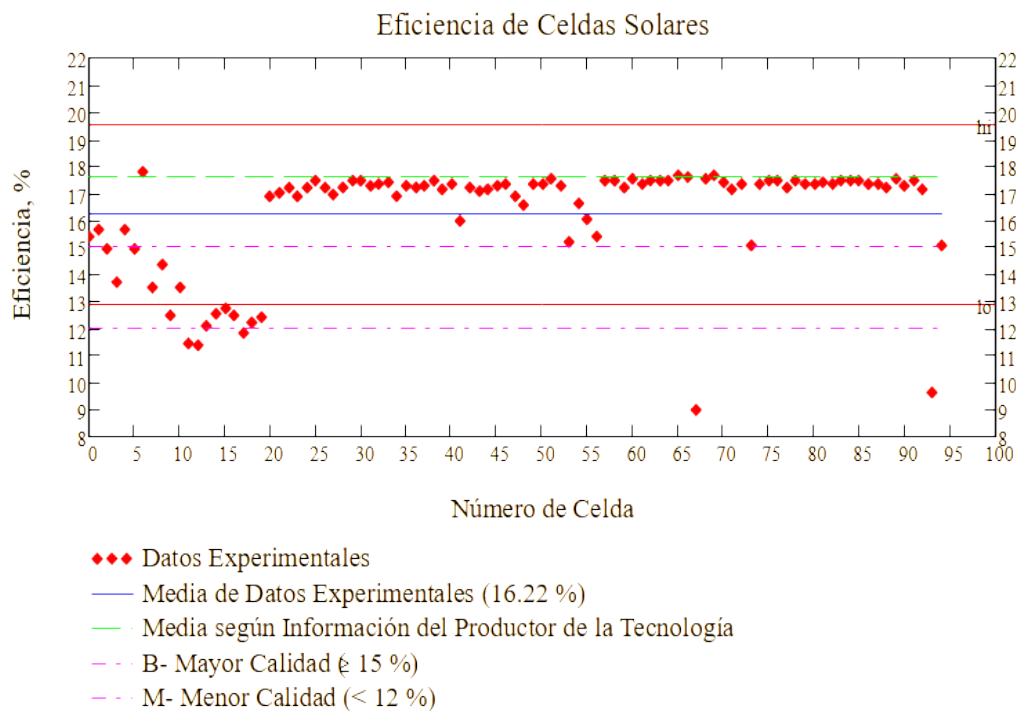
A_{cell} - Área de la celda

En García *et al.* (2022) se muestran los diagramas de dispersión para los parámetros electro-ópticos de las 95 celdas solares fotovoltaicas estudiadas con sus valores medios y sus respectivos errores de la medición a partir de la desviación cuadrática media, para lo que se emplea la t de Student ($t=1.661225855$) para un 95 % de confianza recurriendo a la hoja de cálculo del MathCad 15.0.

Citar como:

GARCÍA, Yadelvys, MARTÍN, Juan A. y GARCÍA, Francisco (2024). Evaluación de eficiencia en celdas solares según parámetros electro-ópticos. *Universidad & ciencia*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11479770>

A continuación, en la figura 4 se observa el diagrama de dispersión de la propia eficiencia (Eff) de las 95 celdas solares fotovoltaicas estudiadas con sus valores medios y sus respectivos errores máximos y mínimos.



F

Figura 4. Representación Gráfica de la Eficiencia de las Celdas, en %, con su Respectivo Valor Medio y Errores Máximo (hi) y Mínimo (lo).

Nota. Modificado de Graphic Representation of the Efficiency of the Cells, in %, with their Respective Average Value and Errors, de García et al., 2022, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.

En el criterio de clasificación empleado se considera “Buena” las fotoceldas de mayor calidad, cuya eficiencia es mayor o igual al 15 %; “Regular” a las que poseen una eficiencia mayor o igual al 12 % y menor que el 15 %; y “Mala” a las de menor calidad con una eficiencia menor que el 12 % (García *et al.*, 2022).

La siguiente figura 5 presenta los parámetros electro-ópticos (T , V_{oc} , I_{sc} , $P_{m\acute{a}x}$, V_m , I_m , FF , R_s , R_{sh} , Eff) de celdas seleccionadas para ejemplificar, la celda número 8 de mayor calidad, la celda número 12 de mediana calidad y la celda número 69 de menor calidad de la muestra de 95 celdas estudiadas. En la última fila se muestran parámetros electro-ópticos con sus medias y errores absolutos de las mediciones a partir de la desviación cuadrática media teniendo en cuenta las 95 fotoceldas.

Citar como:

GARCÍA, Yadelvys, MARTÍN, Juan A. y GARCÍA, Francisco (2024). Evaluación de eficiencia en celdas solares según parámetros electro-ópticos. *Universidad & ciencia*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11479770>

No. Celda	T, °C	V _{OC} , V	I _{SC} , A	P _{máx} , W	V _m , V	I _m , A	FF, %	R _s , Ω	R _{sh} , Ω	Eff, % (celda)
8	24.1	38.736	8.867	260.007	31.394	8.282	75.70	0.513	112.601	17.807
12	23.9	29.945	8.813	197.656	24.056	8.216	74.90	0.321	78.493	13.537
69	23.8	38.466	8.679	130.878	36.439	3.592	39.20	0.453	46.173	8.963
($\bar{X} \pm \Delta X$) ^a	24.3±0.69	38.15±2.56	8.69±0.18	236.83±48.73	29.78±4.57	7.95±0.91	71.4±13.27	0.63±0.63	108.82±62.25	16.22±3.34

- Buena (mayor calidad)
- Regular (mediana calidad)
- Mala (menor calidad)

Nota. Modificado de Sample of 15 of the 95 Photocells with their Main Electro-Optic Parameters classified by Colors into Good, Regular and Bad according to their Efficiency, de García et al., 2022, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.

^a - Valores de los parámetros electro-ópticos con sus medias y errores absolutos de las mediciones a partir de la desviación cuadrática media.

Figura 5. Muestra de 15 de las 95 Fotoceldas con sus Parámetros Electro-Ópticos Clasificadas por Colores en Buenas, Regulares y Malas Según su Eficiencia.

Fue determinada la calidad de las celdas solares para su uso o no en los paneles solares a partir de los parámetros electro-ópticos dados por el fabricante y el criterio de clasificación propuesto, cuantificado en la siguiente figura 6.

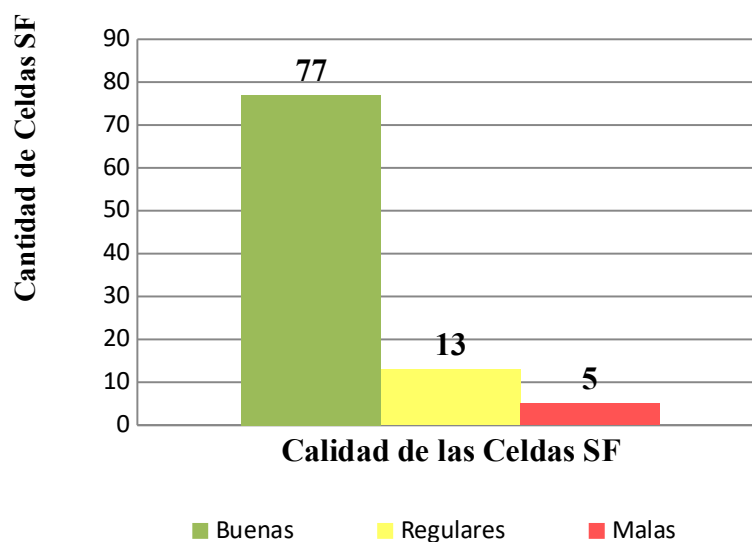


Figura 6. Calidad de las Celdas SF Clasificadas en Buenas, Regulares y Malas Según su Eficiencia.

Citar como:

GARCÍA, Yadelvys, MARTÍN, Juan A. y GARCÍA, Francisco (2024). Evaluación de eficiencia en celdas solares según parámetros electro-ópticos. *Universidad & ciencia*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11479770>

Nota. Reproducido de Quality of the SF Cells Classified as Good, Regular and Bad According to their Efficiency, de García et al., 2022, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.

Resultados y discusión

Según lo analizado anteriormente, la media de eficiencia de las celdas esperada según el productor de la tecnología (17.6 %), la media de eficiencia de las 95 celdas estudiadas dadas por el fabricante (16.22 %) y los errores cometidos en las mediciones (ver figura 4), se puede comprobar que el criterio de clasificación empleado es de 15 % menos que la media de la eficiencia de la muestra.

Las celdas solares menos eficientes y por ende con menor potencia máxima son las numeradas 13, 14, 19, 69 y 95, con valores muy por debajo de su media y quedan por fuera del error mínimo.

Se presenta la figura 7 con las fotos suministradas por el fabricante de las curvas de Intensidad I (en mA) contra Voltaje V (en V) para una mejor visualización de las celdas 8 (a), 12 (b) y 69 (c), de mayor, mediana y menor calidad, respectivamente.

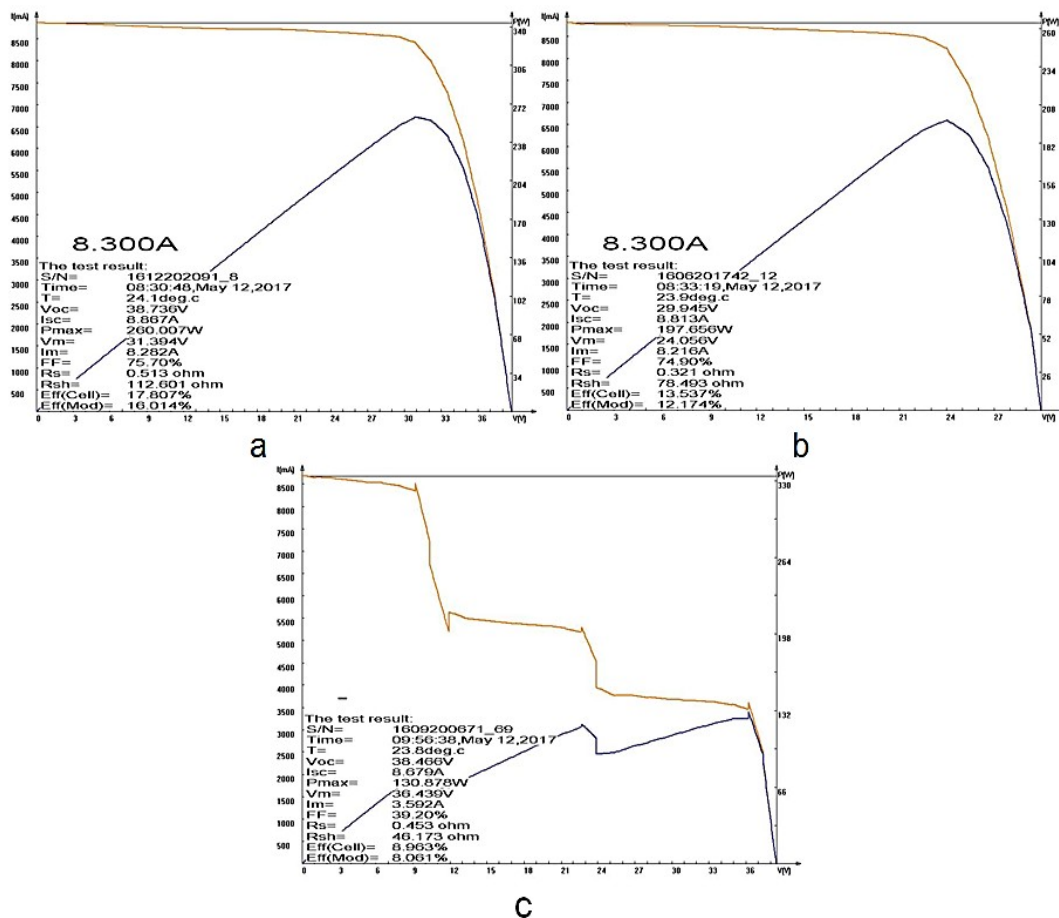


Figura 7. Imágenes de las curvas I-V de las celdas 8 (a), 12 (b) y 69 (c) de mayor, mediana y menor calidad respectivamente.

Como se plantea en el epígrafe Materiales y Métodos, para lograr altas eficiencias de conversión eléctrica se requiere tener los máximos valores de V_{oc} , de J_{sc} ($J=I_{sc}/A$), y del FF, este a su vez posee una dependencia directa con la $P_{máx}$. En la figura 7, las curvas I-V a) y b), son prácticamente iguales, sin embargo, la diferencia en sus eficiencias se puede observar en los parámetros electro-ópticos de la figura 5, que en todos los casos son inferiores en la celda 12 con respecto a la celda 8.

Como podemos observar en la figura 6, según el criterio de clasificación propuesto, la mayoría de las celdas poseen una eficiencia buena entre un 15 % y un 17.8 %, que no se corresponde con las especificaciones del productor de la tecnología, según los cuales la eficiencia esperada de las celdas VF modelo 3BB debería ser más elevada, entre 16.8 % y 18.4 % (SOPELIA, 2016), como se planteó al inicio del artículo y se puede observar en la figura 1. Según el sitio oficial de la Jiangxi Risun Solar Energy (Solar Cell, 2023), el nuevo modelo 4BB ya en comercialización, posee una eficiencia

entre 17.5 % y 18.7 %; y bastante por debajo del límite de 29 % de eficiencia alcanzado para celdas de Si multicristalino (Apolonio, 2019). En menor cuantía, se encuentran las celdas regulares y malas, 13 y 5, respectivamente.

Según García *et al.* (2022), se puede evaluar, además, la calidad de un lote de celdas en dependencia del porcentaje de celdas clasificadas en buenas, regulares y malas. Esta clasificación nos permite valorar las celdas para su uso o no en los paneles solares teniendo en cuenta la eficiencia que se desea alcanzar de estos últimos, que pueden ser empleados en diversas aplicaciones tecnológicas con disímiles finalidades para las cuales no siempre es necesaria la máxima eficiencia.

Conclusiones

La evaluación de las curvas I-V de las 95 celdas estudiadas permitió extraer los parámetros electroópticos calculando sus valores medios y errores máximos, estudio necesario para determinar que, según su eficiencia, 77 celdas poseen mayor calidad, 13 mediana calidad y 5 menor calidad.

Referencias Bibliográficas

APOLONIO QUINTANA, Valdemar A. (2019). Metodología para la medición de la eficiencia de celdas solares CdS/CdTe mediante curvas de caracterización. Tesis de Ingeniero en Electrónica. Universidad Autónoma del Estado de México. Disponible en:

<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/106075/>

[Tesis_Apolonio_diciembre2019_Rev3.pdf;jsessionid=E7C5F046E6E3C8C9F8F6593B6DE27654?sequence=4](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/106075/Tesis_Apolonio_diciembre2019_Rev3.pdf;jsessionid=E7C5F046E6E3C8C9F8F6593B6DE27654?sequence=4). Visitado: 25 de marzo de 2023.

BELTRÁN PÉREZ, Y. (2015). Evaluación del sistema de bombeo solar fotovoltaico para el riego del frijol en la UBPC Delia del Municipio Primero de Enero. Tesis de Maestría. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez.

CATA SÁNCHEZ, J. E. y RODRÍGUEZ SÓCOLA, F. M. (2015). Análisis Matemático de un Panel Solar Fotovoltaico de Silicio. Tesis de Ingeniería Eléctrica. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil. Disponible en:

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10250/1/UPS-GT001338.pdf>.

Visitado: 21 de abril de 2023.

- DÍAZ GONZÁLEZ, C. A. (2018). Desarrollo de un sistema de medición de la irradiancia solar y su uso en el aprovechamiento de esta energía renovable. Tesis de Master en Eficiencia Energética. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez.
- DURÁN, E. ... [et al.] (2008). Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: A review. Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922578>. Visitado: 21 de abril de 2023.
- GÁLVEZ, Jeffrey E. A., LEÓN, W. G. A. y DIONISIO, S. L. D. (2021). Energías renovables, geotermia y biomasa: una revisión crítica para Guatemala. *Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado*. Guatemala, Vol. 11, No. 1, p. 51-57.
- GARCÍA LÓPEZ, L. (2018). Determinación de la eficiencia de conversión de corriente directa en corriente alterna en los sistemas fotovoltaicos instalados en la provincia. Tesis de Maestría. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez.
- GARCÍA FIGUEREDO, Y., GARCÍA REINA, F. y MARTÍN ALFONSO, J. A. (2022). Modelo Matemático para la determinación de las Características Voltioamperio en Focélulas Solares. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol. 2, No. 40, p. 105-111. Disponible en: <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcta/article/download/2358/2644>. Visitado: 21 de marzo de 2023.
- IQBAL, M. (1983). An introduction to solar radiation. Toronto: Academic Press.
- KAPOOR, K. (2017). Evolution of solar energy in India: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 40, pp. 475-487.
- MORALES, A. (2004). Diseño óptimo y realización de celdas solares de silicio para producción industrial. *Revista Mexicana de Física*, Vol. 50, No. 5, pp.431-442. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0035-001X2004000500003&lng=es&nrm=iso Visitado: 21 de marzo de 2023.
- OPÁLKOVÁ, M. ...[et al.] (2018). A Database of 10 min average measurements of solar radiation and meteorological variables in Ostrava Czech Republic. *Earth Syst. Sci.*, Vol. 10, pp. 837-846. Disponible en: <https://essd.copernicus.org/articles/10/837/2018/>. Visitado: 21 de abril de 2023.
- SOLAR CELL (2023). Sitio oficial de Jiangxi Rinsun Solar Energy. Disponible en: <http://www.risunsolar.com/en/about/?20.html>. Visitado: 25 de octubre de 2022.

SOPELIA (2016). Solar Platform America Latina. Disponible en:
<http://www.energiasolar.lat/cuba-solar-pv/> Visitado: 21 de marzo de 2023.

TORRES PACHECO, S... [et al.] (2018). Eficiencia en paneles solares. *Revista del Diseño Innovativo*. Irapuato, Vol. 2, No. 2, pp. 9-21. Disponible en:
https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Diseno_Innovativo_V2_N2_2.pdf. Visitado: 21 de marzo de 2022.

Conflicto de interés

Los autores no declaran conflictos de intereses.



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de los contenidos y no realice modificación de la misma.