

Recibido 18 de agosto de 2023. Aceptado 15 de enero de 2024. Publicado 31 de mayo de 2024.
ISSN: 2448-7775

Análisis del potencial de una celda solar orgánica sensibilizada con una mezcla de pigmentos de romero con semilla de aguacate

CECILIA GUADALUPE CHÁVEZ GUZMÁN, OMAR DANIEL CORRAL GARCÍA, JOSÉ SABÁS SEGURA*.

Ingeniería en Energías Renovables, Instituto Tecnológico Superior de Abasolo, Abasolo, Guanajuato, México.
*Autor de Correspondencia: jose.ss@abasolo.tecm.mx

RESUMEN Este estudio presenta un análisis de una Celda Solar Orgánica Sensibilizada mediante pigmentos de aguacate y romero. Se llevaron a cabo mediciones cuantitativas a lo largo de 14 días para evaluar la eficiencia y la vida útil de la celda. Aunque se observó una disminución en la eficiencia al agregar pigmento de romero, la vida útil de la celda se duplicó, alcanzando un rendimiento estable hasta el día 14. Se registraron valores cuantitativos de parámetros eléctricos a lo largo del tiempo, como voltaje de circuito abierto (Voc), corriente de cortocircuito (Isc), voltaje máximo (Vmax), corriente máxima (Imax), Factor de Llenado (FF) y eficiencia. A pesar de la leve degradación en la eficiencia, los resultados indican una preservación adecuada de las propiedades semiconductoras.

PALABRAS CLAVE— Orgánica, energía renovable, radiación solar.

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar es la fuente de energía más abundante, limpia, barata y segura [1]. Las celdas fotovoltaicas se utilizan para convertir la luz solar en energía eléctrica. Las celdas solares fotovoltaicas comúnmente están hechas de silicio (Si), telurio de cadmio (CdTe), seleniuro/sulfuro de indio y cobre (CIS) [2]. En 1991, Graetzel y su equipo desarrollaron celdas solares sensibilizadas por colorante DSSC, por sus siglas en inglés conocidas también como celdas solares de Graetzel. En la celda, las moléculas de colorante se utilizaron como absorbentes de luz en la película nano cristalina de dióxido de titanio (TiO₂) [3]. En la actualidad, las DSSCs (Celdas Solares Sensibilizadas por Colorantes) han atraído la atención de los científicos como una alternativa a la celda fotovoltaica convencional debido a sus bajos costos de producción de la luz solar [4], alta eficiencia de conversión de energía, simplicidad de fabricación y propiedades ópticas ajustables [3].

El objetivo de este trabajo es evaluar la eficiencia y la vida útil de una Celda Solar Orgánica Sensibilizada, utilizando pigmentos de hueso de aguacate y romero en una matriz de dióxido de titanio (TiO₂). Se busca cuantificar y analizar los parámetros eléctricos a lo largo del tiempo, con el fin de comprender el impacto de la adición del pigmento de romero en la eficiencia de conversión de energía y la estabilidad a largo plazo de la celda solar orgánica. Este enfoque permitirá obtener información valiosa sobre las propiedades y el rendimiento de las celdas solares sensibilizadas con esta combinación de pigmentos, con

posibles implicaciones en la mejora de la tecnología fotovoltaica orgánica.

La investigación de celdas solares en la última década ha llevado a un progreso notable y ha logrado eficiencias de conversión de energía superiores al 10% [5]. Las celdas solares sensibilizadas con tintes son una tecnología fotovoltaica disruptiva que utiliza compuestos de TiO₂ mesoporos y pigmentos orgánicos, lo cual ha creado un gran avance al lograr una eficiencia de conversión relativamente alta a través del uso de materiales baratos y abundantes [6].

Por tanto, si los resultados confirman que la combinación de pigmentos de hueso de aguacate y romero mejora la eficiencia y estabilidad de las celdas solares, esto no solo podría representar un avance significativo en la tecnología fotovoltaica orgánica, sino también podría abrir oportunidades para el desarrollo de materiales más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Además, la resistencia mejorada de estas celdas a factores ambientales adversos podría tener aplicaciones prácticas en entornos específicos, como regiones con condiciones climáticas extremas, ampliando así su utilidad en diversos escenarios.

II. MARCO TEÓRICO

Alexandre Edmond Becquerel, físico francés, descubrió el efecto fotovoltaico al experimentar con una pila electrolítica con electrodos de platino, en la que observó el incremento de corriente que causaba la exposición a la luz de uno de los electrodos [8].

En el año 1920, Albert Einstein explicó el efecto fotovoltaico, el cual describió como los electrones son capaces de absorber fotones de forma linealmente proporcional a la frecuencia de la fuente lumínica [8]. Por tanto, el efecto fotovoltaico se describe como el potencial eléctrico generado por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética. La curva característica de una celda solar está mostrada en la Fig. 1, teniendo en cuenta las características de voltaje y corriente (I-V) [9], como se muestra en la Fig. 1.

Una DSSC convencional es un dispositivo de estructura sándwich que consta de cuatro partes principales:

- Un ánodo compuesto por una película semiconductor nano cristalina de TiO_2 sobre un sustrato de vidrio conductor.
- Una monocapa de un sensibilizador, normalmente un tinte, adsorbido en la superficie de TiO_2 .
- Un electrolito que contiene un par redox.
- Un cátodo que contiene un catalizador.

El sensibilizador será un pigmento, el cual se une covalentemente a la superficie de la capa de óxido mesoporos de TiO_2 para mejorar la absorción de luz [7]. El pigmento actúa como una bomba de electrones moleculares en DSSC [3], al absorber la luz visible, generar electrones excitados y bombearlos al semiconductor [3]. Los sensibilizadores utilizados en el DSSC se pueden dividir en orgánicos e inorgánicos. Los tintes inorgánicos contienen un metal de transición en la estructura [9].

El pigmento debe tener ciertas propiedades para ser adecuado para su aplicación en DSSC, tales como una fuerte absorción en el rango visible, alta foto estabilidad y estabilidad térmica [6], buena adsorción en la superficie del semiconductor, es decir, una unión fuerte a la superficie del semiconductor con un grupo de anclaje, alta solubilidad en el solvente correspondiente, ser no tóxico, tener un amplio espectro de absorción en el rango visible para capturar la radiación solar y un alto potencial redox adecuado para la regeneración seguida de la excitación [5].

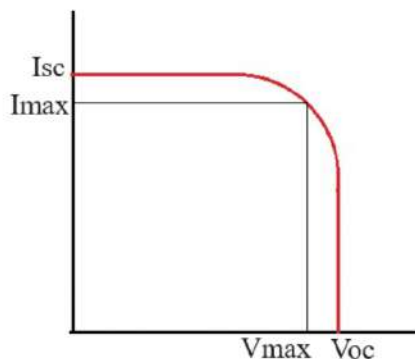


Fig. 1. Curva característica de voltaje y corriente de una celda solar [9].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de los prototipos y muestras, fue necesario obtener los pigmentos de romero, así como el de la semilla de aguacate, para aprovecharlos como sensibilizadores en una celda orgánica de tipo Graetzel.

Los materiales que se requieren para la fabricación de la DSSC son: cristales conductores de óxido de indio estaño (ITO) con medidas de $3 \times 3 \text{ cm}^2$, ácido acético, agua destilada, alcohol, capsaicina, pigmento (capsaicina y fragaria), Tritón X-100, dióxido de titanio grado reactivo. Como electrolito, se usa una solución de cloruro de potasio con cloruro de sodio, fragaria, hidróxido de sodio y carbono.

IV. METODOLOGÍA

La primera etapa es la preparación del colorante, tanto el de romero como el de hueso de aguacate. Para esta actividad, lo primero que se hizo fue triturar el hueso de aguacate y se pesó la cantidad de 10 gramos de este. Luego, se disolvieron 0.5 gramos de NaOH (hidróxido de sodio) en 100 ml de agua destilada y en esta solución se vertió el hueso de aguacate triturado y se agitó en una parrilla de agitación durante una hora para obtener el pigmento de hueso. Terminado el proceso, se filtró para reducir el número de impurezas.

Por otro lado, para la preparación del pigmento de romero, se pesaron 10 gramos de romero, al cual se le añadieron 100 ml de alcohol y se sometió a un proceso de agitación durante una hora. Luego, se dejó reposar por tres días, y posteriormente se sometió a un proceso de filtrado para reducir el exceso de elementos sólidos en la solución.

Para concentrar las muestras, se sometieron a un proceso de destilación a una temperatura de 70°C durante alrededor de 8 horas, y finalmente se almacenaron en un recipiente de color ámbar oscuro para evitar su descomposición por la radiación. Para preparar la solución de la mezcla de pigmento, se utilizaron 10 ml de pigmento de semilla de aguacate y 10 ml de pigmento de romero, los cuales se mezclaron con un agitador durante una hora.

Para el armado de las celdas, se preparó el cátodo y el ánodo con las placas de vidrio. Lo primero fue eliminar las cadenas de grasa sobre las superficies de los vidrios conductores. Para ello, se limpiaron las placas de vidrio con alcohol del lado conductor, mediante un paño humedecido con el mismo.

Lo siguiente fue la elaboración de la pasta semiconductor. Para ello, se colocó en un mortero 6 gramos de TiO_2 y posteriormente se incorporaron 10 ml de ácido acético, así como 1 ml de Tritón X-100. Todo se mezcló hasta obtener una pasta similar en consistencia a la pintura y luego se dejó reposar por 15 minutos.

Para la preparación del ánodo, se colocó la solución de TiO_2 sobre la superficie conductora de tal forma que cubriera

completamente la placa de vidrio del lado conductor. La pasta se dejó secar completamente y, una vez seca, se añadió un ml de la mezcla de pigmento y se dejó secar por una hora. Por otro lado, se elaboró una solución de 20 ml de agua destilada con 0.2 gramos de cloruro de potasio y 0.2 gramos de cloruro de sodio.

Para la fabricación del cátodo, se disolvieron 5 gramos de carbón y una vez obtenida la pasta, se depositó sobre el lado conductor de la segunda placa de vidrio. Finalmente, para el montaje de la celda solar, se agregó la solución de cloruro de potasio con cloruro de sodio sobre la placa que contiene el pigmento de hueso de aguacate más romero. Se juntaron las dos placas con un pequeño desfase entre ellas en el lado en que ambas fueron teñidas y se sujetó esta celda con ayuda de dos pinzas de folder. Las celdas terminadas se muestran en la Fig. 2.

Para ser evaluadas las celdas fabricadas se colocaron bajo la luz solar de medio día y con un multímetro registraron los valores obtenidos de la celda, como se muestra en la Fig. 3. Este experimento se repitió por triplicado.

Para calcular el Fill Factor y la eficiencia de la celda, se utilizaron las siguientes ecuaciones [9]. El Fill Factor se calcula como la multiplicación de la corriente máxima (I_{max}) por el voltaje máximo (V_{max}), dividida entre el producto del voltaje de circuito abierto (V_{oc}) por la corriente de corto circuito (I_{sc}) [9]. El Fill Factor máximo teórico es Ec. (1) [9].

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{(I_{max} * V_{max})}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (1)$$

La eficiencia de la celda es igual al voltaje de circuito abierto por la corriente de cortocircuito por el Fill Factor, entre la radiación solar por el área [9], descrito en la ecuación Ec. (2).

$$\eta_{ec} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{(V_{oc} * I_{sc} * FF)}{I(t) * A_c} \quad (2)$$



Fig. 2. Celdas solares orgánicas terminadas.



Fig. 3. Medición de la corriente y voltaje de la celda orgánica.

V. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el procedimiento de medición del voltaje y corriente de la experimentación para la Celda Solar Orgánica Sensibilizada con pigmento de hueso de aguacate y pigmento de romero con una matriz de TiO_2 , se llevó a cabo con la ayuda de un multímetro para obtener los datos de corriente y voltaje que se utilizaron para desarrollar la gráfica mostrada en la Fig. 4.

La curva I-V de una celda solar exhibe características distintivas que reflejan su rendimiento eléctrico bajo la influencia de la radiación solar. El punto de circuito abierto (V_{oc}), mostrado en el eje abscisas de la Fig. 4, representa el voltaje máximo que la celda puede alcanzar cuando no hay corriente, indicando su capacidad potencial para generar energía. En contraste, el punto de cortocircuito (I_{sc}), en el eje de las ordenadas, revela la corriente máxima suministrada por la celda cuando el circuito está cerrado. Ambos puntos son esenciales para entender el comportamiento eléctrico de la celda y son fundamentales para calcular la potencia máxima que la celda puede generar. La curva localizada en la parte superior corresponde al día 1, la gráfica intermedia corresponde a los 7 días y la gráfica inferior corresponde a los 14 días.

Con los datos de voltajes corrientes se procedió a realizar la gráfica de potencia contra voltaje dichas curvas son mostradas en la Fig. 5 representan la relación entre el voltaje y la potencia de salida de la celda en diversas condiciones operativas. El punto de Máxima Potencia (MPP) en esta curva destaca el punto óptimo donde la celda solar puede generar la mayor cantidad de energía eléctrica, por tanto, este punto de tiene el voltaje máximo (V_{max}) y corriente máxima (I_{max}). A medida que la carga varía, el seguimiento de la curva voltaje-potencia permite identificar la configuración que maximiza la producción de energía. La forma de esta curva proporciona información valiosa sobre la eficiencia global de la celda solar y su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales.

En la Fig. 4 se presentan los valores de voltaje y corriente máximos registrados en la celda solar durante el primer día después de su montaje, a los 7 días y a los 14 días posteriores. Posteriormente, se aplicaron las ecuaciones específicas para calcular el Factor de Llenado, Ec. (1) y la eficiencia de conversión de energía de la celda (η) mostrada en la ecuación (2), los resultados se encuentran en la Tabla I. Es importante destacar que el área de la celda fabricada fue de 0.0125 m^2 , y la intensidad de radiación, representada por $I(t)$, se mantuvo constante en 1000 W/m^2 como dato adicional, la eficiencia se mantuvo entre el 0.0289 y el 0.0134 por ciento, así como el Fill Factor en valores entre 0.4430 y el 0.0190.

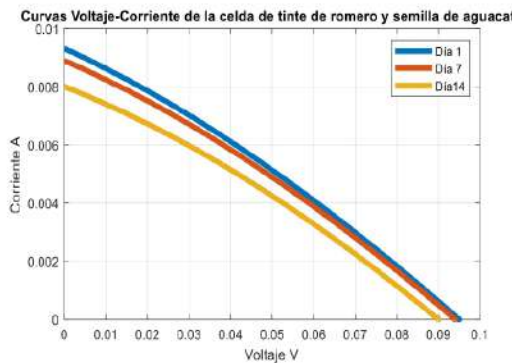


Fig. 4. Curva de voltaje- corriente de la celda solar sensibilizada con pigmento de hueso de aguacate y romero.

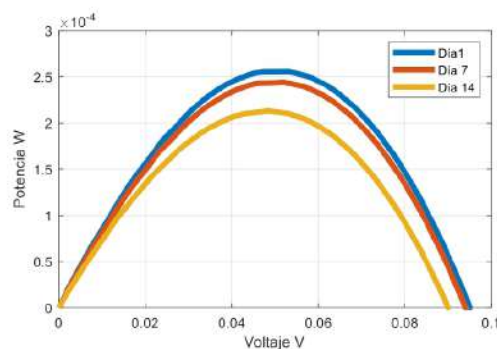


Fig. 5. Curva de Voltaje contra potencia de la celda solar de pigmento de aguacate y romero.

TABLA I. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DEL FILL FACTOR, LA POTENCIA MÁXIMA Y LA EFICIENCIA EN LA CELDA SOLAR ORGÁNICA.

Día	Voc (V)	Isc (A)	Vmax (V)	Imax (A)	FF	η
1	0.094	0.0089	0.05705	0.00635	0.4330	0.0289
7	0.09	0.0080	0.0531	0.00433	0.3196	0.0184
14	0.095	0.0932	0.0483	0.00349	0.0190	0.0134

De acuerdo con un modelo de utilidad previo, desarrollado en el Instituto Tecnológico Superior de Abasco, una celda similar de pigmento semilla de aguacate, pero sin añadir el pigmento de romero, produjo un voltaje de circuito abierto de 1 volt a 0.022 amperes en corto circuito, con una eficiencia del 0.74% [10]. Por tanto, de acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla I, indican que la celda solar orgánica sensibilizada con la mezcla de pigmento de semilla de aguacate con pigmento de romero pierde su eficiencia, por otro lado, aumenta la vida de la celda. Por tanto, los resultados observados, se nota que tanto el Fill Factor como la eficiencia se mantienen, lo que demuestra que la degradación es mínima, preservando las propiedades semiconductoras por más tiempo. Finalmente, el experimento terminó el día 14 debido a que el día 15 la corriente eléctrica cayó a valores mínimos con una corriente inferior a 1 miliamperio (0.001 A).

En contraste con los resultados obtenidos en este estudio sobre una Celda Solar Orgánica Sensibilizada con pigmento de aguacate y pigmento de romero, el estudio de A. Omar en 2021 revela una eficiencia de conversión de energía más alta (1.233%) para una celda sensibilizada con el colorante N719 en el día 15. Sin embargo, la eficiencia de la celda sensibilizada con el colorante Roselle disminuyó del 0.992% al 0.897% entre el quinto y decimoquinto día, principalmente debido a la degradación del colorante y una baja inyección de electrones [11]. Esta comparación resalta las diferentes respuestas ante la degradación en los dos enfoques: mientras que en nuestro estudio se registró una ligera disminución en la eficiencia al añadir pigmento de romero, la vida útil de la celda se duplicó.

En términos de estabilidad a largo plazo, nuestro trabajo guarda similitudes con el documento de Lin de 2015, que observa cambios en el rendimiento de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorantes (DSSCs) con el tiempo. Ambos estudios registran un aumento en el voltaje de circuito abierto (VOC) y una disminución gradual en la corriente de cortocircuito (JSC) a lo largo del tiempo. Mientras que en el estudio de Lin se especula que el aumento en VOC se debe a cambios irreversibles en el potencial de oxidación de la película de TiO₂ [12], nuestro trabajo sugiere que la adición de pigmento de romero puede haber influido en la preservación de propiedades semiconductoras a largo plazo.

Por último, en comparación con el artículo de Wang de 2018, que destaca avances en la estabilidad a largo plazo de celdas solares orgánicas sensibilizadas con colorantes, nuestro estudio difiere en el enfoque de utilizar pigmentos naturales como el romero y la semilla de aguacate [13]. Aunque ambos estudios resaltan la importancia de estrategias para mejorar la durabilidad y el rendimiento sostenible de las celdas solares, nuestro trabajo aporta a la diversidad de enfoques y materiales en la investigación de tecnologías fotovoltaicas orgánicas.

VI. CONCLUSIONES

La confección de la Celda Solar Orgánica Sensibilizada con pigmento de Aguacate ha demostrado ser altamente eficiente, respaldada por estudios previos realizados dentro del instituto. Este resultado positivo subraya la viabilidad de utilizar pigmentos de tinte de hueso de aguacate como sensibilizadores en celdas solares, confirmando su potencial en la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar.

No obstante, al introducir el pigmento de romero como un componente adicional en la celda, se ha observado una disminución en la eficiencia en comparación con las celdas que solo contenían pigmento de semilla de aguacate. Este hallazgo, aunque revela una pérdida leve en la eficiencia de conversión de energía, proporciona valiosos datos sobre la

interacción entre diferentes pigmentos y su impacto en el rendimiento global de las celdas solares orgánicas.

A pesar de la disminución en la eficiencia, un aspecto destacado es que la vida útil de la celda se ha duplicado sin necesidad de reactivación, prolongándose de 7 a 14 días de funcionamiento estable. Esta extensión en la duración operativa podría tener implicaciones significativas en aplicaciones prácticas, destacando la robustez y estabilidad a largo plazo de las celdas solares sensibilizadas con la combinación de pigmentos de aguacate y romero.

Para futuras investigaciones y mejoras en el diseño de estas celdas solares, se sugiere explorar elementos con propiedades antioxidantes que sean compatibles con el extracto de pigmento de hueso de aguacate. Además, se plantea la posibilidad de considerar la implementación de matrices poliméricas que no solo sean estables en conjunto con la pasta de TiO₂, sino que también puedan potenciar las propiedades sensibilizadoras de los pigmentos.

REFERENCIAS

- [1] A. Lozada Gómez, "Análisis de viabilidad para el uso de energía solar en Petróleos Mexicanos".
- [2] Ö. N. S. and D. H. Birel, "Porphyrin-based dye-sensitized solar cells (DSSCs): a review", *Journal of fluorescence*, vol. 27, n° 3, pp. 1075-1085, 2017.
- [3] N. Gomesh, «Investigation of "Keriang" fruit Dye application on the performance of Dye-Sensitized solar cell with anatase-rutile TiO₂ Electrode.» In TENCON 2019-2019 IEEE Region 10 Conference, pp. 608-613, 2019.
- [4] M. F. and E. P. Cerdá, "Caracterización de las antocianinas de la flor de ceibo como sensibilizadores naturales para su uso en celdas fotovoltaicas", *Innotech*, vol. 9, pp. 91-96, 2014.
- [5] P. J. and C. M. Quilez Azuara, P. "Fundamentos, perspectivas presentes y futuras de la utilización de moléculas para la conversión de calor en electricidad", León, Guanajuato: Centro de Investigaciones en Óptica, 2022.
- [6] A. and P. E. Reynal, "Ruthenium polypyridyl sensitizers in dye solar cells based on mesoporous TiO₂," *European Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 2011, n° 29, pp. 4509-4526, 2011.
- [7] H. M. S. S. H. M. H. & K. D. K. Upadhyaya, "Recent progress and the status of dye-sensitized solar cell (DSSC) technology with state-of-the-art conversion efficiencies", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, n° 119, pp. 291-295., 2013.
- [8] K. E. Jasim, "Dye sensitized solar cells-working principles, challenges and opportunities.", *Solar Cells-Dye-Sensitized Devices*, pp. 172-210, 2011.
- [9] G. N. Tiwari, "Solar energy: fundamentals, design, modelling and applications", New Delhi : Alpha Science Int'l Ltd, 2002.
- [10] J. R.-M. Sabas-Segura and R. Anguiano-Moreno, "celda solar organica sensibilizada con pigmentoobtenido a partir del hueso de aguacate". México 2020. modelo de utilidad: MX/u/2020/000410, 11 09.
- [11] A. Omar, M. S et al., "Photovoltaic performances and lifetime analysis of TiO₂/rGO DSSCs sensitized with Roselle and N719 dyes", In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1127, No. 1, p. 012041). IOP Publishing. 2021.
- [12] C. F. Lin, et al., "Lifetime study of Dye sensitized solar cells", 22nd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD). IEEE, 2015. p. 167-170.
- [13] P. Wang, et al., "Stable and efficient organic dye-sensitized solar cell based on ionic liquid electrolyte". *Joule*, vol. 2, no 10, p. 2145-2153, 2018.

BIOGRAFÍAS



CECILIA GUADALUPE CHÁVEZ GUZMÁN Estudiante de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables en el Instituto Tecnológico Superior de Abasco. Se ha destacado notablemente por su participación en diversos Veranos de la Ciencia en la región, así como por la presentación de un artículo en el congreso XLVI Semana Nacional de Energía Solar y en el congreso AMIDIQ XLIV. También ha participado en INNOVATEC y demuestra su compromiso activo en programas de juventud.



OMAR DANIEL CORRAL GARCÍA Maestro en Educación con enfoque en Educación en Línea por la Universidad Virtual del Estado de Guanajuato. Desde el año 2015, desempeña el rol de profesor en la carrera de Ingeniería en Energías Renovables en el Instituto Tecnológico Superior de Abasco. Además de su labor docente, ha participado activamente en proyectos de instalación de paneles fotovoltaicos aislados, destinados a la alimentación de telefonía rural satelital en el estado de Guanajuato. Su experiencia se refleja en su certificación en el estándar de competencia laboral en Instalación de sistemas fotovoltaicos en residencia, comercio e industria, con la clave EC0586 otorgada por la ANCE.



JOSÉ SABÁS SEGURA Maestro en Eficiencia Energética y Energías Renovables por el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec y la Fachhochschule Südwestfalen campus Soest (Alemania), cuenta con una sólida formación internacional. Desde 2015, desempeña el rol de profesor en la carrera de Ingeniería en Energías Renovables en el Instituto Tecnológico Superior de Abasco. Su contribución a la investigación se destaca con la publicación de 10 artículos científicos en revistas nacionales e internacionales con riguroso arbitraje, así como 9 artículos de divulgación científica en varias revistas nacionales. Esta combinación de experiencia académica y compromiso con la investigación reflejan su valioso aporte al campo de las energías renovables.