

CELDA SOLAR DE BAJO COSTO SENSIBILIZADA POR TINTE

LOW-COST DYE SENSITIZED SOLAR CELL

Marco Antonio Borja Tostado¹
Raquel Ramírez Amador (1,2,3*)
Gildardo Tlapechco Meneses¹
Eduardo Mellado Hernández¹
Gustavo Méndez Pérez¹
Jair Cárdenas Flores¹

<https://orcid.org/0000-0002-5577-2337>
<https://orcid.org/0000-0003-0716-4596>
<https://orcid.org/0009-0005-8781-1969>
<https://orcid.org/0009-0008-5936-3195>
<https://orcid.org/0009-0003-6434-0733>
<https://orcid.org/0009-0006-0822-7826>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

¹División de Carrera de Mecatrónica, Universidad Tecnológica de Huejotzingo, Camino Real a San Mateo s/n, C.P:74169, Huejotzingo, Puebla, México.

²Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Puebla. Tercer Carril del Ejido, Serrano s/n, Cuanalá, 72640 Puebla, México.

³Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores y Posgrado en Ciencias en Energías Renovables, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
raqueamador23@gmail.com

RESUMEN

En la Universidad Tecnológica de Huejotzingo, alumnos de la carrera de Mecatrónica fabricaron una celda solar que convierte la luz del sol en electricidad. Para ello, utilizaron materiales simples y de bajo costo que tenían a la mano, como vidrio, óxido de zinc, jugo de zarzamoras, yodo y grafito. El proceso de fabricación fue sencillo: primero, los alumnos depositaron una capa de óxido conductor transparente (FTO) sobre el vidrio. Luego, aplicaron una capa de óxido de zinc. Después, sumergieron la celda en jugo de zarzamoras, que contiene un pigmento que absorbe la luz solar. A continuación, agregaron una solución de yodo, que actúa como electrolito. Por último, colocaron una capa de grafito, que ayuda a que la corriente eléctrica fluya. Los resultados de las pruebas mostraron que la celda solar tiene un voltaje máximo de 100 milivoltios y una corriente máxima de 0.45 miliamperes. Esto significa que la celda puede generar una pequeña cantidad de electricidad, suficiente para alimentar dispositivos electrónicos sencillos, como una calculadora o una linterna.

Palabras clave: celda solar, FTO, óxido de zinc, grafito.

INTRODUCCIÓN

El sol, por su naturaleza de estrella enana amarilla, brinda en forma de distintas longitudes de ondas energía a todo el conjunto de planetas, llamado sistema solar, mismas que dependiendo su longitud de onda, será la energía transmitida por esta (J.L., 2022).

Recordemos que cuando se habla de luz, es el término común de las ondas de radiación electromagnética, por ello es necesario saber y conocer cómo está conformada dicha radiación, puesto que es una onda, y por la relación de Max Planck, se deduce de la

ABSTRACT

At the Technological University of Huejotzingo, students from the Mechatronics program manufactured a solar cell that converts sunlight into electricity. To do this, students used simple and low-cost materials that they had on hand, such as glass, zinc oxide, blackberry juice, iodine, and graphite. The manufacturing process was simple: first, the students deposited a layer of transparent conductive oxide (FTO) on the glass. Then, they applied a layer of zinc oxide. Next, they immersed the cell in blackberry juice, which contains a pigment that absorbs sunlight. Then, they added a solution of iodine, which acts as an electrolyte. Finally, students placed a layer of graphite, which helps the electric current flow. The test results showed that the solar cell has a maximum voltage of 100 millivolts and a maximum current of 0.45 milliamperes. This means that the cell can generate a small amount of electricity, enough to power simple electronic devices, such as a calculator or a flashlight.

Keywords: solar cell, FTO, zinc oxide, graphite.

ecuación 1, que la energía de la onda, E , es directamente proporcional a la frecuencia de esta, f . Lo cual en términos digeribles nos indica que cuanto mayor sea la frecuencia, menos energía obtengamos de esta (J.L., 2022).

$$E=hf \text{ (1)}$$

La relación del sol es sumamente importante para todo organismo vivo dentro del planeta Tierra, ya que, sin ella no habría vida como la conocemos, ni marco alguno para el

surgimiento de los grandes ecosistemas. Es decir, cualquier afectación ocurrida dentro de la distancia recorrida entre el sol y la tierra o el cambio de frecuencia de la luz, haría de la tierra un lugar inhóspito, además de hostil a la vida (Sánchez A continuación, viene el meollo del asunto, la vida como tal, ha sido desarrollada en torno a dicha energía, por ejemplo, las plantas obtienen su fuente de alimentación de los nutrientes encontrados en el suelo del planeta, sin embargo, también obtienen energía del sol a través del famoso proceso químico llamado fotosíntesis, mediante el cual se convierte materia inorgánica en materia orgánica, aprovechando la energía solar para transformarla en energía química (Sánchez-Barajas, V., 2016).

¿Por qué es importante estudiar los procesos de las plantas? Las plantas son capaces de transformar la luz solar en energía química, que utilizan para crecer y reproducirse. Este proceso, llamado fotosíntesis, es uno de los más relevantes de la Tierra, ya que proporciona el oxígeno que respiramos y los alimentos que comemos. Los científicos están estudiando los procesos de las plantas para desarrollar nuevas tecnologías, como las celdas solares. Las celdas solares son dispositivos que convierten la luz solar en electricidad.

¿Qué relación tienen las plantas con las celdas solares? Las plantas utilizan pigmentos, como la clorofila, para absorber la luz solar. Estos pigmentos están presentes en las hojas de las plantas, que son los órganos responsables de la fotosíntesis. Las celdas solares también utilizan pigmentos para absorber la luz solar. Estos pigmentos están recubiertos sobre un material semiconductor, que es un material que conduce la electricidad de forma parcial. Cuando la luz solar incide en los pigmentos, estos liberan electrones. Estos electrones fluyen a través del material semiconductor, generando electricidad.

¿Cómo se relacionan las plantas de frutos rojos con las celdas solares sensibilizadas por tinte? Las plantas de frutos rojos, como las frambuesas, las moras y las zarzamoras, contienen pigmentos que son muy eficientes en la absorción de la luz solar (Pezzotti-Escobar G, 2015). Estos pigmentos se pueden utilizar para fabricar celdas solares sensibilizadas por tinte. Las celdas solares sensibilizadas por tinte son un tipo de celda solar que utiliza pigmentos para absorber la luz solar.

¿Qué son las celdas solares sensibilizadas por tinte? Las celdas solares sensibilizadas por tinte DSSC (Dye Sensitized Solar Cell), son un tipo de celda solar que utiliza pigmentos para absorber la luz solar. El pigmento está recubierto sobre un material semiconductor, que es un material que conduce la electricidad de forma parcial. Cuando la luz solar incide en los pigmentos, estos liberan electrones. Estos electrones fluyen a través del material semiconductor, generando electricidad. Las celdas solares sensibilizadas por tinte son una tecnología relativamente nueva, pero tienen el potencial de ser más baratas y eficientes que las celdas solares tradicionales.

METODOLOGÍA

Una celda solar DSSC, está conformada por una variedad de capas de diversos materiales, las cuales fueron depositadas de diversas formas. En el primer momento de la fabricación de las celdas solares sensibilizadas por colorante, se requieren de dos conductores depositados sobre vidrio, los cuales, van a servir como electrodos, estos van a estar separados por una capa de óxido de zinc (ZnO) (Pezzotti-Escobar G, 2015). Ver Figura 1.

El óxido de zinc (ZnO) y el dióxido de titanio (TiO₂) son dos materiales que se utilizan para fabricar celdas solares sensibilizadas por tinte. Ambos materiales tienen la capacidad

de absorber la luz solar, pero el ZnO tiene una ventaja importante sobre el TiO₂: es un mejor semiconductor.

Los semiconductores son materiales que pueden conducir electricidad, pero no tan bien como los metales. Esta propiedad es fundamental para las celdas solares sensibilizadas por tinte, ya que permite que los electrones generados por la luz solar fluyan a través del material y generen electricidad.

El TiO₂ es un semiconductor, pero no tan bueno como el ZnO. Esto se debe a que el TiO₂ tiene una banda prohibida más grande que el ZnO. La banda prohibida es una región de energía que existe entre los niveles de energía de los electrones de conducción y los niveles de energía de los electrones de valencia. Cuanto más grande sea la banda prohibida, más difícil será para los electrones pasar de los niveles de energía de valencia a los niveles de energía de conducción.

En consecuencia, el ZnO es un semiconductor más eficiente que el TiO₂. Esto significa que las celdas solares sensibilizadas por tinte que utilizan ZnO pueden generar más electricidad que las celdas solares sensibilizadas por tinte que utilizan TiO₂ (Pezzotti-Escobar G, 2015) (Carbó-Vela P.C, 2012).

Además de su mejor rendimiento como semiconductor, el ZnO también es más barato y fácil de fabricar que el TiO₂. Por estas razones, el ZnO es el material preferido para fabricar celdas solares sensibilizadas por tinte.

Otro componente esencial para nuestra celda solar es el tinte, que puede obtenerse a partir de jugo de moras, frambuesas, manzanas, peras, uvas, zarzamoras y ciruelas. Estos frutos contienen una molécula clave llamada antocianina, que posee grupos -OH que se adhieren al óxido de zinc. Este tinte realiza la transferencia de electrones al óxido de zinc al absorber fotones de luz solar.

El electrolito en este proceso es el yodo, un elemento que permite que los electrones se desplacen a través de la celda solar. Cuando una molécula de tinte es impactada por un fotón de luz solar, emite un electrón. Este electrón se desplaza a través del electrolito hasta llegar a la capa de grafito, donde se pierde debido a la oxidación. El electrón perdido es reemplazado por otro proveniente de la capa de zinc. Este ciclo puede repetirse indefinidamente, lo que permite que la celda solar genere electricidad (Carbó-Vela P.C, 2012) (Rafael, Formentín-Vallés, 2013).

Para completar la construcción de la celda solar, es crucial que uno de los electrodos se recubra con un catalizador de grafito. Este catalizador facilita la reducción del mediador yoduro-triyoduro (Rafael, Formentín-Vallés, 2013), asegurando un funcionamiento eficiente y sostenible de nuestra innovadora tecnología solar.

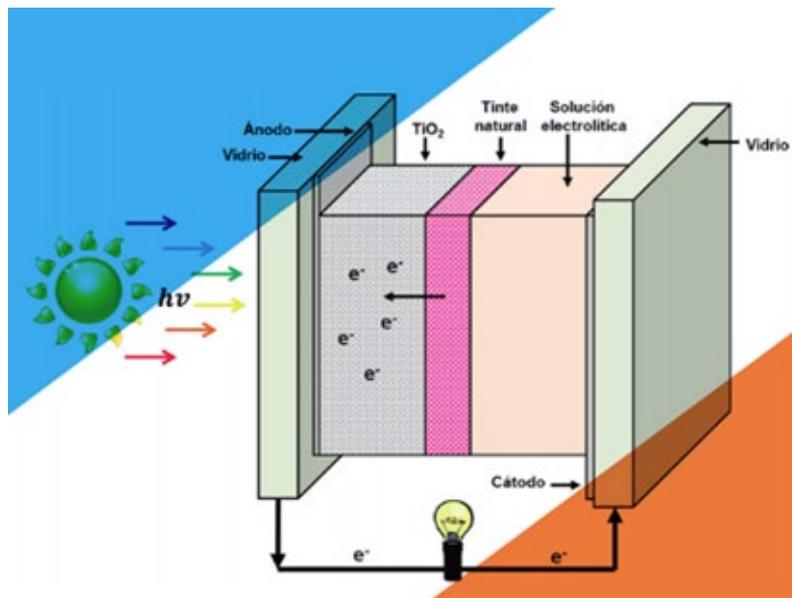


Figura 1. Partes de una celda solar sensibilizada por colorante (Pezzotti-Escobar G, 2015) <https://revista.cidet.org.co/revistas/revista-12/celdas-solares-dssc-tecnologia-prometedora-para-la-produccion-de-electricidad-a-bajo-costo/>

DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO

Una celda solar es un dispositivo fotovoltaico que convierte la luz en electricidad. Utiliza colorantes orgánicos para absorber la luz solar, generando corriente eléctrica. En primer lugar, el proceso comienza con el colorante entrando en un estado excitado (D^*) al absorber luz visible en su banda de absorción, cuyo punto máximo se ubica en 535 nm. En segundo lugar, el colorante libera electrones en la banda de conducción del ZnO , adquiriendo una carga positiva (D^+). Estos electrones viajan a través de la red nano-cristalina del ZnO hasta alcanzar el sustrato conductor, donde acceden al circuito externo.

Simultáneamente, el colorante regresa a su estado original al capturar electrones de los iones I^- presentes en el electrolito, formando

así I_3^- . Estos iones I_3^- se regeneran en el contraelectrodo, una reacción catalizada por la presencia de un recubrimiento FTO en el ánodo, cerrando de esta manera el circuito. Estas transferencias de carga son posibles gracias a las diferencias en los niveles energéticos de los componentes de la celda.

Es importante destacar que, a diferencia de las celdas solares convencionales basadas en uniones P-N de silicio, en las celdas semiconductoras con colorante, los procesos de absorción y transporte electrónico ocurren en regiones separadas de la celda, operando de manera independiente (Carbó-Vela P.C, 2012) (J.A, 2012). Este enfoque novedoso contribuye a la eficiencia y versatilidad de nuestra tecnología solar.

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Los electrodos fueron preparados mediante la técnica de rocío pirolítico ultrasónico utilizando como sustrato vidrios conductores recubiertos con una película de óxido de estaño dopado con flúor ($\text{SnO}_2:\text{F}$), (dichas películas fueron caracterizadas previamente) (Ramírez-Amador R, 2019) (Malik O, 2015). Sobre la cual se depositó una capa de 5-10 micras de grosor de ZnO . Sobre la superficie del semiconductor se encuentra absorbido un colorante natural a base de zarzamora. Se ha reportado pinturas orgánicas que contienen la molécula conocida como antocianina extraída de la pigmentación de las frambuesas, manzanas, peras, uvas, zarzamoras, ciruelas, y semillas de granada: también de flores, como la jamaica y rosas, verduras, como col y maíz morados, y de las hojas verdes de los cítricos de donde se extrae la clorofila, cabe recalcar que no todo lo que tiene pintura orgánica, como las fresas contienen esta molécula. El electrodo se encuentra sumergido en un electrolito que, siendo líquido, puede embeber completamente la estructura porosa del óxido, por último, el contra electrodo es otro sustrato conductor cubierto por una película delgada de grafito (Rica, 2022).

En la figura 2 se muestran los materiales empleados para la construcción de la celda solar sensibilizada por tinte, como son sustratos de vidrio con películas de FTO, pasta de Lassar para obtener el óxido de zinc, zarzamoras para el colorante, tintura de yodo para formar el electrolito y para obtener el catalizador fue con grafito.



Figura 2. Materiales empleados para la fabricación de la celda solar sensibilizada por tinte. Elaboración propia.

Los distintos elementos que conforman esta celda DSSC se pueden visualizar en la Figura 2. Mediante el uso de la instrumentación, específicamente hablando de electricidad, se procedió a realizar la caracterización de nuestros resultados finales, es decir se realizaron mediciones de diferencia de potencial, intensidad eléctrica, potencia eléctrica en función del tiempo, con el fin de poder analizar cómo se comporta la celda solar, así como afirmar o refutar el éxito conseguido.

En la Figura 3, se observa la celda DSSC con diámetro aproximado de 3 x 2.5 cm, de la cual fue posible obtener los resultados de la caracterización que se presentan en la tabla 1, donde se mide el voltaje y corriente generada con ésta en el transcurso del día (figura 4 y figura 5). En las tablas 1, y 2 y figuras 5,6, y 7 es posible apreciar la cantidad de voltaje y corriente generada por la celda a diferentes horas del día, donde se puede apreciar que obtenemos mayor cantidad de voltaje y corriente durante el cenit y poco después de éste (12 – 1:30 pm), ya que es el lapso de tiempo del día con mayor potencia de radiación solar.

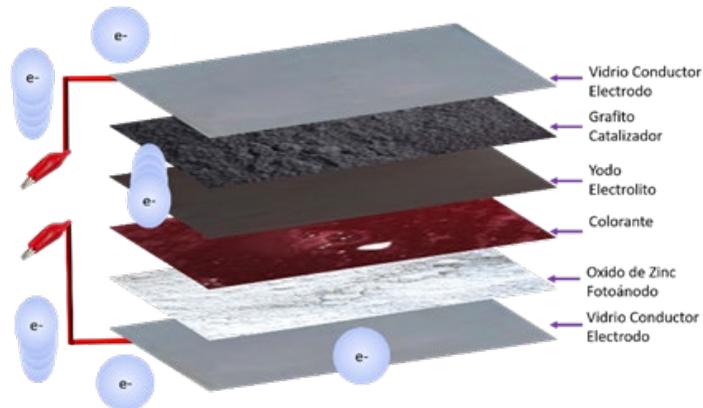


Figura 3. Proceso de elaboración de la celda solar sensibilizada por tinte.



Figura 4. Celda solar obtenida. Fotografía de la medición. Elaboración propia

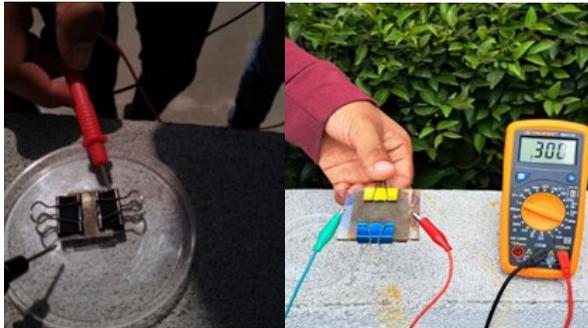


Figura 5. Mediciones de la celda solar a diferentes horas del día. Por Los autores

Hora	Voltaje placa DSSC (Volts)	Corriente(mA)
12:00	0.1	0.0001
01:30	0.104	0.0005
02:30	0.071	0.00045
03:30	0.06	0.0003
04:30	0.07	0.0001

Tabla 1. Mediciones de voltaje contra la hora de medición.



Figura 6. Gráfica de voltaje contra la hora de medición.

Hora	Potencia(Watts)
12:00	0.00001
01:30	0.000052
02:30	0.00003195
03:30	0.0000018
04:30	0.000007

Tabla 2. Mediciones de corriente contra la hora de medición.



Figura 7. Gráfica de corriente contra la hora de medición.

Figura 8. Gráfica de la potencia obtenida contra la hora de medición.

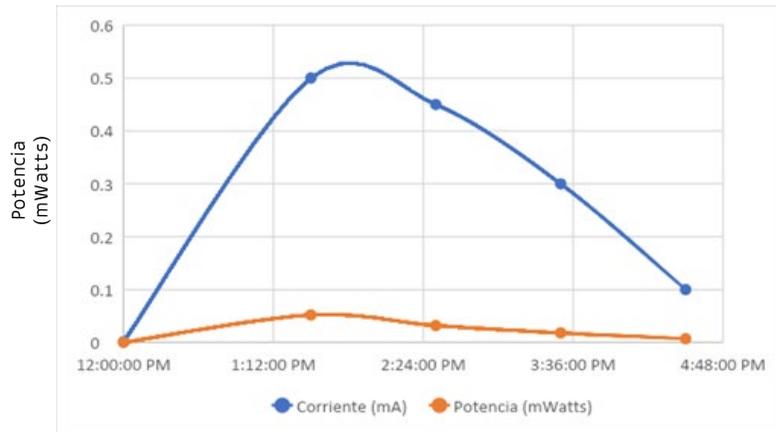


Figura 9. Gráfica de potencia contra corriente generada por la celda.

Conclusiones

El presente trabajo se centra en reemplazar la energía no limpia con alternativas. Al explorar estudios previos, se descubren diversas posibilidades. Para lograr un progreso óptimo, es esencial observar, experimentar, probar, medir y analizar, generando así conclusiones objetivas y comprobables que guiarán el desarrollo del prototipo final.

En una primera etapa, se recopiló información; ahora, nos enfocamos en la creación de un prototipo funcional, dando paso a la siguiente etapa: la experimentación. Durante la creación del prototipo, se enfrentaron desafíos prácticos no anticipados en la fase teórica, como la sensibilidad de los materiales. A pesar de conocer la fragilidad del material de trabajo, se produjeron daños, algunos irreparables, convirtiendo conocimiento intangible en una experiencia tangible.

Este trabajo revela dos factores clave en las celdas solares tipo DSSC, directamente relacionados con la eficiencia de un sistema completo. La información sobre las DSSC, su relación con la fotosíntesis natural de las plantas verdes, y la combinación de semiconductor y electrolito, permitió la creación de una celda solar fotoelectroquímica. Este enfoque ofrece una forma más práctica y sencilla de conversión fotovoltaica en comparación con otros métodos. En resumen, estamos abriendo nuevas posibilidades en la generación de energía limpia mediante un proceso innovador y eficiente.



Figura 10. Grupo de participantes del trabajo aquí presentado

En la fotografía, se muestra a los estudiantes que realizaron el proyecto de celda solar sensibilizada por tinte de bajo costo, la cual fue fabricada en el laboratorio de películas delgadas de la carrera de Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Huejotzingo, el nombre de cada uno de los participantes es: Marco Antonio Borja Tostado, Jair Cárdenas Flores, Gustavo Méndez Pérez, Raquel Ramírez Amador, Gildardo Tlapechco Meneses, Brandon Orduño Zambrano y Eduardo Mellado Hernández (de izquierda a derecha).

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros. Así como, los datos de este artículo y los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.⁴

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue asesorado por la investigadora Raquel Ramírez Amador y se contó con el apoyo de los Doctores Salvador Alcántara Iniesta y José Joaquín Alvarado Pulido del Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores perteneciente al ICUAP, quienes nos brindaron su apoyo para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Biblioteca, U. (2020). BiblioGuías. (Universidd Autónoma de Madrid) Recuperado el 08 de 2021, de https://biblioguias.uam.es/citar/estilo_apa_7th_ed
- Cárbo Vela, P. C., & Rocha Rangel, E. (2012). Proceso electroquímico en celdas solares sensibilizadas. *Investigación y Ciencia*, 20(56), 3-10.
- Carbó-Vela P.C, R.-R. E. (2012). Proceso electroquímico en celdas solares sensibilizadas con un colorante natural. *Investigación y Ciencia*, 3-10.
- El Blog de Franz. (4 de Abril de 2022). El sol y su importancia. Obtenido de El sol y su importancia: <https://acolita.com/el-sol-y-su-importancia/>
- intruments, N. (26 de 09 de 2021). ¿Qué es LabVIEW? Obtenido de <https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>: <https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>
- J.A, D.-R. (Septiembre de 2012). Construcción de una celda solar tipo Grätzel empleando electrodos de TiO₂ nanoparticulado entintados con extracto de fruto garambullo. Obtenido de Construcción de una celda solar tipo Grätzel empleando electrodos de TiO₂ nanoparticulado entintados con extracto de fruto garambullo: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/309/1/Construcci%C3%B3n%20de%20una%20celda%20solar%20tipo%20Gratzel%20empleando%20electrodos%20de%20TiO2%20nanoparticulado%20entintados%20con%20extracto%20de%20fruto%20de%20garambullo%20%28M>
- J.L., F. (4 de Abril de 2022). La Luz como Onda Electromagnética. Obtenido de La Luz como Onda Electromagnética: <https://www.fisicalab.com/apartado/luz-y-ondas-em>
- Malik O, D. I.-W. (2015). Fluorine-doped tin oxide films with a high figure of merit fabricated by spray pyrolysis. *Journal of Materials Research*, 2040-2045.
- Pezzotti-Escobar G, A.-A. C.-T.-V.-C.-A. (2015). Celdas Solares DSSC, tecnología prometedora para la producción de electricidad a bajo costo. *Revista CIDET*, 55-66.
- Rafael, Formentín-Vallés. (2013). “Estudio de las características electrónicas de dispositivos fotovoltaicos moleculares: células Gratzel. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/36015/MEMORIA.pdf?sequence=>
- Ramírez-Amador R, F.-C. G.-I.-G.-T.-A.-O. (2019). Structural, morphological, optical, and electrical characterization of fluorine doped tin oxide thin films synthesized by PSP. In *Solid State Phenomena*, 64-71.
- Sánchez-Barajas, V. (2016). Importancia de La Fotosíntesis para la Vida en la Tierra.
- Rica, U. d. (Dirección). (2022). Creación de Celdas Solares [Película].
- SPIE. (2020). SPIE proceedings manuscript sample. SPIE, 1-5.
- UAM, B. (2020). BiblioGuías. (Universidad Autónoma de Madrid) Recuperado el 8 de 2021, de https://biblioguias.uam.es/citar/estilo_ieee