

ESTUDIO DE CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE DIFERENTES
CONFIGURACIONES DE CELDAS SOLARES EMERGENTES

FERNANDO CALDERÓN GÓMEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2024

ESTUDIO DE CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE DIFERENTES
CONFIGURACIONES DE CELDAS SOLARES EMERGENTES

FERNANDO CALDERÓN GÓMEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

PhD. Camilo Andrés Otálora Bastidas

Codirector

Dra. Mónica Andrea Botero Londoño

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA

2024

DEDICATORIA

A mi padre Valentín Calderón Guevara, a mi madre Lilia Gómez Gómez, a mi hermana Cindy Calderón y a mi hermano Jesús Calderón quien en estos momentos nos acompaña de forma espiritual; gracias por ser esas personas que están siempre conmigo en todo momento, por la motivación y el aliento que me brindan a diario que le da el impulso a mi vida. Los amo hoy siempre.

A mi pareja y pronto mi esposa Yurleisy Gabriela Manrique, gracias por darme dos bendiciones; nuestros hijos Sara Valentina y Jesús Adrián, quienes me apoyan día a día incondicionalmente y son mi voz de aliento para poder cumplir el sueño de ser Ingeniero Electricista de esta prestigiosa Universidad Industrial de Santander, a ellos mil y mil gracias por brindarme esta oportunidad y permitirme labrar un mejor futuro. Los amo con el alma.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis Camilo Andrés Otalora y codirectora Mónica Andrea Botero por ser mi guía en esta etapa de proyecto de grado, gracias por su infinita paciencia, por sus acertados consejos y por todo el entusiasmo que me transmitieron en momentos oportunos, gracias por compartir sus conocimientos, experiencias, sabiduría, su tiempo, sus ideas, etc. Infinitas gracias porque aprendí de ustedes mucho.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO TEORICO.....	17
3. ESTADO DEL ARTE	21
3.1 TECNOLOGÍAS DE CELDAS SOLARES	22
3.1.1 Primera generación	23
3.1.2 Segunda generación	25
3.1.3 tercera generación	27
4. CELDAS SOLARES EMERGENTES FUNCIONAMIENTO Y CONCEPTOS GENERALES	28
4.1 CELDA SOLAR DE SULFURO DE ESTAÑO, ZINC Y COBRE (CZTS) Y DERIVADOS CON SELENIURO (CZTSe) Y SULFURO Y SELENIURO (CZTSSe) DENOMINADAS COMO CELDAS SOLARES INORGÁNICAS (BASADAS EN KESTERITAS).....	28
4.2 CELDA SOLAR SENSIBILIZADA POR COLORANTE (DSSC)	31
4.3 CELDA SOLAR ORGANICA	36
4.4 CELDA SOLAR DE PEROVSKITA	41
4.5 CELDA SOLAR DE PUNTO CUÁNTICO (QUANTUM DOTS) (QDSC)	45
5. CELDAS SOLARES EMERGENTES: RETOS Y ESTRATEGIAS INNOVADORAS ..	48

5.1 CELDA SOLAR DE SULFURO DE ESTAÑO, ZINC Y COBRE (CZTS) Y DERIVADOS CON SELENIURO (CZTSe) Y SULFURO Y SELENIURO (CZTSSe) DENOMINADAS COMO CELDAS SOLARES INORGÁNICAS (BASADAS EN KESTERITAS).....	48
5.2 CELDA SOLAR SENSIBILIZADA POR COLORANTE (DSSC)	49
5.3 CELDA SOLAR ORGÁNICA	51
5.4 CELDA SOLAR DE PEROVSKITA	52
5.5 CELDA SOLAR DE PUNTO CUÁNTICO (QUANTUM DOTS) (QDSC)	54
 6. CELDAS SOLARES EMERGENTES: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y FÍSICAS	 55
 7. CONCLUSIONES.....	 57
 BIBLIOGRAFÍA	 59

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Celdas solares convencionales: Monocristalinas y Policristalinas.....	24
Cuadro 2. Celda solar basada en silicio amorfo.....	25
Cuadro 3. Celda solar basada en cobre, indio, galio, seleniuro y telurio de cadmio	26
Cuadro 4. Características eléctricas y físicas de celdas de tercera generación (emergentes).....	56

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Curva I-V, con y sin iluminación	18
Figura 2. Circuito que modela la curva I-V	20
Figura 3. Consumo de energía a nivel mundial	21
Figura 4. Efecto fotovoltaico de una celda solar	22
Figura 5. Funcionamiento celda solar inorgánica	30
Figura 6. Celda solar sensibilizada por colorante	32
Figura 7. Estructura esquemática de las celdas sensibilizadas por colorante	33
Figura 8. Celda solar orgánica	37
Figura 9. Celda solar orgánica	39
Figura 10. Estructura solar orgánica BHJ.....	40
Figura 11: Celda solar de perovskita	43
Figura 12: Estructura de celda solar de perovskita	44
Figura 13. Celdas solares de puntos cuánticos.....	46

Figura 14. Características eléctricas y físicas de celdas solares emergentes.....55

GLOSARIO

FF: factor de llenado.

JSC: densidad de corriente de cortocircuito.

PCE: eficiencia.

VOC: tensión de circuito abierto

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES DE CELDAS SOLARES EMERGENTES*

AUTOR: FERNANDO CALDERÓN GÓMEZ**

PALABRAS CLAVE: CELDAS SOLARES EMERGENTES, CELDAS SOLARES CONVENCIONALES, EFICIENCIA (PCE), DENSIDAD DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (JSC), TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO (VOC), FACTOR DE LLENADO (FF).

DESCRIPCIÓN: Este trabajo de grado se enfoca en el estudio de las principales configuraciones de celdas solares emergentes investigadas hoy, así como de sus características eléctricas y físicas. Con esta investigación, se busca identificar las estrategias más empleadas y prometedoras enfocadas en mejorar el rendimiento y estabilidad, así como en reducir el costo de producción de estas tecnologías. Para ello se realizó una profunda búsqueda bibliográfica, se llevaron a cabo estudios comparativos con base en los resultados reportados y se aportó en la creación de bases de datos de información académica disponible en relación con las tecnologías fotovoltaicas emergentes.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: PhD. Camilo Andrés Otorola Bastidas. Codirector: Dra. Mónica Andrea Botero Londoño.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF DIFFERENT EMERGING SOLAR CELL CONFIGURATIONS*

AUTHOR: FERNANDO CALDERÓN GÓMEZ**

KEY WORDS: EMERGING SOLAR CELLS, CONVENTIONAL SOLAR CELLS, EFFICIENCY (PCE), SHORT CIRCUIT CURRENT DENSITY (JSC), OPEN CIRCUIT VOLTAGE (VOC), FILL FACTOR (FF).

DESCRIPTION: This degree work focuses on the study of the main configurations of emerging solar cells investigated today, as well as their electrical and physical characteristics. With this research, we seek to identify the most used and promising strategies focused on improving the performance and stability, as well as reducing the production cost of these technologies. To this end, a thorough bibliographic search was conducted, comparative studies were carried out based on the results reported, and a contribution was made to the creation of databases of academic information available on emerging photovoltaic technologies.

*Degree work

** School of Physical and Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Electrical Engineering. Director: PhD. Camilo Andrés Otalora Bastidas. Co-director: Dr. Mónica Andrea Botero Londoño.

INTRODUCCIÓN

“La energía es una necesidad indispensable para el desarrollo de la civilización humana. A nivel mundial, el crecimiento de la población y el mayor acceso a tecnología, han elevado la demanda de energía las últimas décadas. La energía fósil es una de las más utilizadas para cumplir necesidades diarias implicando liberación de inmensas cantidades de CO₂ que conduce a un equilibrio insostenible entre los seres humanos y la naturaleza. Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías de energía renovable son una estrategia para continuar con el desarrollo económico y de bienestar humano a la vez que se disminuye el impacto ambiental en pro de una sostenibilidad a futuro”¹

“Las energías renovables y de bajo impacto ambiental son cruciales para la sustitución de tecnologías convencionales de generación de energía eléctrica que implican grandes afectaciones climáticas. La energía solar fotovoltaica es la alternativa energética de mayor crecimiento en los últimos años a nivel mundial”². En países como Colombia, con un gran potencial solar, la energía solar es de gran importancia estratégica para la diversificación en la generación de energía eléctrica. “La tecnología solar fotovoltaica (FV) ofrece una solución económica y sostenible al reto del aumento de la energía demandada en tiempos de calentamiento global; existen tecnologías fotovoltaicas ya disponibles en el mercado denominadas como celdas solares convencionales (de primera y segunda generación), sin embargo; en la búsqueda de la masificación de generación solar fotovoltaica, se deben continuar los esfuerzos por mejorar la relación eficiencia/costo de estas tecnologías.

¹ AVANCES EN CELDAS SOLARES EMERGENTES [en línea]. Estados Unidos: publicado en línea el 17 de marzo de 2020-. [Fecha de consulta: 14 de agosto 2022]. p.5. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7153392/>

² Ibíd., p.20.

En el marco de estas problemáticas surgen las conocidas como tecnologías fotovoltaicas emergente (o de tercera generación) que pretenden mejorar la eficiencia de foto conversión a la vez que se disminuyen los costos de producción para sustituir o complementar a las tecnologías de primera y segunda generación”³. Existe una clara necesidad de hacer que la producción de energía sea de bajo costo, fácil acceso y que tenga bajo impacto ambiental.

Las celdas solares son dispositivos de conversión de energía solar (una fuente renovables, sostenibles y prácticamente inagotables) en energía eléctrica, lo que hace que esta tecnología se considere dentro del grupo de energías no contaminantes, llamadas energías limpias o verdes. En particular las celdas solares emergentes han recibido mucha atención, porque estas en comparación con las celdas solares de silicio tradicionales, prometen ser menos costosas, más livianas, más flexibles y portátiles. A pesar de estas características, existen algunos desafíos que se deben solucionar para hacer viable la comercialización de estas tecnologías. Muchos de estos retos tecnológicos se relacionan con la búsqueda de altas eficiencias de fotoconversión, bajo costo, bajo impacto ambiental y largos tiempos de vida útil para los dispositivos.

Dentro de las tecnologías fotovoltaicas convencionales se identifican las de primera generación las cuales son: silicio monocristalino y silicio policristalino; las de segunda generación caracterizadas por su película delgada se encuentran, celdas basadas en materiales como: CdTe, CIGS y Silicio amorfo (a-Si).

³ INTEGRACIÓN DE LAS ENERGIAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES EN COLOMBIA [en línea]. Colombia: publicado en Bogotá el 2015 con convenio ATN/FM-12825-CO-. [Fecha de consulta: 20 de agosto 2022]. Cap.2. p.40. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

Este trabajo de grado se enfoca en el estudio de tecnologías fotovoltaicas emergentes que incluyen: celdas solares sensibilizadas con colorante (Dye Sensitized Solar Cell-DSSC), celdas solares de perovskita (celdas de única unión y tándem), celdas orgánicas (celdas de única unión y tándem), celdas inorgánicas (basadas en kesteritas) y celdas de puntos cuánticos (quantum dots Solar Cell).

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar las características eléctricas (PCE, JSC, VOC, FF) de diferentes configuraciones de celdas solares emergentes con base en información bibliográfica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar estudio comparativo de características eléctricas y físicas de celdas solares emergentes.

Identificar estrategias innovadoras empleadas para mejorar las características eléctricas de celdas solares emergentes.

Construir una base de datos con características eléctricas y físicas disponibles en literatura sobre celdas solares emergentes.

2. MARCO TEORICO

Como dice Oscar Perpiñán Lamigueiro ⁴, un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que producen directamente energía eléctrica a partir de la radiación solar (Lamigueiro, Colmenar, & Castro, 2012). Esta radiación es la energía que emite el sol en forma de ondas electromagnéticas y se encuentra formada principalmente por luz visible, rayos ultravioletas y rayos infrarrojos, los cuales pueden ser clasificados dependiendo en el ángulo que golpee la tierra en radiación directa, difusa y reflejada. A esta cantidad de radiación solar por unidad de área se le denomina irradiancia, y su unidad de medida es Watt por metro cuadrado (W/m^2).

El módulo solar es el dispositivo básico y esencial de cualquier instalación fotovoltaica que se distribuye comercialmente y consta de varias celdas fotovoltaicas o celdas solares. Las celdas solares son dispositivos semiconductores que utilizan el efecto fotovoltaico para generar energía eléctrica. Por medio de este efecto, una unión de semiconductores es capaz de generar separación y transporte selectivo de cargas eléctricas fotogeneradas luego de la absorción de radiación solar ⁵.

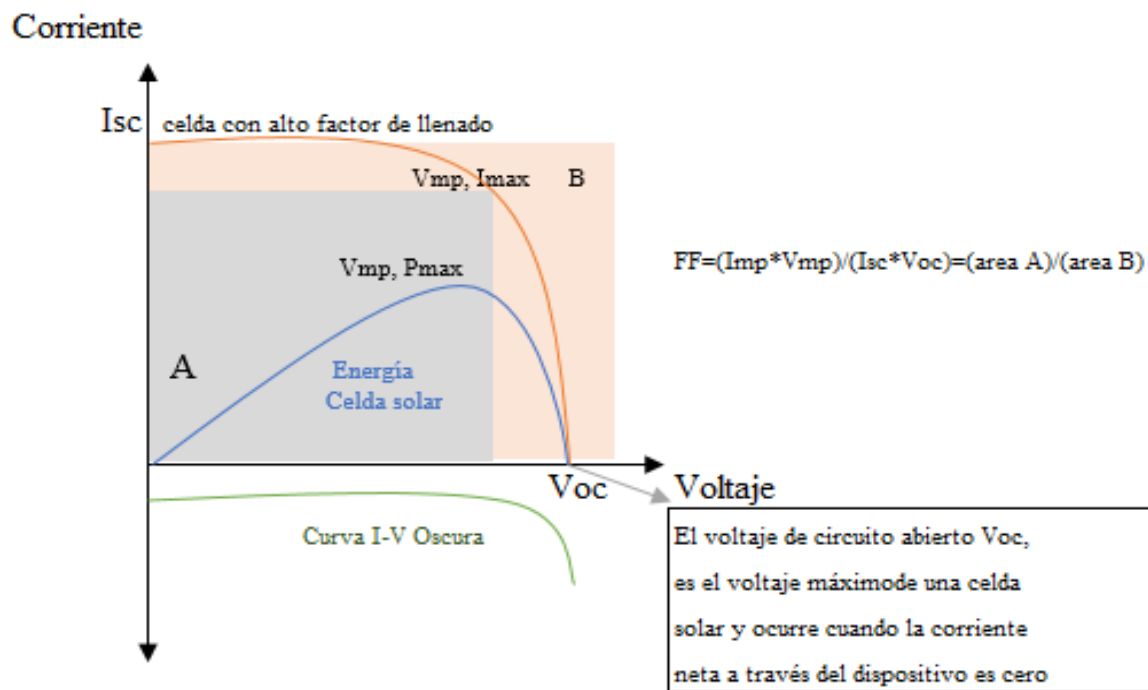
El rendimiento de las celdas solares se evalúa mediante cuatro parámetros básicos: corriente de cortocircuito (I_{sc}), voltaje de circuito abierto (V_{oc}), factor de llenado (FF) y eficiencia de fotoconversión (PCE). Estos parámetros son extraídos de la curva de caracterización corriente- tensión iluminada (I-V) que se miden experimentalmente a cada celda solar.

⁴ OSCAR PERPIÑÁN LAMIGUEIRO, Energía Solar Fotovoltaica, España. 2023.C.1. P.15. [en línea]. Disponible en: <https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>

⁵.Ibid.,c.5.p.57.

Todos los procedimientos y métodos utilizados experimentalmente para medir la característica I-V de dispositivos fotovoltaicos, están basados en controlar la tensión aplicada al dispositivo fotovoltaico bajo polarización inversa y medir la corriente generada por este. Por ello se emplea una carga variable conectada en los dos terminales del mismo dispositivo. Dado lo anterior se emplea experimentos sin iluminación y con iluminación se puede ver en la figura 1. Para analizar el comportamiento de la curva I-V.

Figura 1. Curva I-V, con y sin iluminación



Fuente: elaboración propia. Corriente producida en la celda (línea naranja) y la potencia (línea azul) como función de la tensión, la (línea verde) es la corriente cuando no hay iluminación.

⁶ VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO [en línea]. Colombia: publicado en línea el 10 de marzo de 2006-. [Fecha de consulta: 20 de septiembre 2022]. p.1. Disponible en: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lula-solar/voltaje-de-circuito-abierto>

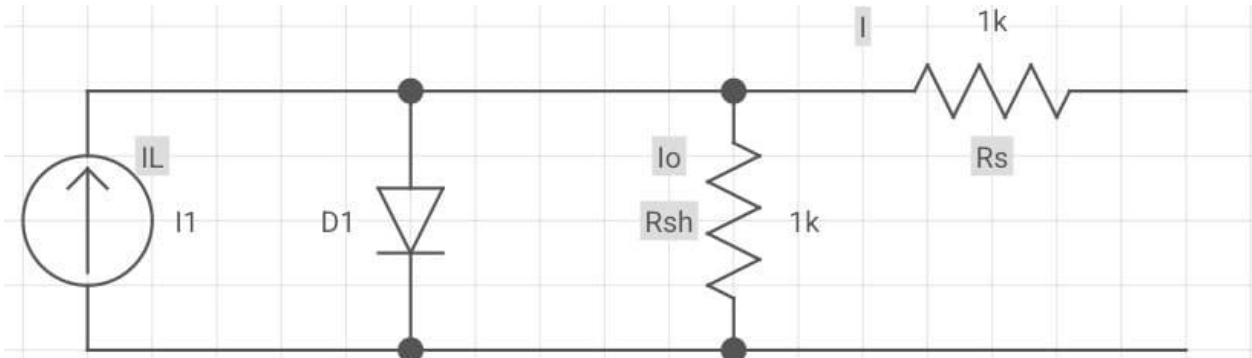
Los parámetros que se observan en la curva I-V son los siguientes: “ V_{oc} es la tensión de circuito abierto que es la tensión máxima disponible de una celda solar y se produce cuando la corriente es cero, esta corresponde a la cantidad de polarización inversa aplicada sobre la celda solar para cancelar la corriente fotogenerada por el dispositivo al ser iluminado”⁶, “ I_{sc} es la corriente que pasa a través de una celda solar, cuando esta está en la condición de cortocircuito. Considerando la dependencia del área del dispositivo se calcula la densidad de corriente de cortocircuito o J_{sc} ($J_{sc} = I_{sc} / \text{Área}$). FF se define como la relación entre la máxima densidad de potencia extraíble de la celda solar y el producto de J_{sc} y V_{oc} ; La máxima corriente y tensión de una celda solar es la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto, sin embargo, en ambos de estos puntos de funcionamiento, la potencia de la celda solar es cero. El factor de llenado (FF) es un parámetro que, en conjunto con V_{oc} y I_{sc} , determina la potencia máxima de una celda solar, por lo tanto; se define como la relación de potencia máxima de la celda solar para el producto de estos dos. Gráficamente (Ver figura 1) el FF es una medida de la “cuadratura” de la curva I-V de la celda solar y también es el área del rectángulo más grande que se ajuste en la curva I-V, estimando de esta forma la cercanía de la celda real con el desempeño ideal”⁷. Otra forma de entender el factor de llenado (FF) es mediante la siguiente ecuación.

$$FF = FF_0(1 - r_s) \left(1 - \frac{1}{r_{sh}}\right) = \frac{(V_{mp} * I_{mp})}{(V_{oc} * I_{sc})}$$

“En donde FF_0 es FF ideal, r_s y r_{sh} son resistencias normalizadas dadas por: $r_s = \frac{R_s}{R_{CH}}$, $r_{sh} = \frac{R_{sh}}{R_{CH}}$, $R_{CH} = \frac{V_{oc}}{J_{sc}}$; y por lo tanto, un R_{sh} mas grande y un R_s mas pequeño conducen a un FF más grande, siendo R_{sh} la resistencia de derivación (shunt), y R_s la resistencia en serie, lo anterior se puede entender mejor en el circuito que modela la curva I-V mostrado a continuación:

7 FACTOR DE LLENADO Y CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO [en línea]. Colombia: publicado en línea el año 1981-. [Fecha de consulta: 20 de septiembre 2022]. p.1. Disponible en: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lula-solar/factor-de-llenado>

Figura 2. Circuito que modela la curva I-V



Fuente: elaboración propia.

Donde la ecuación del anterior circuito es:

$$I = I_L - I_o * e^{\frac{q*(V+I*Rs)}{n*k*T}} - \frac{(V + I * Rs)}{(Rsh)}$$

I es la corriente de celda solar, I_L es la corriente que generan los fotones que inciden en la celda, I_o es la corriente de saturación inversa, q es la magnitud de la carga del electrón, k es la constante de Boltzman, T es la temperatura, R_s es la resistencia en serie, R_{sh} es la resistencia en paralelo y n una constante. Los valores R_s y R_{sh} son obtenidos a partir de un ajuste numérico de la curva descrita en la ecuación anterior con respecto a los datos experimentales de la curva I-V de la celda solar⁸.

Sin lugar a duda, el parámetro más importante para medir el desempeño de una celda solar fotovoltaica es la eficiencia (PCE: eficiencia de fotoconversión) que se define a partir de la relación entre la potencia de salida de las celdas solares y la potencia de entrada (potencia lumínica) del sol.

⁸ MODELADO Y CARACTERIZACION DE PANELES FOTOVOLTAICOS [en línea]. Mexico ciudad de Chihuahua: publicado en mayo del 2013-. [Fecha de consulta: 28 de septiembre 2022]. p.44. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2338/1/ROBERTO%20HERRERA%20SALCEDO.pdf>

$$PCE = \frac{Pm}{Pin} * 100\% = \left(\frac{V_{oc} * J_{sc} * FF}{Pin} \right) * 100$$

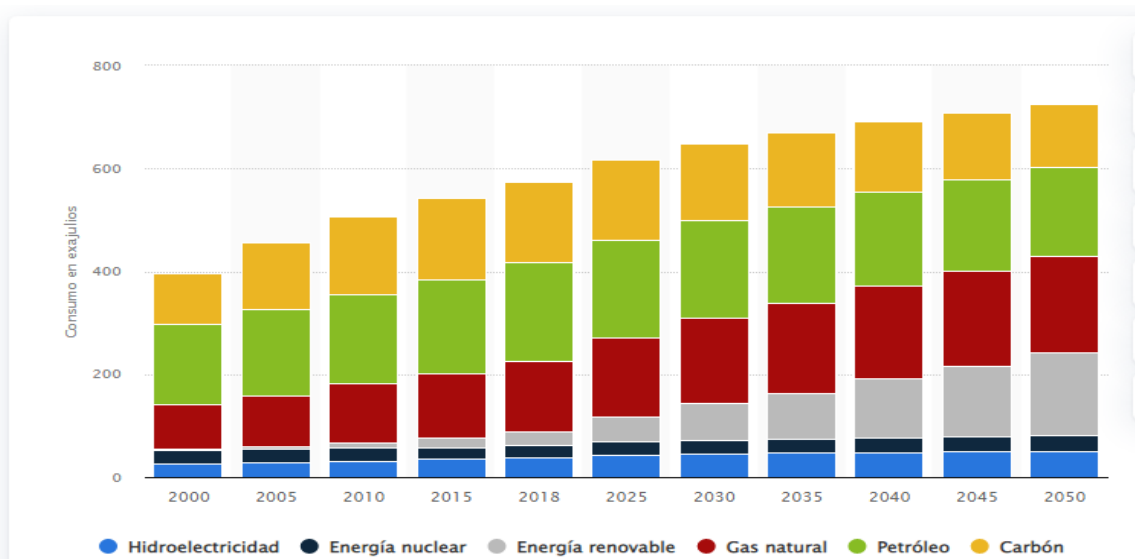
Donde: Pm es la potencia eléctrica máxima de salida y Pin es la potencia lumínica de incidente (igual a 1000 W/m² para la radiación de prueba estándar o que puede ser medida en un experimento en campo con el uso de un piranómetro).

A lo largo del presente documento identificaremos los parámetros eléctricos de diferentes celdas solares emergentes reportadas en las más recientes publicaciones.

3. ESTADO DEL ARTE

A nivel mundial, el aumento del crecimiento poblacional, el mayor acceso tecnológico y un incremento en el nivel de vida de las personas han elevado la demanda de energía las últimas décadas. En la siguiente (figura 3) se puede ver el consumo de energía a nivel mundial desde el año 2000 y prolongándose hasta el año 2050.

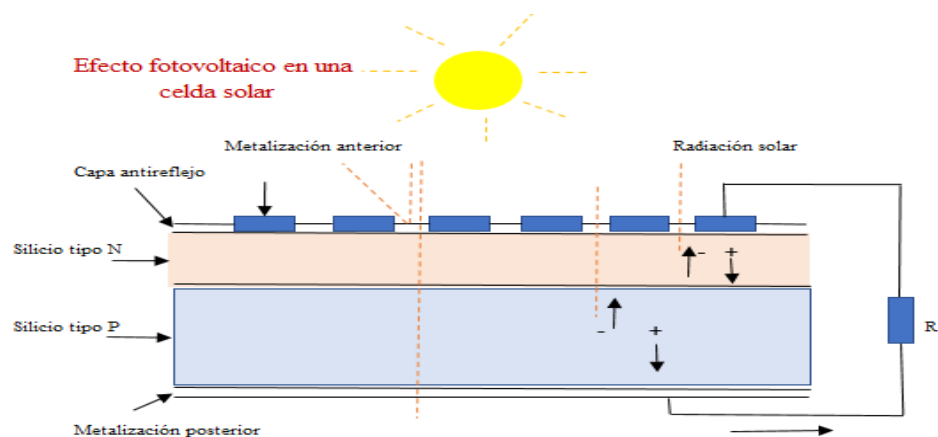
Figura 3. Consumo de energía a nivel mundial



Fuente: CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA DE 2000 A 2050. Según statista. [en línea].
Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/634593/consumo-global-de-energia-por-fuente/>

Las celdas solares comúnmente conocidas como celdas fotovoltaicas son dispositivos que convierten la energía solar en corriente continua (cc). Cuando estos dispositivos se exponen a la luz solar los fotones son absorbidos, se generan portadores de carga y la corriente eléctrica comienza a fluir gracias a la unión de dos semiconductores que dirigen de manera ordenada el movimiento de cargas, como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 4. Efecto fotovoltaico de una celda solar



Fuente: elaboración propia.

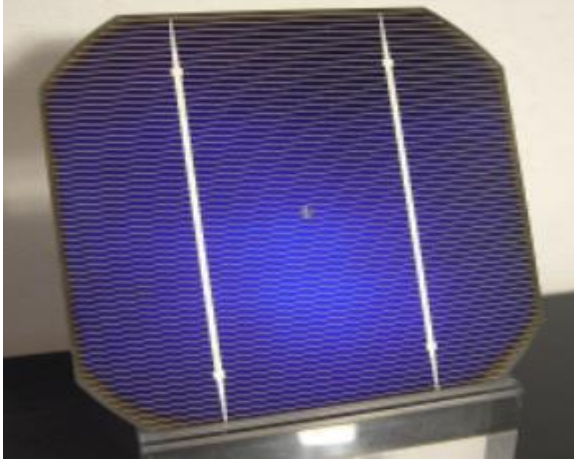
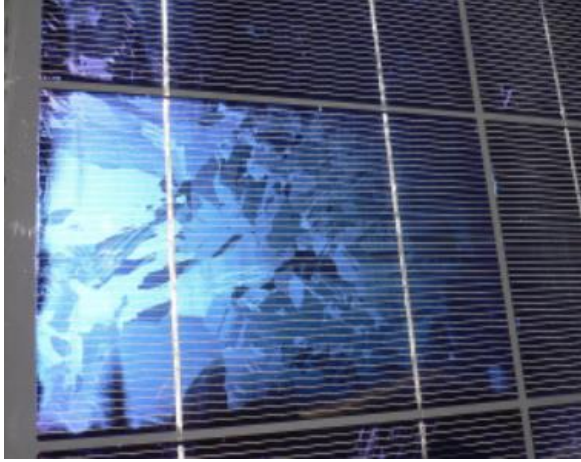
3.1 TECNOLOGÍAS DE CELDAS SOLARES

Existen diferentes tipos de celdas solares, las cuales se clasifican en primera, segunda y tercera generación. Seguido a esto se explicará, cada una de estas clasificaciones enfocándose en la tercera generación (celdas solares emergentes).

3.1.1 Primera generación “Se clasifican en: Celdas Monocristalinas y Policristalinas. Este tipo de celdas son las más vendidas en el mundo y son la tecnología dominante del mercado actualmente, según este reporte, 86% del mercado está dominado por esta tecnología”⁹.

⁹MERCADO DE CELDAS SOLARES ENERGÍA Y POTENCIA [en línea]. Colombia: publicado en Julio de 2023-. [Fecha de consulta: 1 de octubre 2023]. P.1. Disponible en: <https://www.precedenceresearch.com/solar-cell-market>

Cuadro 1. Celdas solares convencionales: Monocristalinas y Policristalinas


Celdas Monocristalinas	Celdas Policristalinas
	
<p>Fue la primera tecnología de celdas fotovoltaicas que se produjo a nivel Industrial.</p>	<p>Utiliza un bloque de Silicio formado por muchos cristales.</p>
<p>Las celdas se obtienen a partir de un gran cristal de Silicio</p>	<p>No se fabrican a partir de un único gran cristal.</p>
<p>Tienen un color azulado oscuro y con un cierto brillo metálico.</p>	<p>Tienen un color más claro con distintas tonalidades e irregularidades; tienen un aspecto veteado.</p>
<p>Las esquinas de las celdas son redondas. Esto se debe a que el cristal, a partir del cual se fabrican, es redondo.</p>	<p>Su forma es rectangular, sin esquinas redondeadas. Esto se debe a que el bloque policristalino no necesita ser redondo.</p>
<p>Eficiencia récord de 27.6%</p>	<p>Eficiencia récord de 26.1%</p>
<p>Es la tecnología más costosa</p>	<p>Son más económicas que las celdas Monocristalinas</p>

Fuente: elaboración propia. Las eficiencias de estas celdas solares son tomadas del laboratorio nacional de energía renovable (NREL). [en línea]. Disponible en:

<https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>

3.1.2 Segunda generación Estas celdas son consideradas de película delgada, en donde el material más utilizado es el Silicio-Hidrogenado (Silicio Amorfo (Si)). Sin embargo, también se pueden utilizar otros materiales como el Seleniuro de Cobre, indio y Galio (CIGS) y el Teluro de Cadmio (CdTe). En esta tecnología no se utilizan láminas de cristal para hacer las celdas, sino el material a utilizar se rocía sobre un sustrato, el cual puede ser incluso un material flexible si se tienen capas suficientemente delgadas. La capa del material rociado puede tener un espesor incluso menor a 2 μm (micrómetros). Con esta tecnología se puede hacer módulos formados por sección continua de material, sin la necesidad de unir varias celdas. Entre las características de las celdas solares de Silicio amorfo se mencionan las siguientes:

Cuadro 2. Celda solar basada en silicio amorfo

Silicio Amorfo	
No existe estructura cristalina ordenada; el silicio se deposita sobre un soporte transparente en forma de una capa fina.	
Color marrón o gris oscuro	
Eficiencia récord 14.1%	
Muy económico y expectativa del futuro	
Su uso es poco común en aplicaciones fotovoltaicas, comparado con su utilización en relojes, calculadoras, etc.	

Fuente: elaboración propia. La eficiencia de esta celda solar es tomada del laboratorio nacional de energía renovable (NREL). [en línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>

Igualmente, algunas de las principales características de las celdas de película delgada basadas en materiales semiconductores CIGS (Cobre Indio Galio Selenio) y CdTe (Teluro de Cadmio) se describen a continuación:

Cuadro 3. Celda solar basada en cobre, indio, galio, seleniuro y telurio de cadmio

CIGS	
<p>Eficiencia récord de conversión de potencia del 23.6%</p>	
<p>Tienen un coeficiente de absorción extremadamente alto</p>	
Teluro de Cadmio (CdTe)	
<p>Se pueden ensamblar rápidamente y se considera un sustituto económico, de las celdas convencionales</p>	
<p>Eficiencia récord de conversión de potencia del 22.6%</p>	

Fuente: elaboración propia. Las eficiencias de estas celdas solares son tomadas del laboratorio nacional de energía renovable (NREL). [en línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>

Cabe señalar que la primera y segunda generación de celdas solares fotovoltaicas tienen un alto rendimiento, son eficientes, prometedoras, pero a su vez son costosas, tóxicas y de alto costo para fabricar, por tal razón; es necesario buscar nuevas alternativas que ayuden la relación entre eficiencia/ costo y también siendo amigables con el medio

ambiente. Teniendo presente este nuevo reto se optó por investigar una tercera generación que cumpliera estas expectativas.

3.1.3 tercera generación “Las celdas fotovoltaicas de tercera generación son celdas solares que son potencialmente capaces de superar el límite Shockley-Queisser del 31-41% de eficiencia energética para celdas solares de banda única. Esto incluye una alta gama de alternativas de celdas hechas de unión pn semiconductoras (primera generación), celdas de película delgada (segunda generación) y los sistemas comunes de tercera generación incluyen celdas multicapa (tándem), hechas de silicio amorfo o arseniuro de Galio, mientras que estudios más teóricos incluyen la conversión de frecuencia (es decir, cambiar la frecuencia de luz que la celda no puede usar para iluminar frecuencias de la celda en uso, así mismo generar mayor potencia), efectos de portadores calientes y otras técnicas de eyección de múltiples portadores. Hasta un 50% de la energía absorbida por una celda solar se pierde en forma de calor. Este exceso de energía se debe a que las partículas cargadas del proceso fotovoltaico absorben más energía de la necesaria para excitar un electrón y enviarlo en forma de electricidad, por tal razón; se está desarrollando celdas solares de portador caliente (HCSC), para aprovechar estas pérdidas de energía térmica y mejorar la eficiencia. En la práctica este método (HCSC) consiste en crear “valles satélites”, en la estructura de banda de los semiconductores, donde los portadores calientes pueden almacenarse temporalmente sin pérdida de energía. El valle satélite transforma la energía cinética de las partículas de calor sobrantes en energía potencial, con lo que la partícula pasa de ser una pérdida a una almacenada; se utiliza una estructura de indio-Galio-Arseniuro y aluminio (InGaaS/InAlAs)”¹⁰.

Los dispositivos fotovoltaicos emergentes más conocidos y prometedores incluyen: Celda solar de sulfuro de estaño de zinc de cobre (CZTS) y derivados CZTSe y CZTSSe consideradas Inorgánicas (basadas en Kesteritas), Celda solar sensibilizada por

colorante (DSSC), Celda solar orgánica, Celda solar de perovskita, Celda solar de punto cuántico (Quantum Dots).

En el siguiente capítulo se explicará cada una de las tecnologías de celdas solares emergentes con sus respectivas características.

4. CELDAS SOLARES EMERGENTES FUNCIONAMIENTO Y CONCEPTOS GENERALES

En este capítulo se describen las características de las tecnologías de celdas solares emergentes haciendo especial énfasis en su funcionamiento, estructura, ventajas y desventajas.

4.1 CELDA SOLAR DE SULFURO DE ESTAÑO, ZINC Y COBRE (CZTS) Y DERIVADOS CON SELENIURO (CZTSe) Y SULFURO Y SELENIURO (CZTSSe) DENOMINADAS COMO CELDAS SOLARES INORGÁNICAS (BASADAS EN KESTERITAS).

“Estas celdas solares inorgánicas basadas en kesteritas tienen precursores elementales de gran abundancia en la tierra y que son amigables con el medio ambiente. Este material se ha considerado como prometedor para la recolección de energía solar en aplicaciones fotovoltaicas ecológicas y rentables. Teniendo en cuenta la baja toxicidad y alta abundancia de las materias primas, la kesterita $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se}_4)$ (CZTSSe) ha recibido amplia atención.

¹⁰ CELDA FOTOVOLTAICA DE TERCERA GENERACIÓN [en línea]. Colombia: publicado en agosto del 2018-. [Fecha de consulta: 6 de diciembre 2023]. P.1. Disponible en: <https://www.hisour.com/es/third-generation-photovoltaic-cell-39628/>

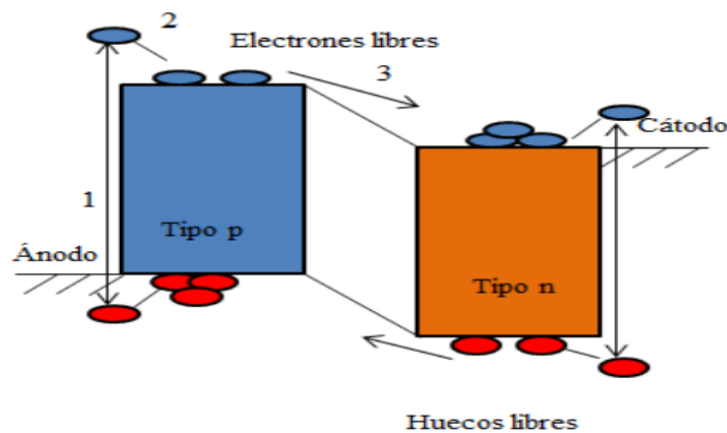
Además, el material de kesterita también cumple con los requisitos para celdas solares de alta eficiencia, incluyendo su amplio rango de banda prohibida de 1.0 a 1.5 eV que le confiere una eficiencia máxima teórica entre el 20 y 30% según el límite de Shockley-Queisser. El obstáculo para mejorar aún más el rendimiento de las celdas solares de kesterita reside principalmente en el absorbente y sus interfaces adyacentes, en el absorbente los defectos perjudiciales a nivel profundo y los grupos de defectos con baja energía de formación, límites de grano horizontales predominante y fluctuación de banda prohibida/potencial electrostático son causas comunes de recombinación no radiativa y concentración de defectos en la banda prohibida. Mientras que la región interfaz de hetero unión pn sufre de defectos interfaciales, alineación de banda desfavorable. Esta interfaz termodinámicamente inestable podría provocar la descomposición de la fase de kesterita y la expansión del calcogenuros de molibdeno, deteriorando el transporte del portador de la interfaz posterior y la resistencia general en serie”¹¹.

Las celdas solares inorgánicas están constituidas por materiales semiconductores tipo n y p unidos, los primeros semiconductores conduciendo muy bien electrones y los otros conduciendo selectivamente huecos; estas celdas fotovoltaicas inorgánicas utilizan semiconductores tipo P para absorber la luz (con espacio para electrones) y semiconductores tipo n (con electrones adicionales) que componen el donante y capasceptoras en una unión tipo p-n. A través del efecto fotoeléctrico se generan electrones excitados (en banda de conducción) luego de la absorción de fotones, posteriormente estos portadores fluyen selectivamente a través de la unión p-n creando un flujo continuo de electricidad.

¹¹ REVISIÓN CRITICA SOBRE EL PROGRESO DE CELDAS SOLARES DE KESTERITA [en línea]. Colombia: publicado El 20 de noviembre del 2022-. [Fecha de consulta: 10 de diciembre 2023]. P.1. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aenm.202203046>

El funcionamiento de una celda solar inorgánica puede ser dividida en tres pasos: (i) absorción de fotones por la celda solar, (ii) generación de electrones y huecos libres, en este paso se da la termalización de ellos en las bandas de conducción y de valencia respectivamente, (iii) los electrones y huecos libres son llevados a la unión p-n para ser colectados por los electrodos (ánodo y cátodo) que se encuentran unidos a los materiales n y p, (ver figura 5).

Figura 5. Funcionamiento celda solar inorgánica



Fuente: PELÍCULAS ORGÁNICO – INORGÁNICO CON ESTRUCTURA PEROVSKITA COMO CAPA ACTIVA EN DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS. [en línea]. Publicado en México Guanajuato agosto del 2016. P.19. Disponible en: <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/293/1/16775.pdf>.

Estas celdas solares inorgánicas tienen ventajas y desventajas, las cuales son:

Ventajas: Tienen mejor desempeño en las plantas de energía solar y en tejados comparado con las celdas solares orgánicas, precursores abundantes y baja toxicidad.

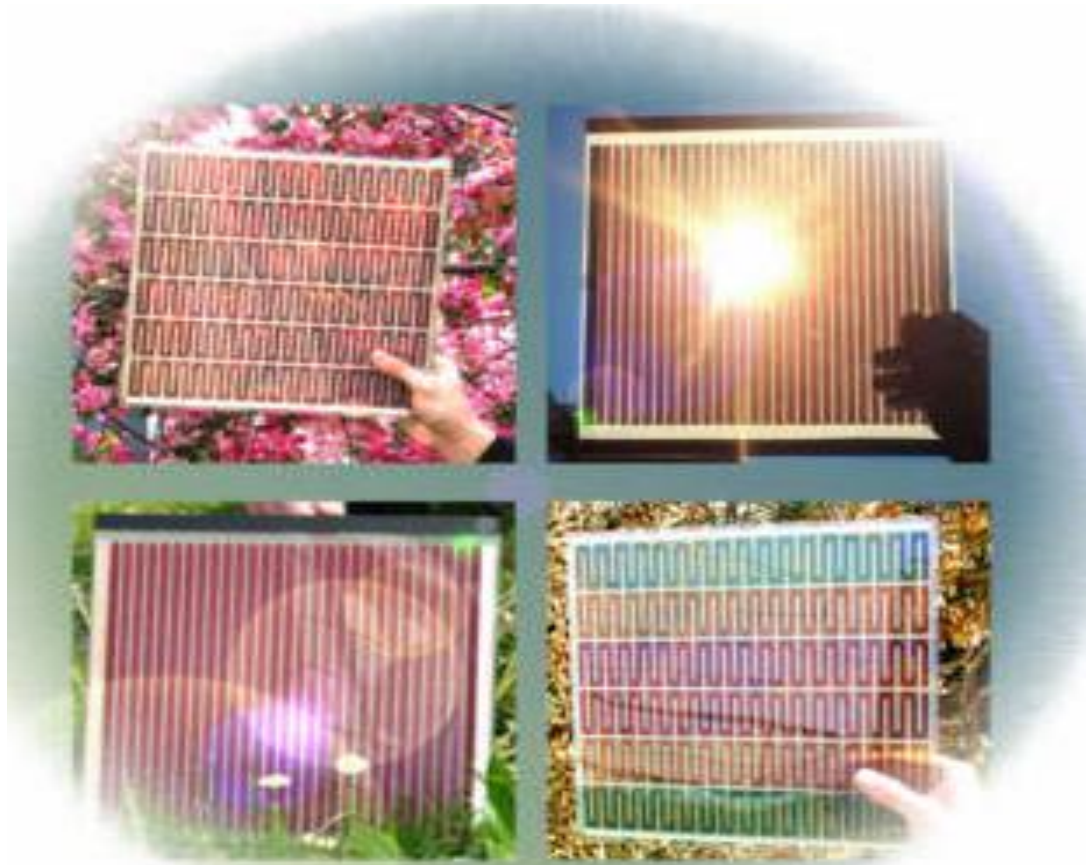
Desventajas: fabricación complicada.

4.2 CELDA SOLAR SENSIBILIZADA POR COLORANTE (DSSC)

“Los tintes moleculares se estudian extensamente para la sensibilización de DSSC. Estos colorantes pueden absorber fotones incidentes e inyectar electrones fotogenerados a la banda de conducción semiconductor, mientras; que los huecos son eliminados por un par químico redox en estado líquido, (ver figura 6). Estos tintes condujeron a mejorar la eficiencia para el recubrimiento de monocapa de colorantes moleculares en materiales de electrodos mesoporosos. La DSSC contiene un material semiconductor (típicamente TiO_2) sensibilizado con una monocapa de colorante y un electrolito líquido en contacto con un electrodo de platino el cual hace como electrodo contactor. El TiO_2 actúa como una capa de andamiaje para moléculas de tinte y también facilita la conducción y recolección de electrones fotogenerados. Sus principales características son: bajo costo, precursores abundantes, alta absorción de radiación y baja estabilidad. El desarrollo de moléculas colorantes se centra en la ingeniería molecular. Debido a su excelente estabilidad, se emplean colorantes como el N719 (complejo de Rutenio modificado de N3) que permite aumentar el voltaje del dispositivo, este es de color rojo, el cual; es el mejor sensibilizador de transferencia de carga y absorbente de luz, la actividad del N719 no tiene comparación con ninguna otra molécula colorante. Después de unos años el rendimiento del nuevo tinte llamado tinte negro era comparable con el tinte rojo, junto con tintes naturales se diseñaron nuevos tintes para lograr altas eficiencias”¹².

“En DSSC, el efecto fotoeléctrico se da principalmente en las nanopartículas mesoporosas de TiO_2 (ver figura 7), con alta área superficial (de 50-250 m^2/gramo) y con la tinta adherida en la superficie. La película de TiO_2 se recubre normalmente sobre un electrodo mediante la técnica de serigrafía. Posteriormente se realiza un tratamiento a alta temperatura, para eliminar los aglutinantes orgánicos logrando así una película de TiO_2 pura y a su vez mejora la unión física entre partículas. Tras fabricar esta capa se añade la tinta. Finalmente se termina la celda DSSC poniendo un par redox en estado líquido y sellando con un electrodo transparente de óxido de estaño dopado con indio o flúor que permite el paso de la radiación solar”¹³.

Figura 6. Celda solar sensibilizada por colorante

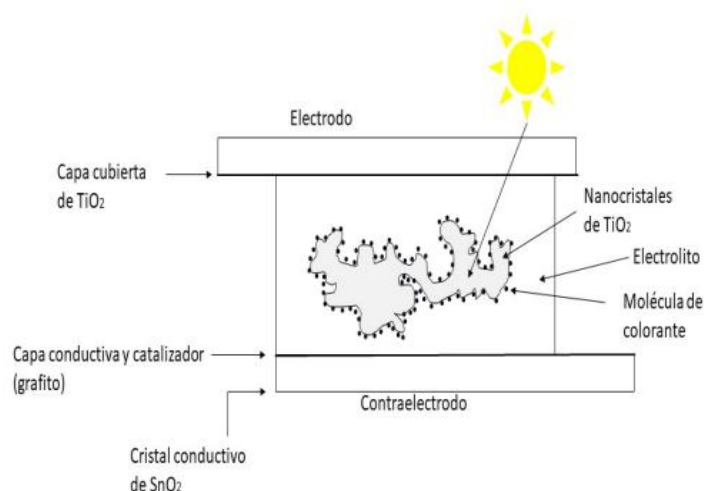


Fuente: CELDA SOLAR SENSIBILIZADA POR COLORANTE O TAMBIEN LLAMADA CELDA GRAETZEL. [en línea]. P.1. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell

¹² NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO METÁLICO FUNCIONALIZADAS PARA LA SENSIBILIZACIÓN EFICAZ POR COLORANTE. Ciencia de materiales para tecnologías energética. P.3. ISBN 472-481.

¹³.Ibid..p.8

Figura 7. Estructura esquemática de las celdas sensibilizadas por colorante



Fuente: ESTRUCTURA DE CELDAS SENSIBILIZADAS POR COLORANTE (DSSC). [en línea].

P. 21. Disponible en:

<https://repositorio.unicach.mx/bitstream/handle/20.500.12753/2137/Fotosensibilizadores%20de%20colorantes%20org%C3%A1nicos%20para%20DSSC%20%28Dye-Sensitized%20Solar%20Cells%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Como dice Paola Jacqueline ¹⁴, La celda solar usa moléculas coloreadas sobre óxidos semiconductores nano cristalinos como TiO_2 o ZnO para coleccionar la luz del sol, la absorción de la luz (por los colorantes) y el proceso de colección de carga (por el semiconductor que actúa como electrodo) son separados, imitando de esta manera a la absorción natural de la luz en el proceso de fotosíntesis. La carga producida es transportada hacia un resistor externo y luego llega hasta un contraelectrodo, donde se completa el circuito mediante el uso de un electrolito siendo el más utilizado un par redox yodo/triyodo.

¹⁴ PAOLA JACQUELINE, fotosensibilizadores de colorantes orgánicos para DSSC (DYE – sensitized solar cells). Publicado en marzo del 2021 Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico P.22.

Las moléculas de colorante también se conocen como sensibilizadores y juegan un papel importante en el DSSC. Estos sensibilizadores absorben la luz solar y generan excitones donde se inyectan electrones desde el nivel LUMO en la banda de conducción del fotoánodo y los agujeros se inyectan desde el nivel HOMO en el electrolito redox. La cantidad de absorción de fotones sensibilizadores dicta la foto eficiencia de conversión. El platino y los materiales relacionados con el carbono son materiales catalizadores de uso común. Para la aplicación de contraelectrodos, el platino actúa como el mejor catalizador y su conductividad eléctrica es alta. El costo del platino es el factor limitante para la comercialización de DSSC, el grafito se considera como una de las alternativas del platino, debido a su bajo costo y fácil preparación, aunque su eficiencia es pobre en comparación con el DSSC basadas en platino. otros materiales como el grafeno y materiales relacionados con estos polímeros conductores como: calcogenuros y óxidos metálicos de tipo P se prueban como contraelectrodos y aunque el platino sigue siendo el líder de todos.

El papel principal del electrolito redox en DSSC es inyectar a los huecos en el electrolito para regenerar los sensibilizadores oxidados, cualquier electrolito (sólido, líquido) empleado en el DSSC debe cumplir con lo siguiente: Debe exhibir características térmicas, químicas, ópticas y estabilidad electroquímica y debe evitar degradación del tinte. Los portadores de huecos deben inyectarse en el electrolito y regenerar las moléculas de tinte oxidadas al estado fundamental. El espectro de absorción del electrolito no debe superponerse con la del colorante. Bajo iluminación, las celdas solares se clasifican con foto parámetros voltaicos como el J_{sc} , V_{oc} , FF Y PCE.

Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): Para aniquilar la corriente generada durante la iluminación $J=0$. En DSSC, el V_{oc} depende de la función de trabajo de la energía de Fermi del fotoánodo y electrolito, en condiciones de circuito abierto se observa que es difícil evitar procesos de recombinación debido a la termodinámica considerando el equilibrio entre la

recombinación de foto generación y portadores de carga. Densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}): Con polarización cero aplicada a la corriente generada en una celda solar se denomina como J_{sc} , el potencial incorporado se genera debido al excitón disociación y transporte de carga. El J_{sc} de un DSSC, depende de la luz incidente y generación de excitones. En segundo lugar, una amplia absorción conduce a la cosecha más de excitones dentro del espectro solar terrestre; que conduce a un máximo de J_{sc} del DSSC la capa determina el J_{sc} de la celda solar.

Factor de llenado (FF): El objetivo de la celda solar es la conversión de luz solar en energía eléctrica a partir de la curva J-V, podemos calcular P_{max} donde esta representa la máxima potencia entregada. Para un diodo ideal el FF debe ser la unidad a medida que el FF sea más alto el diodo será más ideal. En DSSC, debido a las pérdidas producidas por recombinación y transporte, la FF se encuentra entre 0.6 y 0.85. en celdas solares se observa que la resistencia en derivación y serie actúa como factor limitante.

Eficiencia de conversión de energía: La eficiencia de un DSSC se define como la relación entre la potencia entregada P_{max} y la potencia de luz incidente P_{in} , la eficiencia informa sobre la potencia de salida de DSSC y da una idea sobre la conversión de la luz en electricidad y fotovoltaica. Esta celda solar sensibilizada por colorante (DSSC) alcanzado una eficiencia máxima de 13%.

Las ventajas y desventajas de las DSSC son:

Ventajas: Los DSSC, funcionan incluso en condiciones de poca luz; por lo tanto, pueden trabajar bajo cielos nublados y luz solar no directa y ángulo más amplio, Una ventaja práctica de DSSC, comparada con tecnologías de película delgada, es que la robustez

mecánica de la celda conduce indirectamente a mayores eficiencias en temperaturas más altas, Bajo, costo de producción, mejor desempeño en condiciones reales, Flexible, ligero, robustez, Operación con temperatura interna más baja.

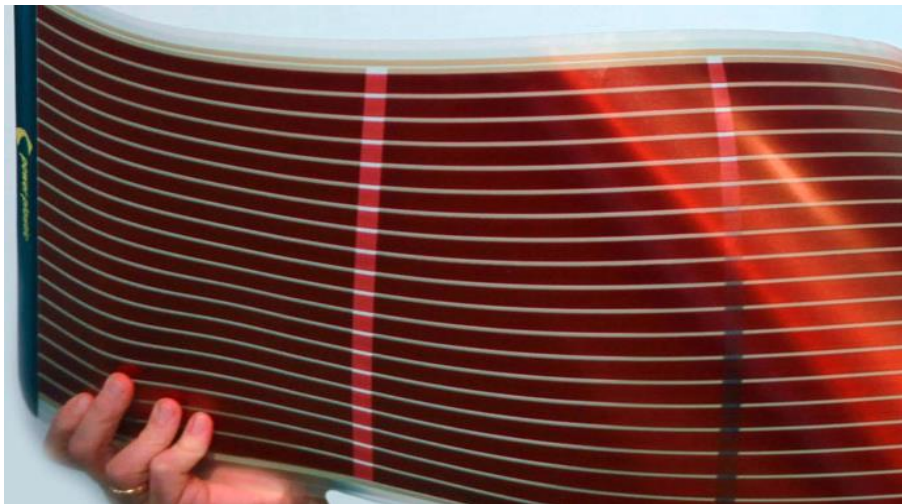
Desventaja: La principal desventaja del diseño DSSC es el uso de electrolito líquido, que tiene problemas con la variación de la temperatura. A bajas temperaturas, el electrolito puede congelarse, interrumpir la producción de energía y potencialmente provocar daños físicos. Las temperaturas más altas hacen que el electrolito se expanda, lo que hace que sellar los paneles sea un serio problema, la materia prima de Rutenio (colorante), el platino (catalizador) y la conducción de vidrio o plástico (contacto) son necesarios para producir un DSSC, los cuales son muy costosos, la solución de electrolitos contine compuestos inorgánicos volátiles, solventes que deben sellarse cuidadosamente ya que son peligrosos para la salud humana y el medio ambiente, problemas con la estabilidad de la temperatura, sustancias venenosas y volátiles.

4.3 CELDA SOLAR ORGANICA

Están formadas por moléculas que contienen principalmente combinaciones carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno, las celdas solares orgánicas se pueden fabricar a partir de líquidos en un proceso similar al revestimiento o la impresión con inyección de tinta con un rendimiento muy alto y a muy bajo costo e incluso sobre materiales flexibles, además; debido a las diferentes combinaciones de moléculas que podemos elegir se puede modificar la banda prohibida lo cual es muy importante para lograr mayores eficiencias. Desafortunadamente las celdas solares orgánicas en su desarrollo actual son ineficientes y a menudo bastante inestables bajo el calor, la humedad o la exposición a la luz.

“Las celdas solares orgánicas de película delgada, ver (figura 8); han surgido como reemplazo de las celdas solares inorgánicas basadas en silicio, las cuales ofrecen varias ventajas en comparación con las de silicio. Para influir en la eficiencia, los polímeros se utilizan con frecuencia para fabricar las capas amortiguadoras y absorbente. Además, binario; se han ideado mezclas de polímeros temporales para influir en el rendimiento de las micro/nanoestructuras”¹⁵.

Figura 8. Celda solar orgánica



Fuente: CELDA SOLAR ORGÁNICA, [en línea]. Publicado el 18 de diciembre del 2019.P. 21. Disponible en: <https://twenergy.com/energia/energia-solar/que-son-las-celdas-solares-organicas-2861/>

“Las celdas solares orgánicas se clasifican en tres tipos: orgánicas de hetero unión simple, bicapa y tipo “Bulk Heterojunction”. Las OSCs de una sola capa son la estructura más sencilla de las celdas solares orgánicas, se basa en material orgánico fabricado al incrustar una capa de polímero conjugado entre dos electrodos conductores ver (figura 9) (A), este se compone de un absorbente orgánico medio intercalado entre óxido de indio y estaño y electrodos de aluminio. La limitación principal encontrado para este

dispositivo es su pequeño espesor del medio absorbente a aproximadamente 10-20 nm, lo que permite que el dispositivo absorba solo una proporción menor de la luz incidente para la conversión de energía.

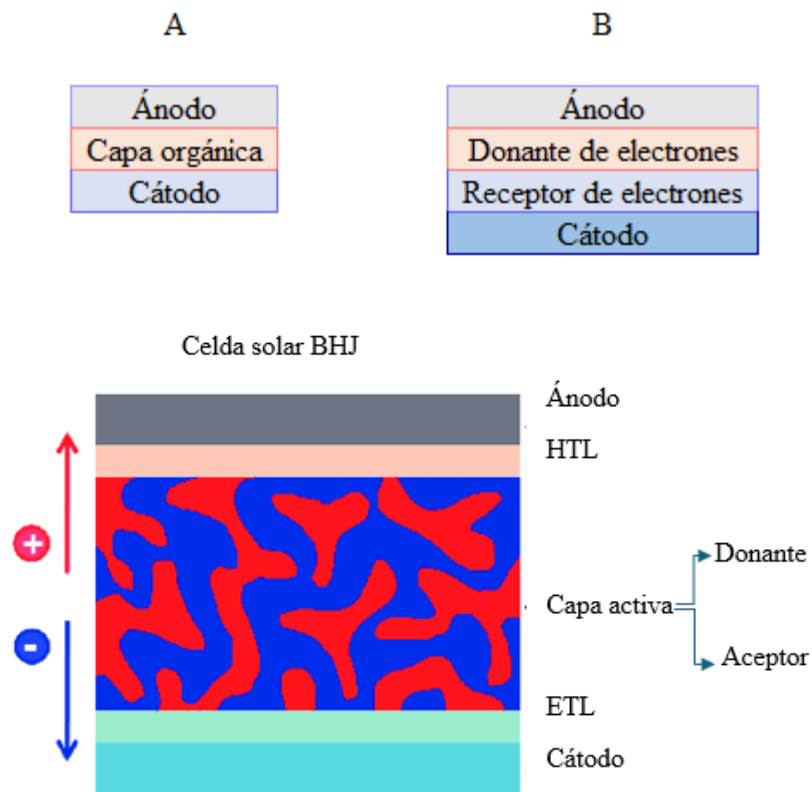
El OSCs bicapa tiene dos capas orgánicas intercaladas entre el electrón y la recolección de huecos ver figura 9 (B), en donde se puede ver la estructura fundamental del dispositivo. La separación ocurre entre la interfaz entre el donante y el receptor. La función de trabajo de los electrones para formar mejores contactos óhmicos es modificada por las capas colectoras de electrones y huecos. Los receptores electrónicos exhiben una mejor afinidad y potenciales de ionización en comparación con los donantes. La capa donante absorbe el fotón incidente y los electrones en el material donante se agitan desde el nivel del orbital molecular ocupado más alto (HOMO) al orbital molecular desocupado más bajo (LUMO). Por último, el OSCs tipo “Bulk Heterojunction” tiene una capa fotoactiva (absorbente) que es una mezcla de polímeros, la mezcla normalmente se hace cambiando polímeros donadores y aceptores de electrones que luego se inserta entre los electrodos”¹⁶.

¹⁵ MARTHA NAVARRO BURGOS. Caracterización de celdas solares orgánicas mediante espectroscopia de impedancias. Universidad Autónoma de Madrid., 2015.P.7.

¹⁶.Ibid..p.14.

¹⁷. Ibid.,p.18

Figura 9. Celda solar orgánica

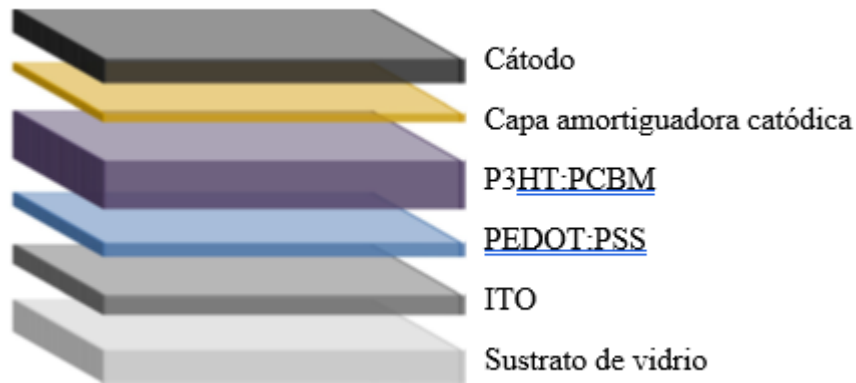


Fuente: CELDA SOLAR ORGÁNICA Y ESQUEMA BHJ O BULK HETEROJUNCTION: (A) MONOCAPA Y (B) BICAPA, [en línea]. Publicado el 18 de diciembre del 2019.P. 21. Disponible en: <https://twenergy.com/energia/energia-solar/que-son-las-celdas-solares-organicas-2861/>

Celdas solares orgánicas tipo “Bulk heterojunction” (BHJ-OSC): La estructura de BHJ-OSC es una estructura multicapa donde cada capa puede ser creada por un individuo, en este dispositivo; el medio fotoactivo (absorbente) es una combinación de polímeros originales y aceptore. Estos polímeros se disuelven en un sistema solvente para formar el absorbente, el cual es un componente importante del BHJ-OSC. Además, en el bicontinuo BHJ-OSC se forman redes Inter penetrantes que aumentan la frontera entre el donante y el receptor. Este aumento en el área de contacto entre los dos tipos de semiconductores es crucial para la necesaria separación de los portadores. En (figura

10), muestra un diagrama esquemático para BHJ-OSC y el tipo de materiales más comúnmente utilizados en este tipo de dispositivos.

Figura 10. Estructura solar orgánica BHJ



Fuente: DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA CELDA SOLAR ORGÁNICA BHJ (BERGER Y KIM, 2018 .P. 34. Disponible en: <https://twenergy.com/energia/energia-solar/que-son-las-celdas-solares-organicas-2861/>

“Se ha identificado cuatro pasos principales que describen el principio de funcionamiento de la celda solar fotovoltaica "Bulk Heterojunction" (BHJ-OSC), estas etapas consisten en: i) absorción de fotones y ii) creación de excitones (pares electrón – hueco) iii) difusión de excitones y iv) separación y transporte de cargas a los contactos eléctricos. El material donante absorbe la luz incidente en la capa absorbente. Después de la absorción de fotones se crean excitones, los cuales para generarlos debe tener un equilibrio entre donante (HOMO) y aceptor (LUMO) entre el 0,1 y 1,4 eV. Sin embargo, los excitones se separan en huecos y electrones después de difundirse a interfaz entre el donante y el receptor donde la caída de energía potencial necesaria los separa en portadores libres que finalmente se mueven hacia sus respectivos electrodos. Además, se perderán durante estas etapas que incluyen pérdidas de absorción debido a la diferencia espectral,

perdida de termalización, lo que limita el rendimiento general del dispositivo. En la búsqueda de lograr un costo de producción favorable al mismo tiempo una conversión de energía apreciable, mejora de eficiencia, los OSC han presentado han presentado ventajas considerables. La capacidad de ajustar las propiedades químicas, el peso ligero y la fácil fabricación son algunas de las ventajas que presentan estos¹⁷. Esta celda solar orgánica ha alcanzado una eficiencia récord de 19.2 %.

Estas celdas solares orgánica tiene las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas: Pueden adaptarse a cualquier superficie, debido a que son flexibles, son menos frágiles, lo que facilita su mantenimiento, son ecológicas porque son biodegradables y sus residuos no suponen tanto impacto como las celdas de silicio, su instalación y transporte es sencilla, ya que son ligeras, son más sensibles a la luz difusa e indirecta, de forma que es posible obtener mayor número de horas de aprovechamiento al cabo del año, pueden funcionar en soportes transparentes, lo que hace ideales para instalarlas en ventanas de edificios o de coches solares, las materias primas y el proceso de fabricación son mucho más económicos. Se pueden llegar a obtener incluso por impresora.

Desventajas: Vida útil limitada debido a la degradación de materiales orgánicos, susceptible a variaciones de temperatura y humedad, menos estable bajo exposición prolongada a la luz solar, tienen poca estabilidad.

4.4 CELDA SOLAR DE PEROVSKITA

“El perovskita mineral, que lleva el nombre del mineralogista Ruso Conde Lev Perovski, es un material que tiene la misma estructura cristalina que el mineral óxido de calcio y titanio, el primer cristal de perovskita descubierto se puede ver en la (figura 11). Por lo

general, los compuestos de perovskita tienen una fórmula química ABX_3 , donde A y B representan los cationes y X es un anión que se une a ambos; es posible combinar un gran número de elementos diferentes para formar estructuras de perovskita, gracias a la flexibilidad compositiva los científicos pueden diseñar cristales de perovskita con una gran variedad de características físicas, ópticas y eléctricas. Los cristales de perovskita se encuentran hoy en día en máquinas de ultrasonido, chips de memoria y en celdas solares”¹⁸.

“Las perovskitas fotovoltaicas son cristales sensibles a la luz que podrían revolucionar la energía solar, en solo unos años se ha conseguido que su eficiencia de conversión energética sea similar a la del silicio tradicional y es mil veces más delgada, en el futuro eso supondría un considerable ahorro en el precio de la energía solar. Estas celdas solares de tercera generación están fabricadas capa a capa como un sándwich con perovskita como capa activa para obtener la luz. Lo que es más sorprendente de las perovskitas es que se pueden formar a partir de una solución con procedimientos simples y materiales precursores de bajo costo, obteniendo rendimientos más altos que hoy ya superan a los de las celdas de silicio policristalino. Uno de los principales problemas es el uso de plomo en la síntesis de estos materiales, por la toxicidad conocida de los derivados de plomo”¹⁹.

¹⁸ PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y OPTOELECTRÓNICAS DE PEROVSKITAS DE HALUROS HÍBRIDOS PARA CELDAS SOLARES. Publicado en el 2021. P.6. ISBN 91 (2021)106077).

¹⁹.Ibid..p.8.

Otro hecho interesante es que este material se puede combinar con el silicio para tener celdas tándem con eficiencias mayores, alcanzando hoy en día eficiencia récord del 33,9%

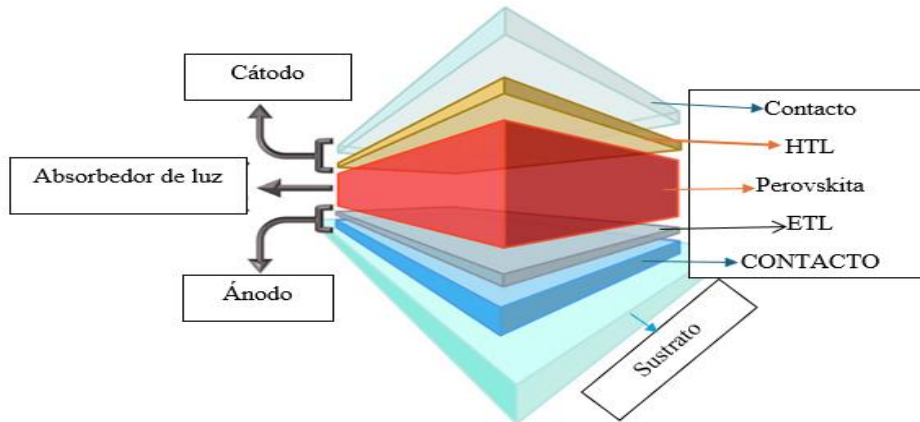
Figura 11: Celda solar de perovskita



Fuente: CELDA SOLAR DE PEROVSKITA. Publicado el 23 de abril del 2021., disponible en: <https://www.xataka.com/energia/paneles-solares-perovskita-superan-25-eficiencia-conversion-cerca-limite-tradicionales>

En un periodo de tiempo relativamente corto esta tecnología ha alcanzado una eficiencia récord de 25.5% en laboratorio, superando el rendimiento de otras tecnologías como los dispositivos de película delgada de Si amorfo, CdTe y CIGS y ahora incluso la celda solar de perovskita ha superado la eficiencia récord de las celdas de silicio policristalino. Actualmente la celda solar de perovskita emerge como un posible candidato a hacer la transmisión a nivel industrial; sin embargo, para tener una profunda comprensión de sus propiedades y su relación con los parámetros de deposición, es necesario desarrollar nuevos procedimientos y métodos para crecer películas delgadas en una adecuada línea de producción de dispositivos.

Figura 12: Estructura de celda solar de perovskita



Fuente: ESTRUCTURA DE CELDA SOLAR DE PEROVSKITA. Universidad Politécnica de Madrid.,p.2. Disponible en: <https://mastersolar.ies.upm.es/que-es-una-celula-solar-de-peruskita/>

Las perovskitas de haluro de plomo híbrido orgánico-inorgánico poseen excelentes propiedades para aplicaciones de celdas solares, como una fuerte absorción de luz, larga longitud de difusión, y alta movilidad de portadores; sin embargo, los principales desafíos en esta tecnología están relacionados con la estabilidad del dispositivo, que se puede enfrentar modificando la capa activa (perovskita) o a través de cambios de estructura en los dispositivos. Una de las modificaciones propuestas en este tipo de celdas solares es el uso de nuevas capas transportadoras de carga que pueden desempeñar el papel de portadores de carga selectiva y aísla la película de perovskita de la humedad y la radiación UV. Las capas de transporte de electrones (ETL) más utilizadas en las celdas solares de perovskita incluyen TiO_2 , ZNO , Zn_2SnO_4 , Nb_2O_5 y SnO_2 , en la estructura convencional también como PCMBM Y C60 en la configuración invertida²⁰.

²⁰ CELDAS SOLARES DIDIMENSIONALES BASADAS EN HALURO PEROVSKITAS PARA MEJORA DEL RENDIMIENTO Y LA ESTABILIDAD [en línea]. Colombia: publicado en febrero 8 de 2021-. [Fecha de consulta: 20 de octubre 2023]. P.1. Disponible en: <https://docs.google.com/document/d/1KqqbWXasEZs2M0-fUea3Gs6Jq2EMUg5j5TAJjAASpzs/edit>

Estas celdas de perovskita tienen las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas: Abundancia de los constituyentes, excelentes propiedades físicas, tecnología simple y sencilla, banda prohibida directa y sintonizable, facilidad de fabricación y tiene buen coeficiente de adsorción, se pueden fabricar a muy bajas temperaturas, estructura simplificada y de bajo costo, peso ligero, flexibilidad, alta eficiencia y bajo costo de fabricación.

Desventajas: Toxicidad de algunos de los constituyentes (plomo), inestabilidad de los dispositivos (se degradan con cierta rapidez), tamaño de las celdas (tiene tamaños muy pequeños comparado con otras celdas para producir la misma cantidad de MWh, Inestable.

4.5 CELDA SOLAR DE PUNTO CUÁNTICO (QUANTUM DOTS) (QDSC)

“Una celda solar de punto cuántico (QDSC) (figura 13) es un diseño de celda solar que utiliza puntos cuánticos como material fotovoltaico absorbente, esta intenta reemplazar los materiales como el silicio, cobre indio seleniuro de galio (CIGS) o CdTe. Los puntos cuánticos tienen band gap²¹, que son ajustables en un amplio rango de niveles de energía al cambiar su tamaño. En materiales semiconductores convencionales, el band gap se fija mediante la elección del material. Sin embargo, en los puntos cuánticos (Quatum dots) el band gap se puede ajustar con base en su tamaño incluso ante la misma composición química. Esta propiedad hace que los puntos cuánticos sean atractivos para las celdas solares de múltiples uniones, donde se utilizan una variedad de materiales para mejorar la eficiencia cosechando múltiples porciones del espectro solar.

Figura 13. Celdas solares de puntos cuánticos



Fuente: PANELES SOLARES MÁS EFICIENTES POR LOS PUNTOS CUANTICOS. Ambientum Portal Ambiental.,p.1. Disponible en: <https://www.ambientum.com/ambientum/energia/paneles-solares-mas-eficientes-por-los-puntos-cuanticos.asp>

“Los puntos cuánticos son partículas semiconductoras de tamaño nanométrico absorben y emiten luz de longitudes de onda (colores) variables. Sus propiedades ópticas únicas hacen que los puntos cuánticos sean ideales para su uso en diversas aplicaciones ópticas, incluidos los dispositivos fotovoltaicos. Los QDSC sufren una absorción débil y la contribución de la absorción de la luz a temperatura ambiente es marginal. Los puntos cuánticos son partículas semiconductoras que se han reducido por debajo del tamaño del radio Exciton Bohr”²² y, debido a consideraciones de la mecánica cuántica, las energías electrónicas que pueden existir dentro de ellas se convierten en energía finitas, muy similares en un átomo. Los puntos cuánticos se conocen como “átomos artificiales”.

²¹ DETERMINACIÓN TEÓRICA DE LA BANDA PROHIBIDA BAND GAD DEL BI(OH)CrO₄ EN SU ESTRUCTURA MÍNIMA, CELDA UNITARIA Y SISTEMA PERIÒDICO [en línea]. Bogotá: publicado en noviembre del 2015 -. [Fecha de consulta: 28 de octubre 2023]. P.21. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/2738f935-06f9-461f-98bf-8fda7d5bd607/content>

²².Ibid..p.35.

Estos niveles de energía se pueden ajustar cambiando su tamaño, lo que a su vez define el band gap y por ende el rango de luz que puede absorber o emitir. En las preparaciones típicas de química húmeda, la afinación del tamaño y por ende de sus propiedades ópticas y electrónicas se logra variando la duración o temperatura de la síntesis.

“La capacidad de ajustar el band gap hace que los puntos cuánticos sean deseables para las celdas solares. Las implementaciones de unión simple que utilizan puntos cuánticos coloidales (CQD) de sulfuro de plomo (PbS) tienen band gap que pueden sintonizarse en el infrarrojo lejano y la mayoría en la región del infrarrojo cercano. Una celda solar de punto cuántico hace que la energía infrarroja sea tan accesible como cualquier otra; además, CQD ofrece una fácil síntesis y preparación. Mientras están suspendidos en una forma líquida coloidal, se pueden manipular fácilmente durante toda la producción, con equipos de baja complejidad como cámaras de extracción o de control de atmósferas a temperaturas cercanas al ambiente”²³.

Las celdas solares de puntos cuánticos han progresado significativamente y cada vez más buscando mejorar la relación eficiencia/costo, siendo amigables con el medio ambiente. Es por esto por lo que han alcanzado eficiencias máximas de 18.11%.

Las celdas solares de puntos cuánticos tienen como ventajas y desventajas lo siguiente:

Ventajas: Tienen rango de absorción de luz ajustable con el tamaño de las partículas, bajo costo de producción, bajo consumo de energía requerida para su elaboración.

²³ ESTUDIO DE LA OBTENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE PbS BAJO DISTINTAS CONDICIONES DE SÍNTESIS, [en línea]. publicado en diciembre del 2013 -. [Fecha de consulta: 30 de octubre 2023]. Matricula 1303474 P.15. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/3833/1/1080255490.pdf>

Desventajas: Contiene metales pesados altamente tóxicos como el plomo y cadmio, alta toxicidad en la naturaleza, baja estabilidad.

5. CELDAS SOLARES EMERGENTES: RETOS Y ESTRATEGIAS INNOVADORAS

En el presente capitulo se hablará, sobre los retos y estrategias innovadoras que se plantean o se están utilizando para mejorar las celdas solares emergentes, buscando alternativas a las diferentes desventajas de estas.

5.1 CELDA SOLAR DE SULFURO DE ESTAÑO, ZINC Y COBRE (CZTS) Y DERIVADOS CON SELENIURO (CZTSe) Y SULFURO Y SELENIURO (CZTSSe) DENOMINADAS COMO CELDAS SOLARES INORGÁNICAS (BASADAS EN KESTERITAS).

El principal desafío de estas celdas inorgánicas basadas en kesteritas es la potencia y la eficiencia de conversión, los cuales están asociados principalmente con los defectos en la mayor parte de los granos de kesteritas en las interfaces. Estos desafíos deben superarse combinando los esfuerzos, particularmente entendiendo más sobre el material y los dispositivos. Otros desafíos que enfrentan estas celdas solares inorgánicas basadas en kesteritas incluyen el desarrollo de dispositivos flexibles, el control de las impurezas, y las tensiones térmicas que surgen de los sustratos flexibles e incorporación de elementos alcalinos al crecimiento del material.

Un factor clave es encontrar un método de preparación practico y de bajo costo para manipular la distribución de los elementos precursores. Existen métodos de bajo costo basados en el uso de soluciones químicas que por un lado reduce los beneficios económicos, pero normalmente las kesteritas sintetizadas por estos métodos presentan

más defectos y por ende su desempeño disminuye. Igualmente se han desarrollado múltiples métodos de recocido térmico para mejorar las propiedades de las kesteritas sintetizadas mediante métodos químicos económicos.

La síntesis de kesteritas es relativamente compleja ya que este material presenta un rango estrecho de composiciones en que es estable la fase deseada para aplicaciones fotovoltaicas. El control de defectos es igualmente complicado y puede llevar a la formación de fases secundarias, cristalinidad deficiente, defectos perjudiciales y portadores minoritarios limitados. En la etapa inicial de desarrollo del material de kesterita, se investigó ampliamente la eliminación de fases secundarias, la mejora de la cristalinidad, la optimización de la composición y la ingeniería del proceso. Recientemente se ha prestado atención a la regulación de las propiedades de los defectos y los procesos de síntesis asociados y las rutas de transformación de fase. Además, el diseño de clasificación de banda prohibida es otra estrategia prometedora, que otorga una mayor energía de activación de recombinación en la interfaz de unión pn frontal y un reflector de electrones posterior favorable.

5.2 CELDA SOLAR SENSIBILIZADA POR COLORANTE (DSSC)

Como dice PAOLA JACQUELINE ²⁴. El uso de electrolito líquido es una de las desventajas que existe en las DSSC ya que este tiene problemas a altas y bajas temperaturas; el cambio de este electrolito líquido por un sólido ha sido una importante línea de investigación en desarrollo. Recientes experimentos con sales fundidas solidificadas han mostrado alguna promesa, pero sufren actualmente una mayor degradación durante la operación continua y no son flexibles.

Por otro lado, la materia prima (Rutenio) usada para la fabricación de tintas sensibilizadoras han demostrado que actúan mejor; pero este es un metal muy costoso,

por eso se investigan otros materiales más económicos y con mejores resultados. Y es aquí donde los colorantes orgánicos comienzan a actuar, ya que estos cumplen los requisitos mínimos de un buen sensibilizador. Los colorantes naturales y orgánicos cuentan con muchas ventajas como fotosensibilizadores, los cuales son: Variedad de estructuras para su diseño molecular, son de bajo costo comparado con los fotosensibilizadores metálicos, gran coeficiente de absorción atribuido a la transmisión π - π intermolecular.

Los colorantes orgánicos con mayor coeficiente de adsorción podrían traducirse en películas nanoestructuradas de óxido metálicos más delgadas, lo que sería ventajoso para el transporte de carga tanto en el óxido metálico como en la fase de permeación, permitiendo el uso de materiales de mayor viscosidad como líquidos iónicos, electrolitos sólidos, o conductores de agujeros. Los tintes orgánicos a menudo se encuentran en plantas, frutas y otros productos naturales.

“El achiote (*Bixa orellana*) es un arbusto tropical originario del continente americano que da un fruto rojo no comestible que contiene alrededor de 50 semillas rojas, de las cuales; se obtiene un extracto de color rojo oscuro, que se utiliza como colorante y aromatizante alimentario. Este tinte se caracteriza por un alto contenido de pigmentos rojos con un alto coeficiente de adsorción en la parte visible del espectro solar. El pericarpio de las semillas contiene una alta concentración de carotenoides y está compuesto por un 80% del carotenoides *cis*-bixina ($C_{25}H_{30}O_4$) y el 20% restante incluye *trans* y *cis*-norbixina ($C_{24}H_{28}O_4$).

24 PAOLA JACQUELINE, fotosensibilizadores de colorantes orgánicos para DSSC (DYE – sensitized solar cells). Publicado en marzo del 2021 Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico P.3

La bixina es insoluble al agua y consta de una cadena doble de enlaces, conjugados alternos, con un grupo ácido carboxílico en un extremo de la cadena y un grupo metilo, la norbixina es un carotenoide soluble en agua con una única diferencia de la presencia de un resto de ácido carboxílico en la posición del grupo éster metílico en la bixina. El extracto llamado achiote y los dos pigmentos purificados se aplican en la celda solar sensibilizada con colorante utilizando ZnO y TiO₂ como materiales de sustrato. Dando como resultado el coeficiente de adsorción máximo de bixina 13 veces mayor que el tinte a base de Rutenio N-719, mientras el coeficiente máximo de absorción de norbixina es aproximadamente el mismo que el de norbixina N-719”²⁵.

Las celdas DSSC que han sido estudiadas desde hace varias décadas han dado lugar al desarrollo de nuevas tecnologías emergentes como las celdas de perovskita y las celdas de puntos cuánticos, de manera que esta es una tecnología que ha permitido grandes avances en la materia a medida que se han intentado resolver sus múltiples problemas.

5.3 CELDA SOLAR ORGÁNICA

“Para aumentar la absorción de luz en la celda solar orgánica (OPV), los investigadores han desarrollado varias estrategias, entre ellas el uso de estructuras que atrapan la luz y la incorporación de nanopartículas plasmonicas en la capa activa. Las estructuras que atrapan la luz como los sustratos texturizados o los cristales fotónicos aumentan la longitud del camino de la luz en la capa activa y mejoran la adsorción de luz. Las nanopartículas plasmonicas, como el oro y la plata se puede utilizar para mejorar la absorción de luz, mediante la excitación de la resonancia del plasmon superficial que puede confinar y concentrar campos electromagnéticos en la capa activa”²⁶.

²⁵ CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS CON TINTES NATURALES EXTRAIDOS DE SEMILLAS DE ACHIOTE, [en línea]. publicado en enero de 2010 -. [Fecha de consulta: 10 de noviembre 2023]. P.40-44. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024809001974>

“Un desafío para las celdas fotovoltaicas orgánicas es el equilibrio entre la transmitancia de luz visible promedio (AVT) y la eficiencia de conversión de energía (PCE). Los investigadores han diseñado y construido con éxito un electrodo trasero transparente superior para captar energía en ambas direcciones del dispositivo. los esfuerzos de investigación en temas como la mejora de la vida útil, de los dispositivos, la gama de colores y el diseño en la eficiencia de los módulos ayudara a lograr un efecto significativo en el cambio de estado de la energía fotovoltaica orgánica de una tecnología novedosa a una industria madura”²⁷.

Finalmente, a nivel de producción en gran escala, las celdas solares orgánicas aún deben mejorar en su estabilidad. Se prevé que este tipo de celdas puedan incluirse en muchas aplicaciones poco convencionales dada su versatilidad en color como su gran flexibilidad que permite que se combine con aplicaciones textiles, arquitectónicas o en ventanas para aprovechar la radiación solar en la generación de pequeñas potencias eléctricas aprovechables en aplicaciones de IOT.

5.4 CELDA SOLAR DE PEROVSKITA

“Los principales desafíos de esta tecnología están relacionados con la estabilidad del dispositivo, que se puede afrontar modificando la capa activa (perovskita) o a través de cambios de estructura de los dispositivos, una de las modificaciones propuestas en este tipo de celdas solares es el uso de nuevas capas transportadoras de portadores.

²⁶AVANCES EN CELDAS FOTOVOLTAICAS ORGÁNICAS: UNA REVISIÓN EXHAUSTIVA DE MATERIALES, TECNOLOGÍAS Y RENDIMIENTO-. Publicado 19 de abril de 2023 [Fecha de consulta: 2 de diciembre 2023]. P.25. Numero de proyecto FCD-2023-8308. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/ra/d3ra01454a#tab2>

²⁷Ibid..p.40.

Pueden desempeñar el papel de aislar la película de perovskita de la humedad y radiación UV que son los principales factores que generan su degradación. Las capas de transporte de electrones (ETL) más utilizadas en las celdas solares de perovskita incluye TiO_2 , ZnO , Zn_2 , SnO_4 , Nb_2O_5 , y SnO_2 también en la estructura convencional. El TiO_2 es el ETL más utilizado debido a su estabilidad y mayor capacidad de transferencia de electrones, aunque se procesa en el aire a temperaturas superiores a los $450\text{ }^\circ\text{C}$, que es demasiado alta para usar en sustratos flexibles, esto ha llevado al desarrollo de nuevos métodos de síntesis explorando otros ETL inorgánicos”²⁸.

“El óxido de zinc (ZnO), es un material con mayor movilidad electrónica, alineación de energía de banda similar al TiO_2 y no necesita procesamiento a alta temperatura, por tanto; es un candidato ideal para sustituir al TiO_2 ; en celdas solares de perovskita. Actualmente, la celda solar de perovskita surge como un posible candidato para hacer la transición a un nivel industrial de producción”²⁹.

“El récord mundial de eficiencia en celdas solares de perovskita semitransparentes y un avance espectacular en su durabilidad lo ha conseguido un equipo encabezado por Syed Dildar Haider Naqvi, del Instituto de Investigación Energética de Corea del sur en Daejeon. Las nuevas celdas solares alcanzaron una eficiencia de 21.68%, lo que convierte en las más eficientes del mundo entre las celdas solares de perovskita que utilizan electrodos transparentes.

²⁸CAPAS COMPACTAS DE ZnO UTILIZADAS EN DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS DE TERCERA GENERACIÓN: UNA REVISIÓN -.Publicado 25 de junio del 2021 [Fecha de consulta: 10 de diciembre 2023]. P.16., volumen 56, paginas 15538-17571. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-021-06275-5>

²⁹.Ibid..p.20.

Además, mostraron una notable durabilidad conservando más del 99% de su eficiencia inicial tras 240 horas de funcionamiento”³⁰.

5.5 CELDA SOLAR DE PUNTO CUÁNTICO (QUANTUM DUTS) (QDSC)

El uso práctico de los puntos cuánticos para celdas solares, ha venido necesitando una tecnología que reduzca la distancia entre puntos cuánticos de un modo adecuado.

“Los investigadores Sung-Yeon Jang y sus colegas, han empleado una nueva y eficaz estrategia con la que han conseguido la creación de una capa fotoactiva de puntos cuánticos, acta para aprovechar muchísimo mejor las posibilidades de la tecnología, consiguiendo una eficiencia de 18.1%, este notable logro representa la mayor eficiencia entre celdas solares de puntos cuánticos reconocidas por el prestigioso laboratorio nacional de energía renovable (NREL).

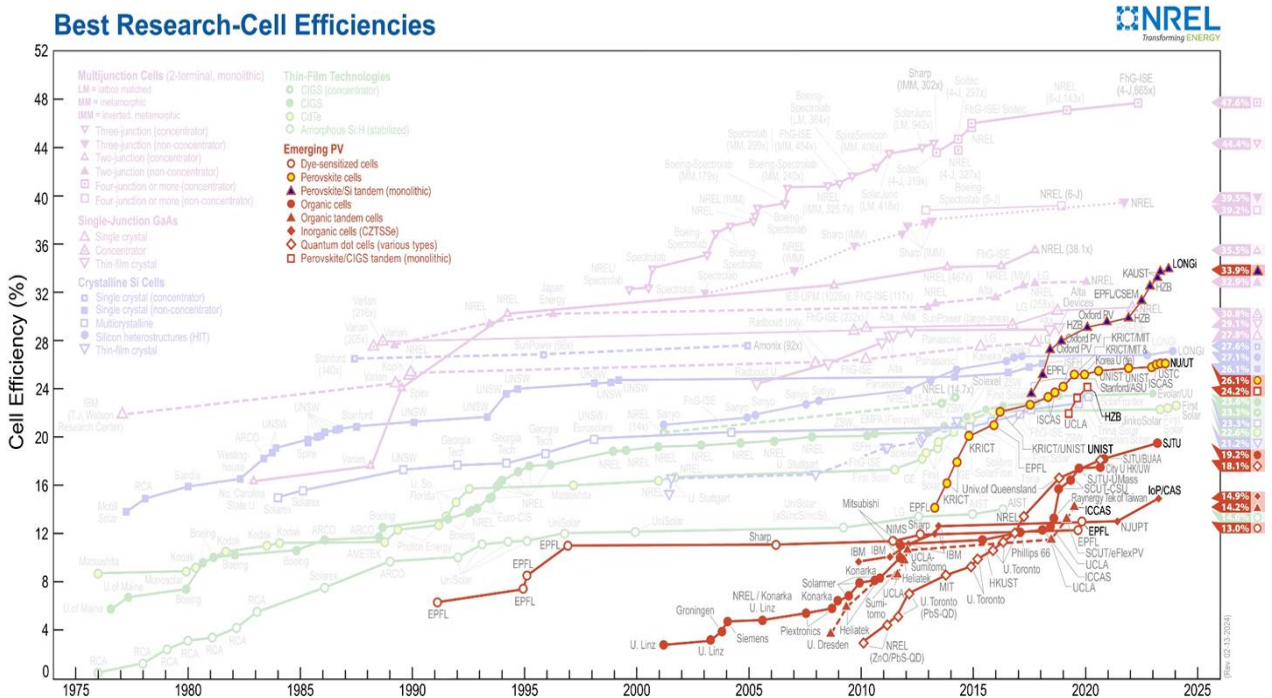
Esta técnica de intercambio de ligandos permite la síntesis de puntos cuánticos basado en cationes orgánicos, lo que proporciona una estabilidad excepcional y al mismo tiempo suprime los defectos internos en la capa fotoactiva de las celdas solares. Los resultados de esta investigación podrían impulsar el desarrollo de una celda solar de punto cuántico eficiente y así facilitar la comercialización de celdas solares de próxima generación”³¹.

³⁰ RÉCORD MUNDIAL DE EFICIENCIA Y GRAN DURABILIDAD EN CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA SEMITRASPARENTES -. Publicado 23 de febrero de 2024 [Fecha de consulta: 2 de marzo de 2024]. P.1., Disponible en: <https://noticiasdelaciencia.com/art/49705/record-mundial-de-eficiencia-y-gran-durabilidad-en-celulas-solares-de-perovskita-semitransparentes>

6. CELDAS SOLARES EMERGENTES: CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y FÍSICAS

Se considero el análisis más reciente de las características eléctricas de las diferentes celdas solares emergentes, según el Laboratorio Nacional de Energía Renovable; en donde se puede ver las celdas solares de tercera generación (emergentes).

Figura 14. Características eléctricas y físicas de celdas solares emergentes



Fuente: EFICIENCIAS ACTUALIZADAS DE CELDAS SOLARES EMERGENTES. Laboratorio de Nacional de Energía Renovable.,p.1. Disponible en: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>

³¹ INVESTIGADORES DESARROLLAN CELDAS SOLARES DE PUNTOS CUANTICOS DE ALTA EFICIENCIA -. Publicado 29 de febrero de 2024 [Fecha de consulta: 5 de marzo de 2024]. P.1., Disponible en: <https://www.electronicsonline.net.au/content/power/news/researchers-develop-high-efficiency-quantum-dot-solar-cells-1111787570>

Cuadro 4. Características eléctricas y físicas de celdas de tercera generación (emergentes)

Tipo de Celda solar emergente	Características eléctricas				Año
	PCE	FF	VOC	JSC	
Celda solar de sulfuro de estaño de zinc de cobre (CZTS) y derivados CZTSe y CZTSSe consideradas Inorgánicas	12.6[%]	0.698[%]	0.5134 [V]	35.1608[mA/cm ²]	2014-05
	13[%]	72.9[%]	0.529[V]	33.8969[mA/cm ²]	2021-07
	14.9[%]	72.5[%]	0.5554[V]	36.93 [mA/cm ²]	2023-05
Celda solar sensibilizada por colorante (DSSC)	11.9[%]	0.712[%]	0.744[V]	22.4644[mA/cm ²]	2012-10
	12.3[%]	0.791[%]	1.0203[V]	15.2406[mA/cm ²]	2019-09
	13[%]	0.804[%]	1.04[V]	15.55[mA/cm ²]	2020-12
Celda solar orgánica	17.5[%]	0.76[%]	0.881[V]	26.1366[mA/cm ²]	2020-09
	18.2[%]	0.789[%]	0.897[V]	25.7159[mA/cm ²]	2020-11
	19.2[%]	79[%]	0.9135[V]	26.61[mA/cm ²]	2023-04
Celda solar de perovskita	25.7[%]	84.6[%]	1.179[V]	25.7661[mA/cm ²]	2022-01
	26[%]	84[%]	1.19[V]	26[mA/cm ²]	2023-04
	26.1[%]	85.2 [%]	1.174 [V]	26.13 [mA/cm ²]	2023-08
Celda solar de punto cuántico (Quantum Dots) (QDSC)	16.55[%]	0.783[%]	1.168[V]	18.0965[mA/cm ²]	2018-12
	18.1[%]	0.758[%]	1.14[V]	20.9462[mA/cm ²]	2020-10
	19.1[%]	77.6 [%]	1.1695[V]	21.02 [mA/cm ²]	2023-04

Fuente: elaboración propia. Eficiencias de celdas solares de tercera generación (emergentes) según el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL). [en línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>

La densidad de corriente se halló con la siguiente formula: $J_{sc} = \frac{(P_{ce})(P_{in})}{(100\%)(V_{oc})(FF)}$

7. CONCLUSIONES

Esta revisión proporciona una pequeña descripción acerca de las celdas solares fotovoltaicas (PV) de primera, segunda y tercera generación, enfocándose en las diferentes configuraciones de celdas solares emergentes, identificando sus características eléctricas (PCE, J_{sc} , V_{oc} , FF), su estructura, funcionamiento, ventajas, desventajas, desafíos, estudios recientes e investigaciones a futuro en donde se busca mejorar la eficiencia/costo.

Las celdas solares orgánicas tienen un gran potencial de revolucionar la industria de la energía solar, debido; a su compatibilidad con tecnologías de impresión y la capacidad de producir celdas solares delgadas y flexibles, sin embargo; existen retos y desafíos como prevenir la recombinación, mejorar la absorción en la parte visible del infrarrojo cercano del espectro solar y optimizar las características morfológicas para el transporte de carga, otro reto que se tiene es la degradación de los materiales empleados en estas, por lo tanto; se está investigando cómo mantener el buen estado de estos materiales en condiciones de humedad, presencia de oxígeno, y radiación. A pesar de estos desafíos, investigadores han logrado y siguen buscando progresos de adaptabilidad y versatilidad en este tipo de celda y prometen muchos éxitos futuros.

Las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) son la tecnología emergente con eficiencia más baja (13%) y adicionalmente esta tecnología requiere de mejoras en su estabilidad. Se están buscando estrategias innovadoras para resolver estos problemas mediante la sustitución del electrolito líquido. Cabe resaltar que los materiales utilizados en DSSC como el TiO_2 , son asequibles, abundantes y seguros para el medio ambiente, además son fáciles de fabricar, incluso funciona en climas oscuros y la eficiencia en general no se ve afectada por altas temperaturas.

Las propiedades ópticas, eléctricas, la banda prohibida sintonizable y la estructurales versátil de las celdas solares de perovskita han permitido que esta tecnología tenga un desarrollo excepcional y se ha alcanzado la mayor eficiencia obtenida para celdas solares emergentes (26.1% en agosto del 2023). Estas celdas emergentes, de igual manera tiene desafíos por cumplir como cambiar materiales peligrosos para el medio ambiente (plomo) por otros que sean amigables y sobre todo mejorar su estabilidad para hacer viable su comercialización a gran escala.

Se observa en la gráfica NREL, las mejores eficiencias actualizadas obtenidas en las celdas solares emergentes o de tercera generación con los siguientes datos obtenidos: las celdas solares de perovskita con un 26.1 %, le sigue la celda solar orgánica con un 19.2%, la siguiente celda solar de punto cuántico con un 19.1%, le sigue la celda solar inorgánicas con un 14.9% y en ultimas se encuentra la celda solar sensibilizada por colorante con un 13%. Todas estas celdas fotovoltaicas de tercera generación están siendo estudiadas y prometen mejorar cada día más, siendo amigables con el medio ambiente y también tienen como reto mejorar la relación entre eficiencia/costo.

BIBLIOGRAFÍA

AVANCES EN CELDAS SOLARES EMERGENTES [en línea]. Estados Unidos: publicado en línea el 17 de marzo de 2020-. [Fecha de consulta: 14 de agosto 2022]. p.5. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7153392/>

AVANCES EN CELDAS FOTOVOLTAICAS ORGÁNICAS: UNA REVISIÓN EXHAUSTIVA DE MATERIALES, TECNOLOGÍAS Y RENDIMIENTO-. Publicado 19 de abril de 2023 [Fecha de consulta: 2 de diciembre 2023]. P.25. Numero de proyecto FCD-2023-8308. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/ra/d3ra01454a#tab2>

CAPAS COMPACTAS DE ZnO UTILIZADAS EN DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS DE TERCERA GENERACIÓN: UNA REVISIÓN -. Publicado 25 de junio del 2021 [Fecha de consulta: 10 de diciembre 2023]. P.16., volumen 56, paginas 15538-17571. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-021-06275-5>

CELIDAS SOLARES DIDIMENSIONALES BASADAS EN HALURO PEROVSKITAS PARA MEJORA DEL RENDIMIENTO Y LA ESTABILIDAD [en línea]. Colombia: publicado en febrero 8 de 2021-. [Fecha de consulta: 20 de octubre 2023]. P.1. Disponible en: <https://docs.google.com/document/d/1KqgbWXasEZs2M0-fUea3Gs6Jq2EMUg5j5TAJjAASpzs/edit>

CELDA FOTOVOLTAICA DE TERCERA GENERACIÓN [en línea]. Colombia: publicado en agosto del 2018-. [Fecha de consulta: 6 de diciembre 2023]. P.1. Disponible en: <https://www.hisour.com/es/third-generation-photovoltaic-cell-39628/>

CELDA SOLARES SENSIBILIZADAS CON TINTES NATURALES EXTRAIDOS DE SEMILLAS DE ACHIOTE, [en línea]. publicado en enero de 2010 -. [Fecha de consulta: 10 de noviembre 2023]. P.40-44. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024809001974>

DETERMINACIÓN TEÓRICA DE LA BANDA PROHIBIDA BAND GAD DEL $\text{Bi}(\text{OH})\text{CrO}_4$ EN SU ESTRUCTURA MÍNIMA, CELDA UNITARIA Y SISTEMA PERIÓDICO [en línea]. Bogotá: publicado en noviembre del 2015 -. [Fecha de consulta: 28 de octubre 2023]. P.21. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/2738f935-06f9-461f-98bf-8fda7d5bd607/content>

ESTUDIO DE LA OBTENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE PbS BAJO DISTINTAS CONDICIONES DE SÍNTESIS, [en línea]. publicado en diciembre del 2013 -. [Fecha de consulta: 30 de octubre 2023]. Matricula 1303474 P.15. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/3833/1/1080255490.pdf>

FACTOR DE LLENADO Y CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO [en línea]. Colombia: publicado en línea el año 1981-. [Fecha de consulta: 20 de septiembre 2022]. p.1. Disponible en: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lula-solar/factor-de-llenado>

INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES EN COLOMBIA [en línea]. Colombia: publicado en Bogotá el 2015 con convenio ATN/FM-12825-CO-. [Fecha de consulta: 20 de agosto 2022]. Cap.2. p.40. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf

INVESTIGADORES DESARROLLAN CELDAS SOLARES DE PUNTOS CUÁNTICOS DE ALTA EFICIENCIA -. Publicado 29 de febrero de 2024 [Fecha de consulta: 5 de marzo de 2024]. P.1., Disponible en: <https://www.electronicsonline.net.au/content/power/news/researchers-develop-high-efficiency-quantum-dot-solar-cells-1111787570>

MARTHA NAVARRO BURGOS. Caracterización de celdas solares orgánicas mediante espectroscopia de impedancias. Universidad Autónoma de Madrid., 2015.P.7.

MERCADO DE CELDAS SOLARES ENERGÍA Y POTENCIA [en línea]. Colombia: publicado en Julio de 2023-. [Fecha de consulta: 1 de octubre 2023]. P.1. Disponible en: <https://www.precedenceresearch.com/solar-cell-market>

MODELADO Y CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS [en línea]. Mexico ciudad de Chihuahua: publicado en mayo del 2013-. [Fecha de consulta: 28 de septiembre 2022]. p.44. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2338/1/ROBERTO%20HERRERA%20SALCEDO.pdf>

NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO METÁLICO FUNCIONALIZADAS PARA LA SENSIBILIZACIÓN EFICAZ POR COLORANTE. Ciencia de materiales para tecnologías energética. P.3. ISBN 472-481.

PAOLA JACQUELINE, fotosensibilizadores de colorantes orgánicos para DSSC (DYE – sensitized solar cells). Publicado en marzo del 2021 Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico P.3

PAOLA JACQUELINE, fotosensibilizadores de colorantes orgánicos para DSSC (DYE – sensitized solar cells). Publicado en marzo del 2021 Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico P.22.

OSCAR PERPIÑÁN LAMIGUEIRO, Energía Solar Fotovoltaica, España. 2023.C.1. P.15. [en línea]. Disponible en: <https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>

PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y OPTOELECTRÓNICAS DE PEROVSKITAS DE HALUROS HÍBRIDOS PARA CELDAS SOLARES. Publicado en el 2021. P.6. ISBN 91 (2021)106077).

RÉCORD MUNDIAL DE EFICIENCIA Y GRAN DURABILIDAD EN CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA SEMITRASPARENTES -. Publicado 23 de febrero de 2024 [Fecha de consulta: 2 de marzo de 2024]. P.1., Disponible en: <https://noticiasdelaciencia.com/art/49705/record-mundial-de-eficiencia-y-gran-durabilidad-en-celulas-solares-de-perovskita-semitransparentes>

REVISIÓN CRITICA SOBRE EL PROGRESO DE CELDAS SOLARES DE KESTERITA [en línea]. Colombia: publicado El 20 de noviembre del 2022-. [Fecha de consulta: 10 de diciembre 2023]. P.1. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aenm.202203046>

VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO [en línea]. Colombia: publicado en línea el 10 de marzo de 2006-. [Fecha de consulta: 20 de septiembre 2022]. p.1. Disponible en: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lula-solar/voltaje-de-circuito-abierto>