Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Avances recientes en la investigación de celdas solares orgánicas en México

Recent advances in organic solar cells research in Mexico

Salinas-García, I.U.[a, b], Castro-Carranza, A.[c], Vázquez, A.[a], Olivos-Lagunes, E. [b], Nolasco, J.C.[a, *]

[a] Centro de Investigaciones en Micro y Nanotecnología (Microna), Universidad Veracruzana, Adolfo Ruiz Cortines 455, C.P. 94294, Boca del Río, México.
[b] Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Avenida Universidad 350, C.P. 94910, Cuitláhuac, Veracruz.
[c] Laboratorio Internacional de Dispositivos Electrónicos Ambientales (LAIDEA UNAM), ENES Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Ant. Carretera a Patz 8701, C.P. 58190, Morelia, México.
20203j101008@utcv.edu.mx; accarranza@enesmorelia.unam.mx; avazquez@cio.mx; emilia.olivos@utcv.edu.mx; janolasco@uv.mx*

Innovación tecnológica: Celdas solares de tercera generación.

Área de aplicación industrial: Fotovoltaica.

Recibido: 12 enero 2024
Aceptado: 21 agosto 2024

Abstract

Due to the growing demand in the energy sector, alternative energy sources have been proposed instead of fossil fuels. Solar energy is produced mostly by crystalline silicon solar cells. Despite this, a new technology has emerged in recent years, organic solar cells (OSCs). These cells have advantages over silicon ones such as their low cost and their ability to be manufactured on flexible substrates. Their general composition is based on a photoactive layer surrounded by two electrodes and charge transporting buffer layers. At present, the efficiency achieved by these devices reaches up to 18%; however, OSCs still have to face challenges such as the degradation of their components due to thermal and photochemical factors. On the other hand, Mexico has a great potential to harness solar energy, even more than countries as England or Germany. In Mexico there is also a wide line of research in the field of OSCs reporting up to 25 papers published since 2018. In this work, a review is going to be made about the advances in OSOs in the areas of: synthesis of new materials for active layers, transport layers, contact improvement, simulation, degradation studies and characterization of interfaces. It was found the maximum efficiency reached by Mexican

researchers was 10.85%. On the other hand, new proposals for the active layer with small molecules and ferrous nanoparticles were mentioned. In the case of transport layers, graphene derivates and nanoparticles were used. Regarding the simulation field, phenomena present in OSCs active layers were studied. For this purpose, software programs such as Silvaco/ ATLAS TCAD and Afors-HET were mentioned. Finally, the most used material characterization methods in organic solar cells are addressed.

Keywords: Progress, Organic solar cells, Energy, Mexico.

Resumen

A causa de la creciente demanda en el sector energético, se han propuesto energías alternativas en lugar de la generada por combustibles fósiles. La energía solar es producida mayormente por celdas solares de silicio cristalino. A pesar de esto, en los últimos años ha surgido una nueva tecnología, las celdas solares orgánicas (por sus siglas en inglés, Organic Solar Cells, OSC). Estas celdas presentan ventajas respecto a las de silicio como lo es su bajo costo y su capacidad de fabricarse sobre sustratos flexibles. Su composición general está basada en una capa fotoactiva rodeada de dos electrodos y capas intermedias trasportadoras de carga. Actualmente, la eficiencia alcanzada por estos dispositivos llega hasta el 18%, sin embargo, las OSC aún tienen que afrontar retos como lo es la degradación de sus componentes debido a factores térmicos y fotoquímicos. Por otro lado, México tiene un gran potencial de aprovechar la energía solar, incluso mayor que países como Inglaterra y Alemania. Además, en México existe una amplia línea de investigación en el campo de las OSC reportándose hasta 25 trabajos publicados desde el 2018. En este trabajo se realizó una revisión sobre los avances en las OSC en las áreas de: síntesis de nuevos materiales para la capa activa, capas transportadoras, mejora de contactos, simulación, estudios de degradación y caracterización de las interfaces. Se encontró que la máxima eficiencia alcanzada por investigadores mexicanos fue del 10.85%. Por otro lado, se mencionaron propuestas para la capa activa con moléculas pequeñas y nanopartículas ferrosas. En el caso de las capas transportadoras se utilizaron derivados del grafeno y nanopartículas. En cuanto al área de simulación se estudiaron principalmente los fenómenos presentes en la capa activa de las OSC. Para ello, fueron mencionados programas de simulación como Silvaco/ ATLAS TCAD y Afors-HET. Finalmente, se abordan los métodos de caracterización de materiales más usados en celdas solares orgánicas.

Palabras clave: Avances**,** Celdas solares orgánicas, Energía, México.

1. Introducción

Existe una extensa investigación por parte de los científicos para remplazar las energías fósiles con alternativas que no dañen tanto al medio ambiente considerando que existen recursos limitados (Halkos and Gkampoura, 2020). El desarrollo de energías renovables como lo es la eólica, solar e hidráulica ha surgido como respuesta a la necesidad de nuevas fuentes de energía para sustituir a los combustibles fósiles que cubren 85% de la demanda energética en el mundo (Liu et al., 2020).

Hoy en día la tecnología solar sigue siendo encabezada por las celdas solares de silicio cristalino (c-Si) debido a que se puede obtener en forma pura, además de que puede fácilmente transportar cargas. Gracias a esto, es posible crear módulos que pueden suministrar eficiencias de conversión de energía que superiores al 24% para un área del módulo que sobrepasa $1m^2$. Adicional a esto, los dispositivos de silicio tienen un periodo de vida mayor a los 25 años (Moser et al., 2021). La tecnología orgánica fotovoltaica ha sido propuesta como una alternativa de bajo costo, además de que promete contribuir a la lucha contra el cambio climático que es causado por las emisiones desmedidas de CO_2. Las celdas solares con esta tecnología tienen varias ventajas, por ejemplo, se pueden fabricar en grandes áreas sobre plásticos flexibles, lo que permite nuevas aplicaciones respecto al rígido Silicio, como lo son su aplicación sobre textiles y superficies no planas (Wu et al., 2021).

El componente principal de una celda fotovoltaica orgánica es una capa activa que absorbe la luz rodeada por dos electrodos. En las OSC´s más sencillas existe un electrodo transparente conductor, una capa absorbente y un electrodo metálico que se depositan una tras otra sobre un sustrato. Un ejemplo de electrodo transparente puede ser el óxido de indio y estaño (ITO) depositado sobre vidrio (Lee et al., 2021). La capa encargada de absorber luz en los sistemas fotovoltaicos orgánicos (por sus siglas en inglés, Organic Photovoltaic, OPV) con mayor eficiencia suele ser una combinación de dos materiales semiconductores orgánicos (uno donante y otro aceptor) que generalmente forman una heterounión de volumen (BJH bulk-herojunction). Como materiales donantes, tenemos polímeros conjugados, oligómeros o pigmentos conjugados. Por otro lado, los materiales aceptores son generalmente derivados de fullerenos (Hou et al., 2018). Finalmente se deposita un metal conductor, que normalmente es reflectante, el cual hace pasar por segunda vez la luz que no fue absorbida a través del dispositivo. También existen capas adicionales que se pueden colocar entre la capa absorbente y los contactos, que generalmente se utilizan para crear barreras energéticas para electrones y huecos, y lograr una extracción de estos hacia el contacto adecuado. Los materiales de los que pueden estar compuestos estas últimas capas pueden ser metales de baja o alta función de trabajo, óxidos metálicos (MoO_3, ZnO, TiO_2) u otros materiales orgánicos (Duan and Uddin, 2020).

El principio de funcionamiento de las OSC puede ser resumido de la siguiente forma: en primer lugar, llegan los fotones con una energía hv (ver Figura 1) e inciden en la capa activa, a su vez estos fotones excitan a los electrones haciendo que pasen del nivel Orbital Molecular más Alto Ocupado (por sus siglas en inglés, HOMO) al Orbital Molecular más Bajo No Ocupado (por sus siglas en inglés, LUMO) y generando un par electrón-hueco (también llamado excitón). Los excitones que llegan a la interfase del material donante-aceptor se disocian: los electrones se van hacia el aceptor y los huecos hacia el material donante. Posteriormente los electrones son dirigidos hacia el cátodo y los huecos al ánodo generándose una corriente eléctrica.

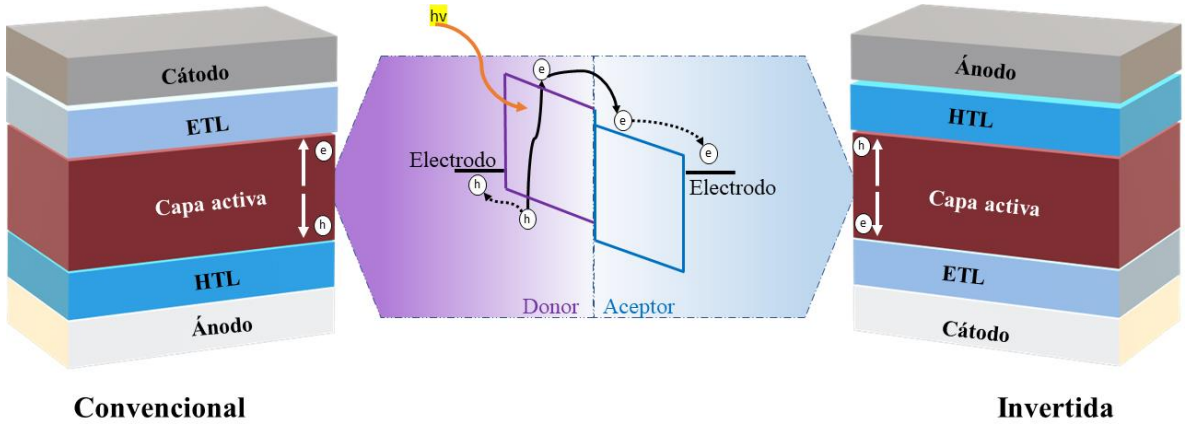


Figura 1. Esquemas de la estructura (convencional e invertida) de una OSC, de un diagrama de bandas con contacto que muestra el principio de funcionamiento en la capa activa.

Uno de los principales retos que deben afrontar las OSC es la degradación por el oxígeno y la humedad. Entre los componentes que pueden degradarse están los semiconductores orgánicos debido a factores térmicos y fotoquímicos (a causa de la presencia de dobles enlaces y a las fuerzas débiles intermoleculares). Asimismo, se pueden ver dañados los electrodos y las películas de transporte (Moser et al., 2021). Para evitar esta degradación se han propuesto varias soluciones, una de ellas es fabricar las OSC de manera invertida (ver Fig. 1), es decir, una celda en las que las capa de transporte de electrones (ETL por sus siglas en inglés, Electron Transport Layer) y huecos (HTL, por sus siglas en inglés, Hole Transport Layer) están intercambiadas con el cátodo y el ánodo quedando con la siguiente estructura: Cátodo/ETL/Capa activa/HTL/Ánodo (Bishnoi et al., 2022). De esta forma se evita la degradación en la ETL, que es la capa que experimenta una mayor degradación debido a su baja función de trabajo.

De igual forma, para frenar estos efectos de degradación por periodos largos, las celdas OPVs se pueden encapsular con materiales de barrera con índices de permeación de oxígeno y agua más bajos que los materiales de sustrato flexible convencionales. Se ha propuesto la utilización de materiales puros con morfologías de película densa y ordenada para reducir los efectos térmicos (Uddin et al., 2019). Actualmente las celdas OPV han alcanzado eficiencias de hasta 18% (NREL, 2023). Sin embargo, el desarrollo de estos dispositivos aun representa un reto para escalarlo a nivel industrial y que sea comercialmente viable.

México tiene un gran potencial para explotar la energía del sol. La capacidad para aprovechar la energía solar es incluso mayor que países desarrollados como lo son Alemania e Inglaterra (Kannan and Vakeesan, 2016). Por la parte de las OSC´s, existen tanto de centros de investigación como de universidades dedicadas al desarrollo de esta nueva tecnología fotovoltaica.

En esta revisión se hará un recuento de todos los avances respecto a las celdas solares orgánicas en México. Se comenzará con recuento de máximas eficiencias logradas pasando por nuevas propuestas tanto en la capa activa, como las capas de transporte de huecos y electrones. Además, se abordarán diversos estudios entre los que destacan, simulación, degradación, fenómenos interfaciales y caracterización de las capas.

2. Investigación de las celdas solares orgánicas en México

Existe una amplia investigación sobre la energía solar en México. Por el lado de las celdas solares orgánicas (OSC) hay alrededor de 25 trabajos reportados desde el 2018 teniendo mayor publicación en el año 2018, 2019 y 2021 (ver Figura 2) según el buscador LENS.ORG.



Figura 2. Número de publicaciones sobre OSC en México desde el 2018 según LENS.ORG.

2.1 Eficiencias récord en OSC

En la

Tabla 1 se muestran las eficiencias de las celdas solares orgánicas desarrolladas en México que van desde ~1% hasta ~11%. La máxima eficiencia es alcanzada por Ramírez-Como et al. (2021) cuando incorporaron una molécula pequeña p-DTS(FBBTh$_2$)$_2$ [1] como material donante y el PC$_{70}$BM como aceptor en celdas solares orgánicas invertidas de uso interior. Se logra una eficiencia de 10.85% cuando se utiliza el material PFN como capa de transporte de electrones. En segundo lugar, se alcanzó una eficiencia de conversión energética (PCE) de 9% cuando se fabricó una celda incorporando una molécula pequeña de nombre DRCN5T. La estructura de esta celda es: vidrio/ITO/PEDOT: PSS/ DRCN5T[2]: [70]PCBM/PFN/FM. Este dispositivo fue sometido a tratamiento térmico y un recocido con vapor de solvente (Caballero-Quintana et al., 2020). En tercer lugar, se encuentra el trabajo de Amargós-Reyes et al. (2020) en el que construyen una celda con los componentes ITO/PEDOT:PSS/PBDB-T:ITIC/PFN/Metal de Field alcanzando un PCE promedio de 8.8%.

[1] *7,7'-(4,4-bis(2-etilhexil)-4H-silolo[3,2-b:4,5-b']ditiofeno-2,6-diil)bis(6-fluoro-4- (5'-hexil-[2,2'-bitiofen]-5-il)benzo[c]tiadiazol)*

[2] *2,2'-[(3,3''',3'''',4'-tetraoctilo[2,2':5',2'':5'',2''''':5 ",2''''-quinquetiofeno]-5,5''''-diil)bis[(Z)-metilidina(3-etil-4-oxo-5,2-tiazolidinadiilideno)]]bis-propanodinitrilo*

Tabla 1. Eficiencia de conversión de energía (PCE) de las celdas solares orgánicas (OSC) fabricadas en México.

Autores	*Institución*	*Año*	*PCE*
Ramírez-Como *et al.*	Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN)	2021	10.85%
Caballero-Quintana *et al.*	Centro de Investigaciones en Óptica	2020	9%
Amargós-Reyes *et al.*	Centro de Investigaciones en Óptica	2020	8.8%
Nicasio-Collazo *et al.*	Centro de Investigaciones en Óptica	2019	7.67%
Romero-Borja *et al.*	Centro de Investigaciones en Óptica	2018	6.73%
Riviera-Taco *et al.*	Centro de Investigaciones en Óptica	2021	6.4%
Ramírez-Como *et al.*	Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN)	2019	4.77%
Fernández-Arteaga *et al.*	Centro de Investigaciones en Óptica	2021	4.2%
Cruz-Gómez *et al.*	Universidad Autónoma de Querétaro	2021	2.88%
Espinosa-Roa *et al.*	Centro de Investigación en Química Aplicada, & Centro de Investigaciones en Óptica AC	2018	1.19%
Nolasco *et al.*	Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, UNAM	2018	1.02%

Fuente: elaboración propia.

2.2 Nuevos materiales como capa activa

Diversos investigadores mexicanos han propuesto alternativas a los materiales donantes y aceptores presentes en las OSC. En la Tabla 2 se resumen las nuevas propuestas. En primer lugar, está el trabajo de Oviedo-Mendoza et al. (2021) en el que ocupan un nanocompuesto (NC) semiconductor de TiO_2/CdS con los polímeros P3HT[3]: [4]PCBM como capa absorbente. La incorporación del NC tiene como consecuencia un mejoramiento de las propiedades ópticas y electrónicas del dispositivo.

[3] *Poli(3-hexiltiofeno)*

[4] *Ester metélico del ácido del ácido [6,6]-fenil-C_{61}*

Tabla 2. Nuevas propuestas para la capa activa de celdas solares orgánicas.

Autores	*Institución*	*Año*	*Capa activa*
García-Carvajal et al	Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad León	2023	Nanopartículas de FeS2 en P3HT
Rodríguez-Rea et al.	Universidad Autónoma del Estado de Morelos	2022	Derivados del oligómero DPP (TT y BTT)
Oviedo-Mendoza et al.	Universidad de Guanajuato	2021	Nanocompuesto TiO2/CdS con P3HT: PCBM
Ramírez-Como et al.	Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN)	2021	p-DTS(FBBTh2)2: PC70BM
Ledesma-Juárez et al.	Universidad Autónoma del Estado de Morelos	2019	PFBT-HH: PC71BM
Amargós-Reyes et al.	Centro de Investigaciones en Óptica	2019	Nanocristales de FeS2 en PTB7:PC71BM
Romero-Borja et al.	Centro de Investigaciones en Óptica	2018	PTB7:[70]PCBM: SPFG
Espinosa-Roa et al.	Centro de Investigación en Química Aplicada, & Centro de Investigaciones en Óptica AC	2018	PM: PCBM
Nolasco et al.	Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, UNAM	2018	Borinato (B3): C60

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, también se encuentra el trabajo de Ramírez-Como et al. (2021) en el que sintetizan una molécula pequeña como material donante en la capa activa logrando un PCE de 10.85%. Por otra parte, Ledesma-Juárez et al. (2019) sintetizaron 3 polímeros por un método de arilación directa. Los polímeros son PFBT-HH, PFBT-HF y PFBT-FF los cuales tienen propiedades fotovoltaicas. Cuando los investigadores construyeron una celda con la estructura: vidrio/ITO/PEDOT: PSS/PFBT-HH: $PC_{71}BM$/ PFN/Metal de Field se logra una eficiencia de 2.3%. Mientras que, Rodríguez-Rea et al. (2022) sintetizaron novedosas pequeñas moléculas, y las aplicaron en celdas solares orgánicas ternarias.

También se utilizó grafeno funcionalizado procesable en solución (SPFG) como componente ternario en una capa activa compuesta de PTB7:[70]PCBM. El estudio concluyó que el mayor PCE (6.73%) se obtiene cuando se incorpora el SPFG en la

capa activa utilizando PEDOT: PSS como capa de transporte de huecos (HTL) (Romero-Borja et al., 2018). Por otro lado, Espinosa-Roa et al. (2019) sintetiza y caracterizan tres copolímeros del polifluoreno (PA1, PA2 y PM[5]) con aplicaciones en la capa activa. La adición de PM en la OSC tuvo un voltaje de circuito abierto (V_{OC}) de hasta 0.92 V y un PCE del 1.19%.

Siguiendo con la línea de investigadores, Nolasco et al. (2018) utilizaron cromóforos de boro que hacen la función de donantes en celdas de heterounión plana. Estas celdas presentan una distribución del tipo ITO/MoO_3/Borinato/C_{60}/BCP[6]/Al. Estos cromóforos de boro presentan varias ventajas como la facilidad de síntesis, ajuste de sus propiedades electrónicas y altos coeficientes de absorción a gran longitud de onda. La mayor eficiencia (1.02%) se presentó cuando en la molécula de boro se cambiaron los grupos dimetil por dietil.

Finalmente, en una investigación de García-Carvajal et al. (2023) en la que incorporaron nanopartículas de FeS_2 en el polímero donante P3HT. Ellos proponen un método novedoso para obtener compuestos de P3HT/FeS_2. El método consiste en la dispersión de NPs inorgánicas en la solución de los monómeros previo al proceso de polimerización. Este composito es parte de una celda solar con la estructura ITO/PEDOT: PSS/ (P3HT/FeS_2): $PC_{71}BM$/PFN/Metal de Fields. La eficiencia de este dispositivo alcanzó el 1.72%. Otros autores como Amargós-Reyes et al. (2019) también propusieron una capa activa novedosa aplicando nanopartículas de FeS_2 al integrarlas en una capa de PTB7:$PC_{71}BM$ en celdas ternarias. La eficiencia mayor que lograron fue de 6.47%.

2.3 Nuevos materiales como capas de transporte de huecos y electrones

Existen estudios que han intentado mejorar o sustituir las capas de las OSC. En la Tabla 3 se hace un recuento de los materiales utilizados como capa de transporte de huecos y de electrones. Con respecto a las HTL´s está el trabajo de Rivera-Taco et al. (2021) en el que incorporan nanopartículas de plata (AgNPs) en una capa del material PEDOT: PSS. Estas nanopartículas son capaces de aumentar la absorción de luz gracias a la resonancia de plasmón de superficie (RPS). Por consiguiente, estas celdas alcanzaron 6.4% de PCE. Por otra parte, Amargós-Reyes et al. (2020) usaron el óxido de grafeno fluorado reducido (FrGO) como HTL en celdas con estructura ITO/HTL/PBDB-T: ITIC/PFN/Metal de Field. Cuando se combinó el PEDOT:PPS con el FrGO se logró 8.2% de eficiencia y cuando solo se ocupó el FrGo, solamente se alcanzó 5.3% de PCE. También existen investigaciones en las que se ha intentado utilizar derivados del óxido de grafeno. Por una parte, está la de Nicasio-Collazo et al. (2019) en el que sintetizan un óxido de grafeno fluorado reducido (F_5-rGO) como HTL en una celda con una capa activa de PTB7:$PC_{71}BM$. Se observaron resultados interesantes cuando el F_5-rGO es utilizado como capa intermedia entre ITO y el PEDOT: PSS alcanzando un PCE de 7.67%. Finalmente, está el trabajo de Romero-Borja et al. (2018) en el que utilizan óxido de grafeno reducido (rGO) como sustituto al PEDOT: PSS en las OSC.

[5] *Reacción de los compuestos 3-hexiltiofeno (PA1), 3-octiltiofeno (PA2) y 3,4-etilendioxitiofeno (PM) con el monómero 2,2'-(9,9-dioctil- 9H -fluoreno-2,7-diil) bistiofeno*

[6] *Batocuproína*

Tabla 3. Materiales sustitutos en las HTL y ETL de las celdas solares orgánicas.

Autores	*Institución*	*Año*	*HTL*	*PCE*
Rivera *et al*.	Centro de Investigaciones en Óptica	2021	Nanopartículas de Ag con PEDOT: PSS	6.4%
Amargós *et al.*	Centro de Investigaciones en Óptica	2020	FrGO y FrGO con PEDOT: PSS	5.3% y **8.2%**
Nicasio *et al.*	Centro de Investigaciones en Óptica	2019	F_5-rGO con PEDOT: PSS	**7.67%**
Romero *et al.*	Centro de Investigaciones en Óptica	2018	Óxido de grafeno reducido	-
			ETL	
Ramírez *et al*.	CINVESTAV-IPN	2019	Material HIZO	4.77%
Barquera *et al.*	CINVESTAV-IPN Unidad Querétaro	2019	Nanopartículas de Ag con PFN	2.63%

Fuente: elaboración propia.

En el apartado de la Tabla 3 de capas transportadoras de electrones (ETL) está la investigación de Ramírez-Como et al. (2019) en la que utilizan óxido de hafnio-indio-zinc (HIZO) como ETL en celdas solares orgánicas invertidas (iOSC) utilizando una heterounión de volumen de PTB7[7]: $PC_{71}BM$[8]. Los resultados mostraron 4.77% de eficiencia máxima. Finalmente, Barquera-Bibiano et al. (2019) incorporó nanopartículas de plata sintetizadas por vía verde con el material PFN[9]. Se reportó 2.63%.de eficiencia para estos dispositivos.

2.4 Mejora de los contactos

También existen trabajos dedicados a sustituir al óxido de indio y estaño (ITO). Por un lado, está Fernández-Arteaga et al. (2021) que ocupa un derivado del grafeno procesado en solución y un ánodo de bicapa basado en PH1000 (polímero conductivo PEDOT: PSS) como una alternativa al ITO. Este estudio alcanza un PCE de 4.2% cuando se emplean estos materiales con una capa activa de PBDB-T: ITIC. Asimismo, Cruz-Gómez et al. (2021) sustituyen el ITO con el óxido de estaño dopado con flúor (FTO), el cual es menos costoso. También, el *ZnO* es cambiado por el TiO_2 como ETL resultando en una estructura de celda invertida del tipo FTO/TiO_2/PTB7:$PC_{70}BM$/MoO_3/Ag. Estas celdas mostraron 2.88% como mayor eficiencia.

2.5 Simulación y Modelado

Si se habla de simulación de materiales se puede citar el artículo de Lastra et al. (2018) donde hacen un estudio de la influencia de diferentes capas transportadoras en celdas con una capa activa de PTB7-Th: $PC_{70}BM$ usando el simulador Silvaco/ATLAS TCAD. De igual forma, está el trabajo de Nolasco et al. (2019) en el que estudia los semiconductores con dopado no intencional presentes en las OSC. El trabajo menciona que el voltaje de circuito abierto (V_{OC}) de los semiconductores está limitado por el potencial interconstruido originado por la heterounión de volumen donante-aceptor (p-n^{++}). Esto se corroboro con una heterounión de P3HT: PCBM y con otras reportadas en la literatura. Por otro lado, la investigación de

[7] *Poli({4,8-bis[(2-etilhexil)oxi]benzo[1,2-b:4,5-b']ditiofeno-2,6-diil}{3-fluoro-2-[(2-etilhexil)carbonil]tieno[3,4-b]tiofendiil})*
[8] *Éster metílico del ácido butírico [6,6]-fenil C_{71}*
[9] *Poli[(9,9-bis(3'-(N,N-dimetilamino)propil)-2,7-fluoreno)-alt-2,7-(9,9-dioctilfluoreno)]*

Castro-Chacón et al. (2022) en la que se analizan fenómenos interfaciales cuando se varía un tercer componente en la capa activa de una celda solar orgánica ternaria. Para estudiar el efecto de la variación del V_{oc}, los investigadores propusieron un modelo analítico basado en características de corriente en oscuridad. Este análisis lo realizaron a diferentes temperaturas en una celda con la estructura PTB7-Th: PC71BM: ICBA. Por último, (Vázquez et al., 2022) probaron la funcionalidad de tres compuestos de boro como material ternario en celdas solar ternarias usando diferentes capas donoras y un simulador numérico (Afors-HET).

2.6 Estudios de degradación

En cuanto estudios de degradación, está el trabajo de Barreiro-Argüelles et al. (2018) donde se estudia la estabilidad y la eficiencia de celdas solares orgánicas con la heterounión de volumen de PTB7:$PC_{71}BM$ y el metal de Field (FM) como electrodo superior. El estudio se hace cuando el área activa de estas celdas se escala en un factor de 25. Asimismo, está el trabajo de Lastra et al. (2019) en el que se examina el cambio de las propiedades eléctricas cuando una iOSC es expuesta al aire. La celda tiene una capa activa de PTB7-Th: $PC_{70}BM$. Además, se analiza el cambio de los parámetros con el simulador ATLAS/Silvaco.

2.7 Morfología y espectroscopia de impedancia

Entre los trabajos enfocados en la caracterización de los materiales de las OSC se encuentra el de Caballero-Quintana et al. (2020) que utilizan las microscopías de sonda de barrido (SPM) para analizar las capas de PBDB-T[10], ITIC[11] y PBDB-T: ITIC presentes en las OSC. Algunas microscopías que se mencionan son las microscopías de túnel de barrido (STM), la microscopía de fuerza electrostática (EFM), y la microscopía de fuerza atómica fotoconductora (pc-AFM). De igual forma Amargós-Reyes et al. (2019) hacen un estudio de las características de los polímeros donantes PTB7 y PTB7-Th. Algunas de estas propiedades se estudiaron con microscopía de fuerza atómica (AFM), STM, y difracción de rayos X (XRD). Además, se analizó la relación entre el espesor de la capa activa de PTB7-Th y la eficiencia cuática interna y externa utilizando simulación y mediciones experimentales. Para concluir, las investigaciones de Caballero-Quintana et al. (2018) analizan capas de PEDOT: PSS, P3HT y P7BT con caracterizaciones STM y pc-AFM.

Por otro lado, la espectroscopia de impedancia ha sido utilizado para estudiar fenómenos de transferencia de carga en las celdas solares orgánicas. Particularmente, Amargós-Reyes et al. (2019a) investigaron mediante espectroscopia de impedancia la funcionalidad de un segundo aceptor en la capa activa. El artículo trata sobre el uso de nanocristales de sulfuro de hierro de pirita no tóxicos como segundo aceptor de electrones en células fotovoltaicas orgánicas basadas en PTB7: PC71BM. Las mediciones de espectroscopía de impedancia muestran que los dispositivos con nanocristales de pirita tienen una mayor resistencia a la recombinación que el dispositivo de referencia, lo que indica menos pérdidas por recombinación de carga.

3. Conclusiones

En la investigación de celdas solares orgánicas en México, se han reportado 25 trabajos desde el 2018. Los trabajos están relacionadas a la síntesis de nuevos componentes de capa activa, capas

[10] *Poli[[4,8-bis[5-(2-etilhexil)-2-tienil]benzo[1,2-b:4,5-b']ditiofeno-2,6-diil]-2,5-tiofendiilo [5,7-bis(2-etilhexil)-4,8-dioxo-4H,8H-benzo[1,2-c:4,5-c']ditiofeno-1,3-diilo]]*

[11] *2,2'-[[6,6,12,12-Tetrakis(4-hexilfenil)-6,12-dihidroditieno[2,3-d:2',3'-d']-s-indaceno[1, 2-b:5,6-b']ditiofeno-2,8-diil]bis[metilidino(3-oxo-1H-indeno-2,1(3H)-diilideno)]]bis[propanodinitrilo]*

transportadoras y electrodos. Además, se encuentran estudios de simulación, degradación y caracterización de la morfología de las capas de la celda. Las máximas eficiencias reportadas alcanzan 10.85% (Ramírez *et al.*, 2021), 9% (Caballero *et al*., 2020a) y 8.8% (Amargós *et al.*, 2020). Como nuevas propuestas de capa activa encontramos nanocompuestos, polifluorenos y borinatos. Los materiales que mejor se desempeñaron fueron los que incorporaron moléculas pequeñas (p-DTS(FBBTh$_2$)$_2$) y los derivados del grafeno (SPFG) alcanzando eficiencias de 10.85% y 6.73%, respectivamente. Por otro lado, se intentó mejorar las capas de transporte de huecos y electrones adicionando nanopartículas, óxidos y óxidos de grafeno. Las eficiencias óptimas se logran al incorporar los derivados del grafeno FrGO y F_5-rGO con el material PEDOT: PSS en la capa de transporte de huecos.

4. Agradecimientos

DGAPA UNAM Proyecto PAPIME PE112323.

5. Referencias

Amargós-Reyes, O., Caballero-Quintana, I., Maldonado, J.-L., Nicasio-Collazo, J., Romero-Borja, D., 2020. Single graphene derivative layer as a hole transport in organic solar cells based on PBDB-T:ITIC. Appl. Opt. 59, 8285. https://doi.org/10.1364/AO.402510

Amargós-Reyes, O., Maldonado, J.-L., Martínez-Alvarez, O., Nicho, M.-E., Santos-Cruz, J., Nicasio-Collazo, J., Caballero-Quintana, I., Arenas-Arrocena, C., 2019a. Nontoxic pyrite iron sulfide nanocrystals as second electron acceptor in PTB7:PC 71 BM-based organic photovoltaic cells. Beilstein J. Nanotechnol. 10, 2238–2250. https://doi.org/10.3762/bjnano.10.216

Amargós-Reyes, O., Maldonado, J.-L., Romero-Borja, D., Barreiro-Argüelles, D., Caballero-Quintana, I., Barbosa-García, O., Gaspar, J.A., 2019b. Organic photovoltaic cell analysis through quantum efficiency and scanning tunneling microscopy of the donor/blend as an active film. J. Mater. Sci. 54, 2427–2445. https://doi.org/10.1007/s10853-018-2956-2

Barquera-Bibiano, Z., Maldonado, J.L., Manzano-Ramírez, A., López-Romero, J.M., Torres-Delgado, G., González-Ortiz, L.J., Pérez-Fonseca, A.A., Robledo-Ortiz, J.R., González-Núñez, R., López-Naranjo, E.J., 2019. Increasing the efficiency of organic solar cells by using a bulk electron transport layer of PFN and green synthesized AgNs. Mater. Lett. 237, 101–104. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.065

Barreiro-Argüelles, D., Ramos-Ortiz, G., Maldonado, J.-L., Pérez-Gutiérrez, E., Romero-Borja, D., Meneses-Nava, M.-A., Nolasco, J.C., 2018. Stability study in organic solar cells based on PTB7:PC71BM and the scaling effect of the active layer. Sol. Energy 163, 510–518. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.090

Bishnoi, S., Datt, R., Arya, S., Gupta, S., Gupta, R., Tsoi, W.C., Sharma, S.N., Patole, S.P., Gupta, V., 2022. Engineered Cathode Buffer Layers for Highly Efficient Organic Solar Cells: A Review. Adv. Mater. Interfaces 9, 1–31. https://doi.org/10.1002/admi.202101693

Caballero-Quintana, I., Amargós-Reyes, O., Maldonado, J.-L., Nicasio-Collazo, J., Romero-Borja, D., Barreiro-Argüelles,

D., Molnár, G., Bousseksou, A., 2020. Scanning Probe Microscopy Analysis of Nonfullerene Organic Solar Cells. ACS Appl. Mater. Interfaces 12, acsami.0c06048. https://doi.org/10.1021/acsami.0c06048

Caballero-Quintana, I., Maldonado, J., Meneses-Nava, M., Barbosa-García, O., Valenzuela-Benavides, J., Bousseksou, A., 2018. Semiconducting Polymer Thin Films Used in Organic Solar Cells: A Scanning Tunneling Microscopy Study. Adv. Electron. Mater. 5, 1800499. https://doi.org/10.1002/aelm.201800499

Castro-Chacón, A., Castro-Carranza, A., Amargós-Reyes, O., Maldonado, J.-L., Hernández-Cristóbal, O., Guzmán-Caballero, D., Mejía, I., Vázquez, A., Gutowski, J., Nolasco, J.C., 2022. Relationship between the V OC Tuning Effect and the Interface Activation Energy Due to the Third Component Concentration in Ternary Organic Solar Cells. ACS Appl. Energy Mater. 5, 4288–4295. https://doi.org/10.1021/acsaem.1c03888

Cruz-Gómez, J., García-Alvarado, G.I., Pal, M., Mayén-Hernández, S.A., De Moure-Flores, F., Sosa-Domínguez, A., Aruna-Devi, R., Santos-Cruz, J., 2021. Performance efficiency of an organic solar cell FTO:PTB7:PC70BM free of ITO and its degradation. Optik (Stuttg). 247, 167961. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167961

Duan, L., Uddin, A., 2020. Progress in Stability of Organic Solar Cells. Adv. Sci. 7. https://doi.org/10.1002/advs.201903259

Espinosa-Roa, A., Cruz-Carrillo, M. de J., Ledesma-Juárez, A., Montoya del Angel, A., Romero-Borja, D., Güizado-Rodríguez, M., Rodríguez, M., Galindo, R., Maldonado, J.L., Barba, V., 2019. Synthesis of polyfluorenes by oxidative polymerization, their characterization and implementation in organic solar cells. J. Mater. Sci. Mater. Electron. 30, 2716–2725. https://doi.org/10.1007/s10854-018-0547-2

Fernández-Arteaga, Y., Maldonado, J.-L., Nicasio-Collazo, J., Meneses-Nava, M.-A., Rodríguez, M., Barbosa-García, O., Sierra, U., Fernández, S., Frontana-Uribe, B.A., 2021. Solution processable graphene derivative used in a bilayer anode with conductive PEDOT:PSS on the non-fullerene PBDB-T:ITIC based organic solar cells. Sol. Energy 225, 656–665. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.049

García-Carvajal, S., Palestina-Landa, H., Nicho, M.E., Arenas-Arrocena, M.C., Maldonado, J.L., Hernández-Martínez, D., Santos-Cruz, J., Altuzar-Coello, P., 2023. Effect of incorporating iron II disulfide to poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) on its physicochemical properties and influence in photovoltaic devices. Polym. Bull. 80, 6079–6098. https://doi.org/10.1007/s00289-022-04342-8

Halkos, G.E., Gkampoura, E.-C., 2020. Reviewing Usage, Potentials, and Limitations of Renewable Energy Sources. Energies 13, 2906. https://doi.org/10.3390/en13112906

Hou, J., Inganäs, O., Friend, R.H., Gao, F., 2018. Organic solar cells based on non-fullerene acceptors. Nat. Mater. 17, 119–128. https://doi.org/10.1038/nmat5063

Kannan, N., Vakeesan, D., 2016. Solar energy for future world: - A review.

Renew. Sustain. Energy Rev. 62, 1092–1105. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022

Lastra, G., Balderrama, V.S., Resendiz, L., Pallares, J., Garduno, S.I., Cabrera, V., Marsal, L.F., Estrada, M., 2018. High-Performance Inverted Polymer Solar Cells: Study and Analysis of Different Cathode Buffer Layers. IEEE J. Photovoltaics 8, 505–511. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2782568

Lastra, G., Balderrama, V.S., Resendiz, L., Pallarrs, J., Marsal, L.F., Cabrera, V., Estrada, M., 2019. Air Environment Degradation of a High-Performance Inverted PTB7-Th:PC 70 BM Solar Cell. IEEE J. Photovoltaics 9, 464–468. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2892108

Ledesma-Juárez, A., Rodríguez, M., Güizado-Rodríguez, M., Romero-Borja, D., Garcias-Morales, C., Maldonado, J.L., Barba, V., 2019. Synthesis by direct arylation reaction of photovoltaic D–π–A polymers based on fluorene-thiophene- fragment and fluorinated benzothiadiazole derivatives. J. Mater. Sci. Mater. Electron. 30, 13974–13983. https://doi.org/10.1007/s10854-019-01744-9

Lee, J.-H., You, Y.-J., Saeed, M.A., Kim, S.H., Choi, S.-H., Kim, S., Lee, S.Y., Park, J.-S., Shim, J.W., 2021. Undoped tin dioxide transparent electrodes for efficient and cost-effective indoor organic photovoltaics (SnO2 electrode for indoor organic photovoltaics). NPG Asia Mater. 13, 43. https://doi.org/10.1038/s41427-021-00310-2

Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Davis, S.J., Zheng, B., Wang, Y., Cui, D., Zhu, B., Dou, X., Ke, P., Sun, T., Guo, Rui, Zhong, H., Boucher, O., Bréon, F.-M., Lu, C., Guo, Runtao, Xue, J., Boucher, E., Tanaka, K., Chevallier, F., 2020. Carbon Monitor, a near-real-time daily dataset of global CO2 emission from fossil fuel and cement production. Sci. Data 7, 392. https://doi.org/10.1038/s41597-020-00708-7

Moser, M., Wadsworth, A., Gasparini, N., McCulloch, I., 2021. Challenges to the Success of Commercial Organic Photovoltaic Products. Adv. Energy Mater. 11, 1–12. https://doi.org/10.1002/aenm.202100056

Nicasio-Collazo, J., Maldonado, J.-L., Salinas-Cruz, J., Barreiro-Argüelles, D., Caballero-Quintana, I., Vázquez-Espinosa, C., Romero-Borja, D., 2019. Functionalized and reduced graphene oxide as hole transport layer and for use in ternary organic solar cell. Opt. Mater. (Amst). 98, 109434. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109434

Nolasco, J.C., Castro-Carranza, A., León, Y.A., Briones-Jurado, C., Gutowski, J., Parisi, J., von Hauff, E., 2019. Understanding the open circuit voltage in organic solar cells on the basis of a donor-acceptor abrupt (p-n++) heterojunction. Sol. Energy 184, 610–619. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.031

Nolasco, J.C., Ryan, J.W., Rodríguez, M., Castro-Carranza, A., Maldonado, J.L., Ramos-Ortiz, G., Barbosa-Garcia, O., Gutowski, J., Palomares, E., Parisi, J., 2018. Organoboron donor-π-acceptor chromophores for small-molecule organic solar cells. J. Mater. Sci. Mater.

Electron. 29, 16410–16415. https://doi.org/10.1007/s10854-018-9732-6

NREL, 2023. Best Research-Cell Efficiencies [WWW Document]. URL https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html (accessed 7.25.23).

Oviedo-Mendoza, M., Zapata-Torres, M., Meléndez-Lira, M., Mis-Fernández, R., Peña, J.L., Hernández-Rodríguez, E., 2021. Improving P3HT:PCBM absorber layers by blending TiO2/CdS nanocomposites for application in photovoltaic solar cells. J. Mater. Sci. Mater. Electron. 32, 102–112. https://doi.org/10.1007/s10854-020-04705-9

Ramírez-Como, M., Balderrama, V.S., Sacramento, A., Marsal, L.F., Lastra, G., Estrada, M., 2019. Fabrication and characterization of inverted organic PTB7:PC70BM solar cells using Hf-In-ZnO as electron transport layer. Sol. Energy 181, 386–395. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.015

Ramírez-Como, M., Sacramento, A., Sánchez, J.G., Estrada, M., Pallarès, J., Balderrama, V.S., Marsal, L.F., 2021. Small molecule organic solar cells toward improved stability and performance for Indoor Light Harvesting Application. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 230, 111265. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111265

Rivera-Taco, J., Castro-Beltrán, R., Maldonado, J.-L., Álvarez-Martínez, J., Barreiro-Argüelles, D., Gaspar, J.A., Gutiérrez-Juárez, G., 2021. The Role of Silver Nanoparticles in the Hole Transport Layer in Organic Solar Cells Based on PBDB-T:ITIC. J. Electron. Mater. 50, 4118–4127. https://doi.org/10.1007/s11664-021-08919-3

Rodríguez-Rea, J., Güizado-Rodríguez, M., Maldonado, J.-L., Ramos-Ortiz, G., Reveles, J.U., Silva, C., Barba, V., Saucedo-Salazar, E.M., Rodríguez Hernández, M.T., 2022. Development of diketopyrrolopyrrole-based donor-acceptor oligomers using direct arylation polymerization: Non-linear and ultrafast optical analysis, and their application in ternary organic solar cells. Opt. Mater. (Amst). 134, 113167. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113167

Romero-Borja, D., Maldonado, J.-L., Barbosa-García, O., Rodríguez, M., de León, A., Fernández, S., Pérez-Gutiérrez, E., 2018. Organic solar cells based on graphene derivatives and eutectic alloys vacuum-free deposited as top electrodes. Carbon N. Y. 134, 301–309. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.03.083

Uddin, A., Upama, M., Yi, H., Duan, L., 2019. Encapsulation of Organic and Perovskite Solar Cells: A Review. Coatings 9, 65. https://doi.org/10.3390/coatings9020065

Vázquez, A., Castro-Carranza, A., Rodríguez, M., Maldonado, J.L., Castro-Chacón, A., García-González, L., Hernández-Torres, J., Martínez-Castillo, J., Zamora-Peredo, L., Gutowski, J., Nolasco, J.C., 2022. Numerical study of efficient ternary planar hybrid solar cells using simple boron molecules as organic compounds. Opt. Mater. (Amst). 132, 112852. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112852

Wu, J., Gao, M., Chai, Y., Liu, P., Zhang, B.,

Liu, J., Ye, L., 2021. Towards a bright future: The versatile applications of organic solar cells. Mater. Reports Energy 1, 100062. https://doi.org/10.1016/j.matre.2021.100062