

## **TENDENCIAS EN INGENIERIA DE MATERIALES PARA LA FABRICACION DE CELULAS SOLARES FOTOVOLTÁICAS**

Oscar G. Cucaita<sup>1</sup>, Iván O. Cabeza<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomas, Bogotá D.C,  
Colombia.*

*Correo Electrónico: [oscarcucaita@usantotomas.edu.co](mailto:oscarcucaita@usantotomas.edu.co)*

<sup>2</sup> *Profesor Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomas, Bogotá  
D.C, Colombia.*

*Correo Electrónico: [lvancabeza@usantotomas.edu.co](mailto:lvancabeza@usantotomas.edu.co)*

### **1. RESUMEN**

La energía solar fotovoltaica ha adquirido un importante papel a nivel global por el uso de fuentes renovables y disminución de impactos ambientales, además de ser un participante influyente en la satisfacción de la demanda energética actual. No obstante, cuenta con limitaciones como la dependencia de la disponibilidad de radiación y uso de silicio como materia prima de las células solares. Este último presenta ciertas desventajas, como complejidad en el proceso de fabricación, costos altos y menores eficiencias además de generar contaminación. En el presente artículo, se realiza una revisión de los diferentes materiales alternativos y su perspectiva de funcionamiento e implementación, exponiendo las células solares, que emplean diversos materiales dentro de los cuales se destacan las células solares de Teluro de Cadmio (CdTe) que presentan características de bajo costo y considerables eficiencias. Por otro lado, las células de CIGS (Cobre, Indio, Galio, Selenio/Azufre) presentan como característica principal el alto coeficiente

de adsorción; no obstante su gran reto a superar, es llevar a cabo su implementación más allá de un laboratorio, es decir a un nivel industrial y por último las células solares orgánicas con un amplio campo investigativo y gran proyección dentro del ámbito energético, además de la novedad de emplear como materiales principales polímeros con características de conductividad, y diferente estructuración y morfología a través de superposición de capas o heteruniones para el logro de altas eficiencias y bajos costos.

## 2. PALABRAS CLAVE

Energía solar, Materiales fotovoltaicos, Células orgánicas, Células CIGS y Células CdTe

## CONTENIDO

<b>3. INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>4. NUEVOS MATERIALES PARA LA FABRICACION DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS</b> .....	4
<b>4.1 Células Solares de Teluro de Cadmio de Película Delgada (CdTe)</b> .....	5
<b>4.2 Células CIGS (Cobre, indio, Galio, Selenio/Azufre)</b> .....	7
<b>4.3 Células Orgánicas Fotovoltaicas (OPV)</b> .....	9
<b>4.3.1 Células orgánicas fotovoltaicas de heterounión</b> .....	12
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	16
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	18

### 3. INTRODUCCIÓN

La energía solar representa una fuente principal de energía renovable que tiene un impacto directo sobre los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos. A pesar de que esta radiación se aprovecha en una pequeña proporción, la cantidad de radiación solar emitida resulta suficiente para la subsistencia de las condiciones físicas e interacciones que ocurren allí [1]. No obstante en la actualidad, se tiene una problemática creciente en el tema energético por el uso de combustibles fósiles que tienen como consecuencia directa, el incremento de los gases de efecto invernadero, el agotamiento de recursos y contaminación atmosférica como causantes principales del calentamiento global [1], [2] y [3]. Con el propósito de lograr un control de estas problemáticas conjuntas, se han llevado a cabo diversas investigaciones encaminadas hacia una búsqueda de nuevas alternativas energéticas, que consideren y empleen el flujo constante de esta energía solar percibida en la tierra. Para realizar un aprovechamiento de esta, existen dos tecnologías principalmente; la térmica siendo una de ellas, donde se transforma la energía procedente del sol en energía calorífica, y la fotovoltaica siendo la segunda vía, donde se convierte directamente la energía solar en energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico [1], [4], [5], [6] y [7]. Esta última consiste en un conjunto de elementos, denominados células solares o fotovoltaicas, que son dispuestos en paneles, y logran la transformación de energía solar en energía eléctrica. La luz solar incidente transporta energía en forma de flujo de fotones, los cuales repercuten en determinados tipos de materiales que bajo ciertas condiciones generan una corriente eléctrica, a esto se denomina el efecto fotovoltaico [1], [4] y [5].

A pesar de la alternativa energética que se presenta con la fabricación de paneles solares fotovoltaicos (reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, fuente de energía inagotable, disminución de la dependencia energética por provenir de recursos autóctonos, sistemas de fácil instalación, instalaciones modulables entre otras) [8], estos cuentan con una serie de problemáticas que limitan su uso y desarrollo [1] y

[5]. Dentro de estas se identifican los materiales que componen las células solares, las cuales son el fundamento principal de los paneles. Estas células han sido fabricadas con base de un material específico, el cual es el silicio y por requerimientos de conductividad son dopados con otros elementos como el fósforo y el boro. Sin embargo este material conlleva a una serie de limitaciones tales como el costo de inversión, eficiencia y que son ambientalmente poco sostenibles en cuanto a su proceso de fabricación específicamente [1] y [5].

No obstante, actualmente se desarrollan investigaciones y estrategias encaminadas hacia la solución y búsqueda de alternativas que permitan superar los limitantes que presenta el uso convencional del Silicio en los paneles solares fotovoltaicos [9]. Por medio del presente artículo de revisión, se describen los materiales de células solares de Teluro de Cadmio (CdTe), células CIGS (Cobre, Indio, Galio y Selenio y/o Azufre), células orgánicas con heterouniones que están siendo tendencia, así mismo su funcionamiento, ventajas y desventajas, e impacto ambiental de estos tipos de células solares fotovoltaicas.

#### **4. NUEVOS MATERIALES PARA LA FABRICACION DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS**

Como se mencionaba anteriormente las células solares convencionales a base de silicio, presenta desventajas donde una de las más significativas se justifica en la alteración ambiental que ocasiona la fabricación de paneles solares que usan silicio como materia prima. Según un análisis de Ciclo de Vida desarrollado para estos paneles, autores como Enguita Oscar et .al 2012 [10], establece que dentro de este análisis, la fase de fabricación del panel solar es la de mayor impacto ambiental, debido principalmente hacia la obtención del silicio multicristalino el cual es un proceso muy intensivo a nivel energético y con generación de corrientes residuales. Además los procesos que involucran el inversor, el vidrio solar y la metalización de la celda generan de igual forma un impacto considerable, sumándole el proceso de encapsulado y enmarcado [10] y [11]. Esta clara problemática que involucra las células solares de Silicio pueden ser

afrontadas y superadas por medio de nuevas alternativas y desarrollos en el uso de materiales y procesos de fabricación de las células solares.

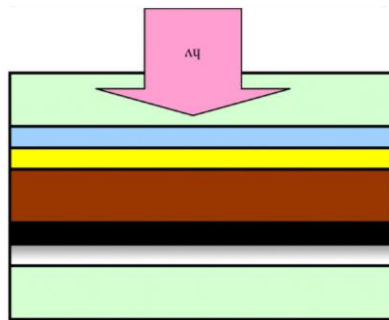
En ese orden de ideas, la tendencia actual encaminada hacia la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales para la fabricación de células solares, conjugan características generales tales como, la absorción de la luz solar, bajos costos de inversión, mayores rendimientos y desarrollos en los procesos de fabricación. Una de las tendencias más dinámicas se ve reflejada en la fabricación de células solares de película delgada en especial de materiales policristalinos de adsorción como el telurio de Cadmio (CdTe) y Cobre Indio Galio diseleniuro (CIGS) y las denominadas células solares orgánicas OPV [5] y [12]. Este tipo de materiales son descritos a continuación.

#### **4.1 Células Solares de Teluro de Cadmio de Película Delgada (CdTe)**

Inicialmente es importante destacar que el Teluro de Cadmio (CdTe), es catalogado dentro del ámbito científico, como un material prometedor para la obtención de altas eficiencias y bajo costo mediante su aplicación en las células solares de películas delgadas [13]. Considerando las diferentes técnicas de fabricación de las películas delgadas policristalinas de CdTe, se reportan eficiencias alrededor del 15,8% y el 22,1% según los diferentes estudios [13], [14], [15], [16], [17] y [18].

El diseño de la presente célula, es basado en lo que se denomina una configuración de sustrato, dentro del cual son depositados materiales activos, que a su vez actúan como una ventana transparente que logra permitir la radiación solar la cual incide directamente dentro del dispositivo. Este sustrato es una hoja de vidrio, que está cubierta con una película delgada de óxido de estaño dopado con flúor (FTO) generalmente, el cual actúa como un óxido conductor transparente. La fabricación consiste en una deposición de capas de Sulfuro de Cadmio y Teluro de Cadmio (CdS /CdTe), las cuales llevan a cabo la conducción del contacto posterior. En ello se consideran procesos de sublimación de espacio

cerrado (CSS), además de métodos químicos y electroquímicos [5] y [19]. No obstante, cabe resaltar que los óxidos conductores transparentes (TCO) desempeñan un papel fundamental dentro de la eficiencia de las células solares de película delgada, ya que ofrece el denominado “contacto frontal” el cual permite que la radiación solar que se involucra en la célula subyacente, llevar la electricidad generada hacia el circuito externo, no obstante este contacto frontal debe ser acoplado con muy baja resistencia eléctrica [20]. Esta célula puede proporcionar una respuesta espectral superior para climas húmedos y en climas cálidos con un coeficiente de temperatura superior [17]. Por ejemplo en temperaturas mayores a 25°C, empresas como First Solar que han venido trabajando y comercializando los módulos conformados por células de este material (CdTe), logran una producción mayor de energía, presentando medidas por módulo de 60cm x 120cm [17]. De esta manera se ofrece hasta un 8% más de energía por parte de este tipo de módulos a comparación del uso convencional de módulos de silicio cristalino [13] y [17]. Las estructuras esquemáticas de las células de CdTe se ilustran en la Figura 1.



*Figura 1: Sección transversal de la estructura típica de una célula solar tipo CdTe. La luz incide en la célula a través del sustrato de vidrio conductor. Vista de arriba hacia abajo: Vidrio, FTO, CdS, CdTe, Contacto Óhmico, Metalización y Vidrio [5]*

Más allá de las eficiencias logradas, cabe resaltar que es necesario contemplar el análisis de ciclo de vida de los módulos solares fabricados a base de los diferentes compuestos, haciendo énfasis en el Teluro de Cadmio, el cual se afirma ser perjudicial para la salud humana y es catalogado como peligroso [21], aunque

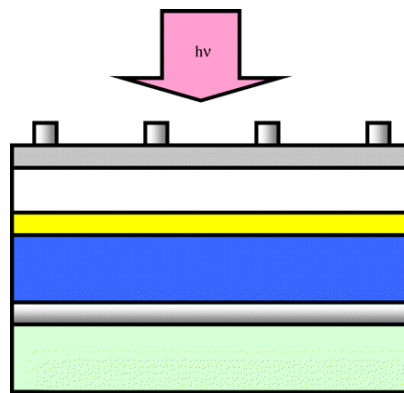
no sea tan adverso como el Cadmio puro, aun así se presentan programas de disposición, reciclaje y de seguridad, que permitan el control de este tipo de sustancias. Dado este caso se afirma que este tipo de células solares y módulos permiten lograr un reciclaje de un 90% del total de los elementos empleados tales como el vidrio y los materiales semiconductores encapsulados, previos a ser llevados a su disposición final [17], [18] y [22]. Además a nivel industrial y comercial la empresa estadounidense First Solar es la única que por ahora que fabrica, comercializa módulos solares de Teluro de Cadmio a nivel industrial, considerando un precio de fabricación mucho menor a comparación de las células de Silicio, con la ventaja que requiere menos material para la generación de una cantidad comparable de energía eléctrica frente a las de silicio consecuente con un proceso de fabricación más sencillo [23].

#### **4.2 Células CIGS (Cobre, indio, Galio, Selenio/Azufre)**

Esta células se encuentran dentro de las tecnologías fotovoltaicas, contemplando elementos como Cobre, Indio, Galio y Selenio y/o Azufre (CIGS), los cuales se afirman como los mejores materiales de absorción con eficiencias de tecnología de película delgada con valores de 22,3% a nivel de laboratorio y 16% en modulo comercial grande, de igual forma este material atrae la investigación científica por su bajo costo principalmente [24]. Además, de su alto coeficiente de absorción, se afirma que solo 2 micras de espesor de película CIGS pueden adsorber la mayor parte del espectro solar incidente. Así mismo pequeñas cantidades de material son empleados para cubrir las células CIGS, mediante un depósito en un sustrato el cual puede ser rígido o flexible [25].

Actualmente, las células de tipo CIGS son fabricadas por procesos de pulverización catódica o evaporación conjunta dentro de la cual se lleva a cabo una reacción en atmosfera en Selenio. Además una de las tres etapas que conjugan co-evaporacion de los elementos, Cu, In, Ga y Se, permite hacer una capa de CIGS cuya característica principal es lograr la formación de una capa absorbadora [5], [26] y [27]. Este tipo de células se componen de un electrodo

trasero de molibdeno (Mo), una capa absorbidora de luz, un semiconductor  $p$  que consiste en un compuesto de calcopirita ( $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ ), un semiconductor  $n$  de sulfuro de Cadmio ( $\text{CdS}$ ) u oxi-sulfuro de zinc ( $\text{Zn}(\text{O,S})$ ) un contacto frontal formado por una capa delgada de alta resistividad de óxido de Zinc ( $\text{ZnO}$ ) y una capa transparente conductora de óxido de Zinc dopado con aluminio ( $\text{ZnO:Al}$ ) [5]. El hecho de que su fabricación sea realizada por procesos de pulverización catódica, permite que sea aplicada no solo para sustratos rígidos (como vidrio) sino que también sobre sustratos flexibles (como metales o polímeros) lo que conlleva a la obtención de altos rendimientos además de lograr una disminución considerable en costos, sumándole una amplia integración estructural para su adaptación hacia todo tipo de superficies [5] y [28]. La estructura de la célula se ilustra a continuación en la Figura 2.



*Figura 2 Sección transversal de la estructura de una célula solar de CIGS. La luz entra en la célula a través de la parte superior de contacto transparente ZnO. De abajo hacia arriba: vidrio, molibdeno, CIGS, CdS, i-ZnO, Al:ZnO [5].*

Así mismo se desarrollan investigaciones actuales de una nueva célula solar que conjuga los elementos de CIGS y una doble unión de CGS (Cobre-Galio-Selenio), B. Farhadi y M. Naseri et. al 2016 [29]. En este estudio se obtiene un rendimiento de una célula solar catalogada CGS/CIGS, el cual se estimula por medio del uso del software Silvaco ATLAS, para la mejora de la estructura por medio de la optimización de las impurezas CGS, y ajuste de corrientes que consigue una eficiencia máxima de conversión de energía del 43,05%, el cual permite proponer un diseño que ilustra un mejor rendimiento de conversión de energía [29].

No obstante, las células solares de CIGS, deben afrontar y superar una serie de retos tecnológicos con los cuales pueda hacer más accesible su implementación en el entorno de la energía solar fotovoltaica, dentro de los cuales se destacan inicialmente, el lograr un aumento en las eficiencias de las células y módulos hasta su potencial máximo, seguido de lograr en lo posible, un menor consumo de materiales y energía en la fabricación de los mismos, obtener un desarrollo de integración monolítica, (la cual es un tipo de circuito integrado CI, con una gran cantidad de dispositivos microelectrónicos interactuados, diodos y transistores) para los módulos solares y uno de los más influyentes es lograr una transferencia tecnológica de escala de laboratorio hacia una a fabricación industrial [28] y [30]. Además, a nivel ambiental esta célula conjuga elementos de Cadmio e Indio, los cuales son muy limitados o presentes en pequeñas fracciones en la corteza terrestre, y considerando la creciente demanda energética no se tendría una proyección prometedora a nivel de abastecimiento en este tipo de células, sin embargo las continuas investigaciones se encaminan a lograr el reemplazo de este tipo de elementos [31] y [29].

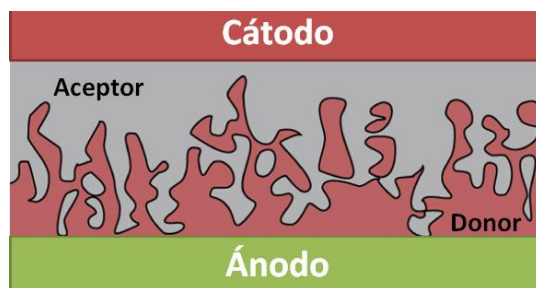
### **4.3 Células Orgánicas Fotovoltaicas (OPV)**

Dentro de este tipo de células solares se visualiza una amplia tendencia y proyección cuyo fundamento primordial es el uso de polímeros que pueden ser empleados como semiconductores. Sus inicios parten de las investigaciones de científicos como el químico japonés Hideki Shirakawa [12], el físico Estadounidense Alan Heeger [12] y el químico estadounidense Alan MacDiarmid [12], donde realizaron descubrimientos sobre las propiedades conductoras de cierto tipo de polímeros que logró incidir fuertemente en la tecnología de dispositivos electrónicos y su gran desarrollo en el ámbito de la energía solar fotovoltaica [12]. En ese orden, un polímero semiconductor es una macromolécula que presenta unidades repetitivas llamadas monómeros, que a diferencia de los polímeros tradicionales, estos son altamente conjugados presentando orbitales  $\pi$ , que permiten tener cadenas de alta densidad electrónica que otorgan propiedades

electrónicas únicas, comparables a semiconductores inorgánicos [12] y [32]. Dentro de las células orgánicas fotovoltaicas, los materiales semiconductores orgánicos abarcan células de dos clases principales: pequeñas moléculas y compuestos poliméricos, las cuales tienen un modo diferente de preparación, purificación, y fabricación del dispositivo. Así mismo, las pequeñas moléculas semiconductoras son procesadas a través de deposición de fase de vapor a alto vacío, mientras que los polímeros conductores son típicamente procesados a partir de disolventes orgánicos, lo cual incide en la morfología a nano escala de películas delgadas que repercuten a gran medida sobre el rendimiento de la célula solar [33] y [34].

Además, las células solares basadas en polímeros han logrado contemplar un amplio interés debido a la combinación de propiedades físicas y químicas variadas, tales como un peso ligero, sencilla procesabilidad y una adecuada flexibilidad mecánica, además una fabricación de alto rendimiento logra una significativa reducción de costos y mejor desarrollo de las instalaciones fotovoltaicas [33], [35] y [36].

En su orden, el modelo inicial de una célula orgánica contemplaba una unión simple o una capa única, de un polímero conjugado entre dos electrodos metálicos cuya función principal es la generación de un campo eléctrico, sin embargo la baja constante dieléctrica de los polímeros conjugados no permitía una eficiencia de conversión viable [3]. La estructura de una célula orgánica fotovoltaica se muestra en la figura 3.



*Figura 3 Sección transversal de una célula orgánica, los electrones fotoinducidos y portadores de carga son generados en una interface entre el donador y el aceptor y a su vez se transportan por medio de las fases aceptoras y donantes al cátodo y el ánodo respectivamente [5].*

Este tipo de células permiten evidenciar una proyección y un fuerte énfasis dentro de la energía solar fotovoltaica, y amplias investigaciones dan a conocer las diferentes alternativas que inciden en el desarrollo de este tipo de células. No obstante, a pesar de su fácil procesamiento y bajos costos de fabricación, y la abundancia de materiales orgánicos así como su fácil manejo. Las células solares orgánicas, presentan eficiencias por debajo del límite teórico con un valor porcentual del 23%, Anderson Trent y Köse Muhammet et .al 2016 [37], y además una desventaja que influye a nivel general de las células orgánicas fotovoltaicas, es la susceptibilidad que estas presentan frente al oxígeno y agua [38]. Aun así según investigaciones, la eficiencia de fotoconversión de células solares orgánicas puede verse mejorada considerando factores como la arquitectura de dispositivos, optimización de estructuras moleculares de polímeros de tipo  $p$ , optimización de parámetros y condiciones pertenecientes a las capas de deposición en la estructura del dispositivo a lo que logra un incremento del 10% en la eficiencia [39], [40], [41], [42], [43], [44] y [45].

### **4.3.1 Células orgánicas fotovoltaicas de heterounión**

Este tipo de células, toman como base configuraciones similares a de las células solares a base de compuestos inorgánicos, en ello el concepto de heterounión o heterojuntura, es aplicado en estas células por su relación entre dos materiales con diferentes afinidades electrónicas y potenciales de ionización [12]. Los dispositivos fotovoltaicos orgánicos, basados en los materiales donantes de electrones y aceptores son una fuerte vía para lograr la conversión de fotones a corriente, como una alternativa mayoritariamente económica en comparación de las células solares de silicio tradicionales [46].

Dentro de estas células, el primer paso para generar fotocorriente es lograr la formación de excitones por medio de la absorción de fotones en la mayor parte de los dispositivos [43] y [46]. Dado ello, el campo eléctrico para separar los portadores en la interfaz, es creado de acuerdo a los diferentes orbitales moleculares ocupados, el más alto (HOMO) o potencial de ionización (PI) y orbitales moleculares desocupados más bajos (LUMO) o afinidad electrónica (EA) de los donantes y receptores [46] y [47]. En la figura 5, se muestra un diagrama que comprende las bandas de energía del material donador y aceptor, dentro de la cual se observa que en las células solares orgánicas con heterounion, la adsorción de fotones (a) por parte de la capa activa, donde se genera una transición electrónica, entre los estados de HOMO y LUMO del material donador, se genera un sistema de pares de electrón-hueco conocidos como excitones (b), y estos a su vez se localizan en la estructura del compuesto. Los excitones generados se difunden hasta la interface con el material aceptor dentro del cual se disocian generando portadores de cargas libres (c), cuyo movimiento es independiente a través de cada material, hasta finalizar en los contactos eléctricos (d) [12]. Una de las heteruniones de gran campo investigativo son las denominadas Bulk-Heterjunction o denominadas además células solares de heterounion de polímero a granel (BHJ) en español, que prometen una perspectiva para su desarrollo debido a ventajas como costos bajos, flexibilidad de la célula, peso ligero y con capacidad de procesamiento simple [48]. En ello, se han observado eficiencias de

conversión de potencia o eficiencia de fotoconversión para este tipo de células que ha alcanzado un 11,7% [48], [49] y [50].

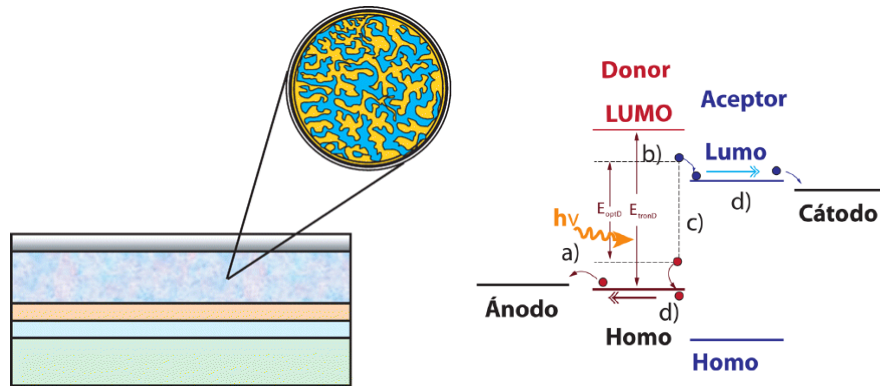


Figura 4 Izquierda, de abajo hacia arriba: Vidrio, ITO (Estructuras de óxido de indio y estaño), PEDOT: (Poli(3,4-etilendioxitiofeno) poli(estirenosulfonato)), P3HT (Tiofeno poli-3-hexil) y Aluminio [5]. Derecha proceso interno de la capa adsorbente de una célula solar orgánica [16]

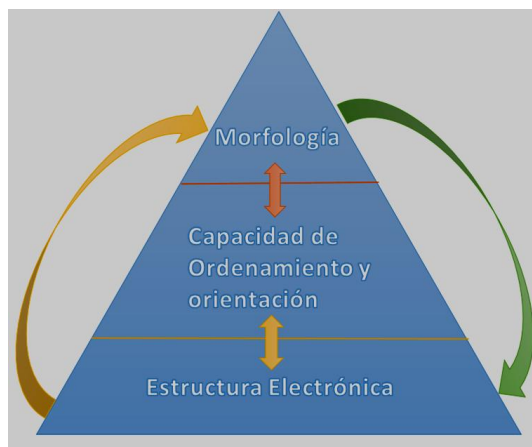
Sin embargo, cuenta con principales factores limitantes como la estrecha absorción de luz, y la restricción en la generación de carga, aun así se afirma que múltiples mezclas ternarias de materiales fotoactivos para la formación de células solares, es considerado como una estrategia sencilla para la resolución de estos limitantes [51] y [52].

Este tipo de heterojunturas (BHJ) consiste en una mezcla de poli(3-hexiltiofeno) P<sub>3</sub>HT como donante de electrones y 6,6-fenil C<sub>61</sub> ester metílico del ácido butírico (PCBM) como aceptor de electrones [53] y [54]. Además una correcta organización y estructuración de materiales donante y aceptor permite limitar la recombinación del denominado electrón-hueco mediante la generación de una separación de fases dentro del cual, el tamaño característico es equivalente a la longitud de difusión del excitón, en ese orden de ideas, resulta importante el control de la morfología de la mezcla P<sub>3</sub>HT/ PCBM [53].

No obstante, se ha enfatizado en diversos trabajos en el uso de copolímeros en bloque (formados por macromoléculas constituidas por bloques poliméricos en una

secuencia lineal) [55], como donador/aceptor por su compatibilidad en la mezcla P<sub>3</sub>HT/ PCBM, empleados como estrategia para el control de la morfología y con ello aumentar la estabilidad de los dispositivos, además se ha demostrado, que la adición de donante-aceptor de copolímero en bloques de P<sub>3</sub>HT-b (bisimida acrilato de perileno)-poli es empleado como un compatibilizador [53], [56] y [57].

En cuestiones de rendimiento, se evidencian diferentes correlaciones de factores que influyen directamente, así como su interrelación entre sí, en la Figura 7 se muestran los aspectos fundamentales en el tema del rendimiento. Un claro ejemplo de esta relación, se evidencia en la constitución química de cada uno de los componentes, puesto que afirma su función, y su forma de interacción con los demás materiales, su capacidad de ordenamiento u orientación en la estructura cristalina del mismo, la morfología de la capa activa y la estructura electrónica, que condicionan de manera directa la eficiencia y rendimiento del dispositivo [58] y [59].



*Figura 5. Pirámide de correlación que involucra el rendimiento del dispositivo en células BHJ [59]*

Dado el caso, investigaciones actuales han tenido fuerte énfasis dentro del factor morfológico que contempla a su vez, las mezclas de donante-aceptor o copolímeros en bloques donde se tiene como objetivo principal equilibrar el transporte de carga y lograr una mayor adsorción de la luz, donde se han caracterizado cuatro tipos de morfologías que se han empleado en la capa activa

de las células solares orgánicas, las cuales siguen siendo objeto de estudio [58], [59], [60], [61], [62] y [63].

Actualmente se llevan a cabo investigaciones frente al mejoramiento y desarrollo de este tipo de células, se contemplan dispositivos fotovoltaicos orgánicos ternarios que se prepararon de acuerdo a pequeñas cantidades de metaloporfina-tertiofen en las mezclas de fullereno, la cual repercute de manera directa en la eficiencia de conversión de energía del dispositivo, con un valor inicial del 5,1% que a su vez condujo un aumento del 16%, resultados que fueron comparados con otra mezcla binaria. Además entre las cantidades aplicadas de metaloporfirinas, se encuentra, que el Cu (II) porfirina aplicado en la mezcla desarrolla una mejora significativa en la eficiencia [64].

En términos generales las células orgánicas fotovoltaicas, presentan ciertas características y ventajas abarcando el componente ambiental, pues se afirman ser células con menor impacto ambiental, considerando procesos de fabricación, materiales empleados y análisis de ciclo de vida. De forma más específica, se evidencia las ventajas en términos ambientales en cuanto al emplear menor gasto energético para su fabricación, además de los materiales resultantes después de cumplir su ciclo de uso, pueden ser removidos con solventes orgánicos o agua en algunos casos, con lo cual ofrece una ventaja y mejor viabilidad para llevar a cabo el tratamiento y la disposición final de los residuos generados [65].

## 5. CONCLUSIONES

Múltiples investigaciones se han llevado a cabo, para promover el desarrollo de la energía solar fotovoltaica, y hacer frente a las diferentes desventajas que presenta el uso tradicional y comercial del silicio dentro de las células solares, en donde estas investigaciones están encaminadas hacia el desarrollo y mejoramiento de la adsorción de la luz solar, bajos costos de inversión, mayores rendimientos y desarrollos en los procesos de fabricación que permitan una implementación de nuevos tipos de células solares conllevando hacia un mejoramiento de los paneles solares fotovoltaicos.

Las células solares de Teluro de Cadmio, permiten caracterizar múltiples ventajas según investigaciones, inicialmente por el uso de películas delgadas, su mejoramiento en la respuesta espectral en climas cálidos húmedos y cálidos, dentro de los cuales las mismas investigaciones registran un valor máximo de eficiencia de 22.1%, a lo que se le suma la capacidad de lograr un porcentaje del 90% frente a su reutilización de materiales. No obstante es necesario continuar con las investigaciones dentro de este tipo de células, puesto que una desventaja considerable, se evidencia en el uso del Cadmio dentro de sus células y módulos.

Dentro de las células CIGS (Cobre, Indio, Galio y Selenio y/o Azufre), se contemplan desarrollos en su proceso, donde por medio de la pulverización catódica beneficia directamente la célula, que ya permite el uso de sustratos tanto rígidos (vidrio) y flexibles (como polímeros). Sin embargo, este tipo de células abarcan un mayor consumo de materiales y energía para su fabricación, por ende uno de los principales retos a superar es lograr una disminución energética de materiales en su fabricación para ser implementada a un nivel industrial. Las investigaciones en este tipo de células afirman un rendimiento alcanzado de 22%, no obstante continuas investigaciones relacionan compuestos como (Cobre-Galio-Selenio) en uniones CGS/CIGS, donde se han registrado eficiencias del 43.05% con alta proyección.

Por otro lado las células solares orgánicas, emplean polímeros con características conductivas, además de su fácil procesabilidad y flexibilidad, lo que repercute directamente en altos rendimientos y menores costos. Las investigaciones consultadas, demuestran un amplio campo de estudio para este tipo de células. En ese orden, estas investigaciones han llevado a cabo conceptos como heterojuntura o heterounión de compuestos orgánicos, dentro de las cuales contemplan afinidades electrónicas y estructuras moleculares de los compuestos y su consecuencia en la eficiencia de fotoconversión de las células solares orgánicas por heterouniones. Además el concepto de heterounion a granel o Bulk Heterojunction emplea copolímeros en bloque, control de la morfología, aumento de la estabilidad y estructura electrónica que conlleven a una mejora de este tipo de células orgánicas, para lograr un aumento importante en las eficiencias.

Las células de silicio, presentan limitantes a nivel ambiental ocasionados por sus complejos procesos de fabricación principalmente y los impactos que allí se derivan, además las bajas eficiencias y los altos costos son otros factores que inciden de manera negativa en este tipo de material. Sin embargo la nueva tendencia de materiales, da solución a mayores eficiencias y bajos costos de fabricación y operación principalmente. No obstante en el tema ambiental las células orgánicas permiten una fácil disposición y degradación por el uso de compuestos orgánicos, lo con lo cual es un punto a favor frente a las células CdTe y las células CIGS.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. E. Marín, “La Energía Solar Fotovoltaica En,” *J. Artic.*, pp. 13–14, 2004.
- [2] A. L. N. M. I. Millán; and P. A. R. Aumente, “Investigación e impacto ambiental de los edificios. La Rnergía,” *Inf. la Construcción*, vol. 57, no. Figura 1, pp. 47–61, 2005.
- [3] F. Ballenilla, “La sostenibilidad desde la perspectiva del agotamiento de los combustibles fósiles, un problema socio-ambiental relevante,” *Investigación en la Escuela*, vol. 55. pp. 73–87, 2005.
- [4] L. Bird *et al.*, “Wind and solar energy curtailment: A review of international experience,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 577–586, 2016.
- [5] L. M. Peter, “Towards sustainable photovoltaics: the search for new materials,” *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 369, no. 1942, pp. 1840–1856, 2011.
- [6] T. Energy, “Energía Solar Solar Solar Energy,” *J. Artic.*, vol. 83, no. Energía, pp. 561–566, 2008.
- [7] E. Lorenzo, “RETRATOS DE LA CONEXIÓN FOTOVOLTAICA A LA RED (IV) Seguidores y huertas solares,” *Era Sol.*, vol. 119, no. Iv, pp. 6–23, 2004.
- [8] Madridsolar, “Guía de la Energía Solar,” 26, vol. 7, p. 66, 2006.
- [9] C. E. L. Latunussa, F. Ardente, G. A. Blengini, and L. Mancini, “Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 156, pp. 101–111, 2016.
- [10] O. Enguita, “Análisis del ciclo de vida para el desarrollo de las Reglas de Categoría de Producto de sistemas solares fotovoltaicos para la edificación,” universitat politècnica de catalunya, 2012.
- [11] J. Del Río, L. Navas, and L. Sánchez, “Análisis del ciclo de vida de un panel solar fotovoltaico empleado para la alimentación eléctrica de instalaciones de riego, comparando las metodologías ECO-Indicador 99 y EPS-2000,” p. 5, 2000.
- [12] W. A. Chamorro Coral and S. U. Riveros, “Celdas solares orgánicas, una perspectiva hacia el futuro.”
- [13] B. W. Han, S. C. Park, J. H. Ahn, and B. T. Ahn, “Photovoltaic properties of close-space sublimated CdTe solar cells,” *Sol. Energy*, vol. 64, no. 1–3, pp. 49–54, 1998.
- [14] T. L. Chu, S. S. Chu, C. Ferekides, C. Q. Wu, J. Britt, and C. Wang, “13.4%

- efficient thin-film CdS/CdTe solar cells,” *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 12, 1991.
- [15] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, “Solar cell efficiency tables (version 41),” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 21, no. 1, 2013.
- [16] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, “Solar cell efficiency tables (version 40),” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, no. 5, 2012.
- [17] President’s Advisory Council on Financial Literacy, “Annual Report,” 2008.
- [18] E. Regalado-Pérez, M. G. Reyes-Banda, and X. Mathew, “Influence of oxygen concentration in the CdCl<sub>2</sub> treatment process on the photovoltaic properties of CdTe/CdS solar cells,” *Thin Solid Films*, vol. 582, pp. 134–138, 2015.
- [19] A. K. Turner *et al.*, “Stable, high efficiency thin film solar cells produced by electrodeposition of cadmium telluride,” *Sol. Energy Mater.*, vol. 23, no. 2–4, pp. 388–393, 1991.
- [20] S. J. C. Irvine *et al.*, “The role of transparent conducting oxides in metal organic chemical vapour deposition of CdTe/CdS Photovoltaic solar cells,” *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 4, pp. 1167–1173, 2011.
- [21] S. Arroyo, B. Ortiz, L. Enrique, and C. Vicentina, “Cadmio: efectos sobre la salud. Respuesta celular y molecular,” *Acta Toxicológica Argentina*, vol. 21, pp. 33–49, 2013.
- [22] J. Sites and J. Pan, “Strategies to increase CdTe solar-cell voltage,” *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 15 SPEC. ISS., pp. 6099–6102, 2007.
- [23] R. Martin, “Células solares de telurio de cadmio logran un nuevo récord de eficiencia,” *MIT Technol. Rev.*, 2016.
- [24] J.-M. Delgado-Sanchez *et al.*, “Front contact optimization of industrial scale CIGS solar cells for low solar concentration using 2D physical modeling,” *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 90–95, 2017.
- [25] M. Saifullah *et al.*, “Effect of Cu content on the photovoltaic properties of wide bandgap CIGS thin-film solar cells prepared by single-stage process,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 16, no. 11, pp. 1517–1522, 2016.
- [26] Y. M. Shin, C. S. Lee, D. H. Shin, H. S. Kwon, B. G. Park, and B. T. Ahn, “Surface modification of CIGS film by annealing and its effect on the band structure and photovoltaic properties of CIGS solar cells,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 15, no. 1, pp. 18–24, 2015.
- [27] Y. M. Shin, D. H. Shin, J. H. Kim, and B. T. Ahn, “Effect of Na doping using Na<sub>2</sub>S on the structure and photovoltaic properties of CIGS solar cells,” *Curr.*

*Appl. Phys.*, vol. 11, no. 1, Supplement, pp. S59–S64, 2011.

- [28] J. Gutierrez Berasategui, E; Barriga, “Tecnología CIGS para nuevas células solares,” *Energías Renov.*, p. 4, 2012.
- [29] B. Farhadi and M. Naseri, “Structural and physical characteristics optimization of a dual junction CGS/CIGS solar cell: A numerical simulation,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 127, no. 21, pp. 10232–10237, 2016.
- [30] J. T. Horstmann and K. F. Goser, “Monolithic integration of a silicon micromotor in combination with the CMOS drive circuit on one chip,” *Microelectron. Eng.*, vol. 67–68, pp. 390–396, 2003.
- [31] N. Espinosa and F. C. Krebs, “Life cycle analysis of organic tandem solar cells: When are they warranted?,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 120, no. PART B, pp. 692–700, 2014.
- [32] F. Martinez *et al.*, “Classical or inverted photovoltaic cells: On the importance of the morphology of the organic layers on their power conversion efficiency,” *Dye. Pigment.*, vol. 132, pp. 185–193, 2016.
- [33] F. Meyer, “Fluorinated conjugated polymers in organic bulk heterojunction photovoltaic solar cells,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 47, pp. 70–91, 2015.
- [34] Y. Huang, E. J. Kramer, A. J. Heeger, and G. C. Bazan, “Bulk heterojunction solar cells: Morphology and performance relationships,” *Chem. Rev.*, vol. 114, no. 14, pp. 7006–7043, 2014.
- [35] Y. Guo *et al.*, “Polymer solar cells with high open-circuit voltage based on novel barbell-shaped bifullerene derivative as acceptor,” *Chinese J. Org. Chem.*, vol. 36, no. 1, pp. 172–178, 2016.
- [36] D. Gendron and M. Leclerc, “New conjugated polymers for plastic solar cells,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, no. 4, pp. 1225–1237, 2011.
- [37] T. E. Anderson and M. E. Köse, “Impact of solution casting temperature on power conversion efficiencies of bulk heterojunction organic solar cells,” *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 318, pp. 51–55, 2016.
- [38] G. Chidichimo and L. Filippelli, “Organic solar cells: Problems and perspectives,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2010, 2010.
- [39] T. E. Anderson and M. E. Köse, “Impact of solution casting temperature on power conversion efficiencies of bulk heterojunction organic solar cells,” *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 318, pp. 51–55, 2016.
- [40] T. Fukuda, K. Suzuki, N. Yoshimoto, and Y. Liao, “Controlled donor-accepter ratio for application of organic photovoltaic cells by alternative intermittent electrospray co-deposition,” *Org. Electron.*, vol. 33, pp. 32–39, 2016.

- [41] I. Etxebarria, J. Ajuria, and R. Pacios, "Solution-processable polymeric solar cells: A review on materials, strategies and cell architectures to overcome 10%," *Org. Electron. physics, Mater. Appl.*, vol. 19, pp. 34–60, 2015.
- [42] A. Pivrikas, H. Neugebauer, and N. S. Sariciftci, "Influence of processing additives to nano-morphology and efficiency of bulk-heterojunction solar cells: A comparative review," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 6, pp. 1226–1237, 2011.
- [43] P. Peumans, A. Yakimov, and S. R. Forrest, "Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 7, pp. 3693–3723, 2003.
- [44] S.-S. Sun, "Optimum energy levels and offsets for organic donor/acceptor binary photovoltaic materials and solar cells," *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 116, no. 3 SPEC.ISS., pp. 251–256, 2005.
- [45] S. Sun *et al.*, "Conjugated block copolymers for opto-electronic functions," *Synth. Met.*, vol. 137, no. 1–3, pp. 883–884, 2003.
- [46] B. Pradhan and A. J. Pal, "Organic heterojunction photovoltaic cells: Role of functional groups in electron acceptor materials," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 81, no. 4, pp. 469–476, 2004.
- [47] T. Stübinger and W. Brütting, "Exciton diffusion and optical interference in organic donor-acceptor photovoltaic cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 90, no. 7, pp. 3632–3641, 2001.
- [48] Q. An *et al.*, "Improved Efficiency of Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells by Doping Low Bandgap Small Molecule.," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 186, no. August 2016, pp. 161–164, 2014.
- [49] H. Zhao, Jingbo and Li, Yunke and Yang, Goufang and Jiang, Kui and Li, Haroan and Ade, Harald and Ma, Wei and Ya, "Efficient organic solar cells processed from hydrocarbon solvents," *Nat. Energy*, vol. 1, pp. 15–27, 2016.
- [50] A. Kovalenko *et al.*, "Towards improved efficiency of bulk-heterojunction solar cells using various spinel ferrite magnetic nanoparticles," *Org. Electron.*, vol. 39, pp. 118–126, 2016.
- [51] P. Fan, Y. Zheng, D. Zheng, and J. Yu, "Improved efficiency of bulk heterojunction polymer solar cells by doping with iridium complex," *Mater. Lett.*, vol. 186, pp. 161–164, 2017.
- [52] L. Lu, T. Xu, W. Chen, E. S. Landry, and L. Yu, "Ternary blend polymer solar cells with enhanced power conversion efficiency," *Nat. Photonics*, vol. 8, no. 9, pp. 716–722, 2014.
- [53] A. Mhamdi, W. Boukhili, M. Raissi, M. Mahdouani, L. Vignau, and R. Bourguiga, "Simulation and optimization of the performance of organic

- photovoltaic cells based on capped copolymers for bulk heterojunctions,” *Superlattices Microstruct.*, vol. 96, pp. 241–252, 2016.
- [54] C. J. Brabec, “Organic photovoltaics: Technology and market,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 83, no. 2–3, pp. 273–292, 2004.
- [55] R. C. Pasquali, D. A. Chiappetta, and C. Bregni, “Los Copolímeros en Bloques Anfifílicos y sus Aplicaciones Farmacéuticas,” vol. 24, no. 4, 2005.
- [56] N. Sary *et al.*, “A new supramolecular route for using rod-coil block copolymers in photovoltaic applications,” *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 763–768, 2010.
- [57] C. Yang, J. K. Lee, A. J. Heeger, and F. Wudl, “Well-defined donor-acceptor rod-coil diblock copolymers based on P3HT containing C60: The morphology and role as a surfactant in bulk-heterojunction solar cells,” *J. Mater. Chem.*, vol. 19, no. 30, pp. 5416–5423, 2009.
- [58] F. Liu, Y. Gu, X. Shen, S. Ferdous, H. W. Wang, and T. P. Russell, “Characterization of the morphology of solution-processed bulk heterojunction organic photovoltaics,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 38, no. 12, pp. 1990–2052, 2013.
- [59] F. Liu, Y. Gu, J. W. Jung, W. H. Jo, and T. P. Russell, “On the morphology of polymer-based photovoltaics,” *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 50, no. 15, pp. 1018–1044, 2012.
- [60] L.-M. Chen, Z. Hong, G. Li, and Y. Yang, “Recent progress in polymer solar cells: Manipulation of polymer: Fullerene morphology and the formation of efficient inverted polymer solar cells,” *Adv. Mater.*, vol. 21, no. 14–15, pp. 1434–1449, 2009.
- [61] K. M. Coakley and M. D. McGehee, “Conjugated polymer photovoltaic cells,” *Chem. Mater.*, vol. 16, no. 23, pp. 4533–4542, 2004.
- [62] M. A. Ruderer, E. Metwalli, W. Wang, G. Kaune, S. V Roth, and P. Müller-Buschbaum, “Thin films of photoactive polymer blends,” *ChemPhysChem*, vol. 10, no. 4, pp. 664–671, 2009.
- [63] H. Hoppe and N. S. Sariciftci, “Morphology of polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells,” *J. Mater. Chem.*, vol. 16, no. 1, pp. 45–61, 2006.
- [64] D. M. Stoltzfus *et al.*, “Improved efficiency of polymer-fullerene bulk heterojunction solar cells by the addition of Cu(II)-porphyrin-oligothiophene conjugates,” *Synth. Met.*, vol. 218, pp. 1–8, 2016.
- [65] A. L. Fagua and W. F. B. S., “Celdas Solares Orgánicas Organic Solar Cells Células solares orgánicas,” vol. II, pp. 71–81, 2015.

