

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO
COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE ENERGÍA

**Efecto en la respuesta fotovoltaica del semiconductor orgánico
PEDOT:PSS como reparador de los “pinholes” presentes en
celdas solares de CdTe**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

**LICENCIADA EN INGENIERÍA
EN SISTEMAS ENERGÉTICOS**

PRESENTA:

Brenda Patricia Reyes García

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo, UACM

CODIRECTOR

Dr. Rogelio Mendoza Pérez, UACM

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS ©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Integración del Jurado

Presidente: Dr. Jorge Sastré Hernández, IPN

Secretario: Dr. José Joaquín Lizardi Del Ángel, UACM

Vocal: Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera, UACM

1^{er}. Suplente: Dr. Rogelio Mendoza Pérez, UACM

2^{do}. Suplente: Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo, UACM

Lugar donde se realizó la carrera:

PLANTEL SAN LORENZO TEZONCO, UACM

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo

Dedicatoria

Para el amor de mi vida Marcos David Cobián Vásquez, por todo tu cariño, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de este camino.

Que este logro se sume a todos los que tendremos en nuestro futuro.

Agradecimientos

En primero lugar agradezco a Dios por darme vida, salud, sabiduría e inteligencia para culminar una meta más en mi vida, la cual no sólo dependió de mi esfuerzo y dedicación, ya que detrás de cada paso que di hacía esta meta estuvieron muchas personas que me animaron e inspiraron a seguir adelante a pesar de las dificultades y obstáculos que se presentaron.

Agradezco a mi familia, que en todo tiempo me apoyaron y confiaron en que podría lograr mis sueños. Sin duda alguna agradezco a mi mamá que estuvo cada día para mí, desde que despertaba para ir a la escuela hasta los días de desvelo para estudiar. De igual manera agradezco que mi papá me haya educado como una mujer fuerte y valiente, igual que a cada una de mis amadas hermanas (Andrea, Sandra y Mayté).

Agradezco a mi amada Universidad por darme la oportunidad de formarme profesionalmente en sus instalaciones y conocer a profesores que me inspiraron, como lo es el Dr. Alfredo del Oso que desde el día que entre a la escuela nunca dejó de retarme a ser mejor estudiante y siempre estuvo para resolver cualquier duda; de igual manera agradezco al Dr. Rogelio Mendoza por darme la oportunidad de formar parte del grupo de Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES) donde desarrolle mis habilidades científicas y desperté mi interés hacía la investigación.

Los apoyos económicos también fueron una parte importante, ya que me permitieron enfocarme en mi carrera. Agradezco a la UACM que me brindó un par de años la beca institucional, al igual que a los proyectos de investigación: “Electropolimerización Anódica de Compuestos Derivados del 3,4-dialcoxitifeno, Aplicada para la Elaboración de las Celdas Orgánicas Fotovoltaicas (OPVs)”, bajo apoyo financiero de SECITI-UACM PI2014-34, “Proyecto 189282 Fondo Mixto CONACyT-GDF: “Manufactura de módulos fotovoltaicos de CdS/CdTe en áreas de 100 cm² y con eficiencias de 8% por la técnica de sublimación y procesos preindustriales asociados” y “La transición sol-gel como un mecanismo para la formación de la precipitación en nubes calientes: Una evaluación a partir de simulaciones numéricas y evidencias observacionales” N° 284482.

Finalmente, agradezco a mis amigos, ya que, sin ellos los días en la Universidad no hubieran sido tan divertidos y gratos, además que cada uno de ellos ahora forman parte de mi vida. Ángeles gracias por ser mi mejor amiga, Blanca, Carmen, Samantha, Jesús, Edgar y Mauricio gracias por ser los mejores compañeros, amigos y colegas.

Índice

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 7 |
| INTRODUCCIÓN | 8 |
| Antecedentes..... | 8 |
| Problemática morfológica en el procesamiento de la película delgada de CdTe | 12 |
| Hipótesis | 13 |
| Objetivo general | 14 |
| Objetivos particulares..... | 14 |
| CAPÍTULO 1 – MARCO TEÓRICO | 14 |
| 1.1 Efecto Fotovoltaico | 14 |
| 1.2 Parámetros eléctricos de una celda solare fotovoltaica..... | 20 |
| 1.3 Celda solar inorgánica de película delgada | 23 |
| 1.3.1 Principales materiales utilizados en el procesamiento usual de celdas solares a base de película delgada de CdTe..... | 24 |
| Cloruro de Cadmio (CdCl₂) | 29 |
| 1.4 Celda solar fotovoltaica orgánica (OPV) | 30 |
| 1.4.1 OPV con una capa o unicapa | 32 |
| 1.4.2 OPV de bicapa..... | 33 |
| 1.4.3 Heterounión en el bulto o BHJ (Bulk heterjunction) | 33 |
| 1.5 Película extractora de portadores de carga PEDOT:PSS | 34 |
| 1.5.1 Polímeros orgánicos conductores..... | 34 |
| 1.5.2 Estructura química de los polímeros PEDOT y PSS | 36 |
| 1.5.3 –Propiedades generales del PEDOT:PSS..... | 38 |
| CAPÍTULO 2 - METODOLOGÍA..... | 39 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1 Fabricación de celdas solares híbridas..... | 39 |
| 2.1.1 Lavado de vidrio TEC-15 | 39 |
| 2.1.2 Caracterización de películas de PEDOT:PSS sobre vidrio TEC-15..... | 40 |
| 2.1.2.1 Espesor y tratamiento térmico..... | 41 |
| 2.1.2.2 Transmitancia y Absorbancia del PEDOT:PSS | 42 |
| 2.1.3 Depósito de ZnO y CdS por Sputtering-RF..... | 44 |
| 2.1.4 Depósito de CdTe por CSS | 47 |
| 2.1.5 Depósito de CdCl ₂ por CSVT..... | 52 |
| 3.2.5 Contactos posteriores de Cu-Mo por Sputtering-DC..... | 56 |
| 2.2 Evaluación del rendimiento fotovoltaico de las celdas híbridas fabricadas | 57 |
| 2.2.1 Curva I vs V | 57 |
| 2.2.2 Eficiencia cuántica (QE)..... | 59 |
| CAPÍTULO 3 – ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 61 |
| CONCLUSIONES | 68 |
| PERSPECTIVAS..... | 69 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 70 |
| ÍNDICE DE GRÁFICAS Y TABLAS..... | 72 |
| REFERENCIAS..... | 74 |

Resumen

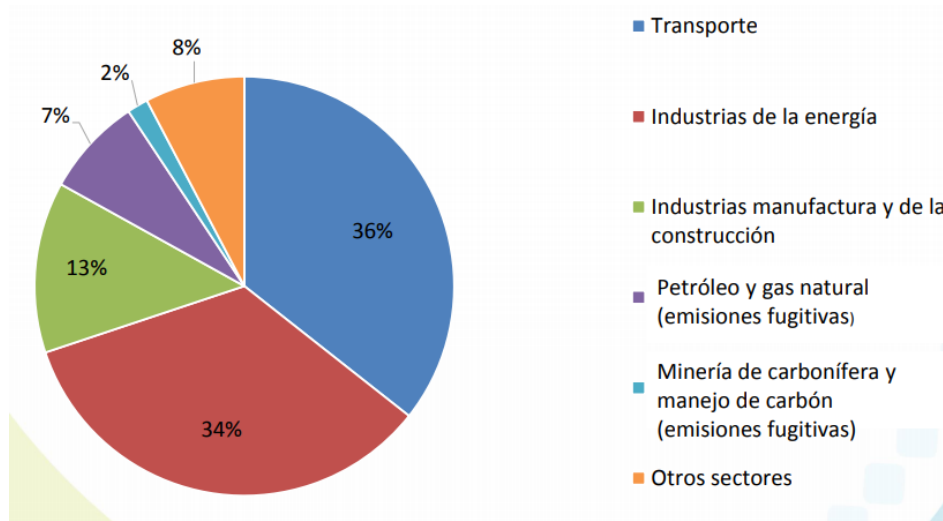
La Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), como institución pública e incluyente, tiene la misión de formar hombres y mujeres críticos, con pensamiento científico y humanista para beneficio de la sociedad; es por esto que, de manera científica y crítica, nos debemos involucrar en el proceso de aprendizaje, elaboración y experimentación de alguna de las diferentes ramas del conocimiento humano. En nuestro caso, el área que nos concierne es la de celdas solares fotovoltaicas de Telurio de Cadmio (CdTe); con el propósito de mejorar el proceso de elaboración de este tipo de celdas solares, como una forma de contribuir en fomentar una sociedad más equitativa e incluyente, permitiendo de esta manera, que una mayor población de nuestro país, pueda acceder a este tipo de energía sustentable.

El presente trabajo se enfocará en atender una problemática científica real que sea ha presentado en el Laboratorio de Ciencia y Tecnología Sustentable (LACyTES) del Plantel San Lorenzo Tezonco de nuestra universidad. Dicha problemática está relacionada con la morfología de una de las películas delgadas que componen a una celda solar a base de CdTe, ya que, en el proceso de la elaboración de dicha capa, aparece lo que se conoce como "pinholes" o huecos transversales, provocando que en las celdas aparezcan micro cortos circuitos impidiendo una colección adecuada de la corriente de portadores minoritarios. Para evitar o disminuir esta problemática, hemos propuesto como una posible solución; la elaboración de celdas solares con un recubrimiento polimérico de poli[3,4-etilendioxitiofeno]-poliestirensulfonato o PEDOT:PSS, entre el contacto posterior de cobre-molibdeno (Cu-Mo) y el CdTe + CdCl₂, esperando que esta capa evite que los "pinholes" provoquen mini cortos circuitos y por ende, incida en una mejora en la eficiencia fotovoltaica de estos dispositivos.

Introducción

Antecedentes

A lo largo de la historia en lo que respecta al desarrollo tecnológico, se han utilizado muchos tipos de combustibles para la generación de energía eléctrica, entre estos combustibles se encuentra la madera, carbón vegetal, carbón mineral, petróleo, gas natural, gasolinas, diesel, etc. Los combustibles más utilizados actualmente son los de origen fósil, éstos han ayudado en gran medida los países en su desarrollo económico y tecnológico, tanto que muchos países sustentan su economía en este tipo de fuentes energéticas. Sin embargo, la explotación de estos combustibles se ha hecho de una manera ineficiente y sin pensar en la sostenibilidad de ellos, ya que estos recursos son finitos y el uso prolongado contaminan en gran manera al medio ambiente como se muestra en la gráfica 1.



Gráfica 1- Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del sector energía. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2015).

En la búsqueda de satisfacer las necesidades sociales, así como en la mejora de la calidad de vida, nos lleva a poner atención en fuentes de energía que tengan un equilibrio económico, social y ambiental, o sea que sean energías sustentables. Una de estas fuentes de energía sustentable, es la energía solar (aprovechada en sistemas fotovoltaicos), ya que el principal recurso energético con el que cuenta el planeta es el Sol y éste se podría aprovechar en muchas partes del mundo.

México cuenta con condiciones naturales muy favorables para la aplicación de sistemas fotovoltaicos, en muchas partes de su territorio, ya que la Irradiación solar promedio es el doble de los países de Europa, por ejemplo, Alemania recibe una Irradiación normal directa máxima de 3.24 kWh/m² por día y actualmente es uno de los mercados fotovoltaicos más grandes en el mundo. La irradiación en México es de 8.06 5 kWh/m² por día en promedio (Anon., 2019), en figura 1 se muestra el potencial de electricidad fotovoltaico de México.

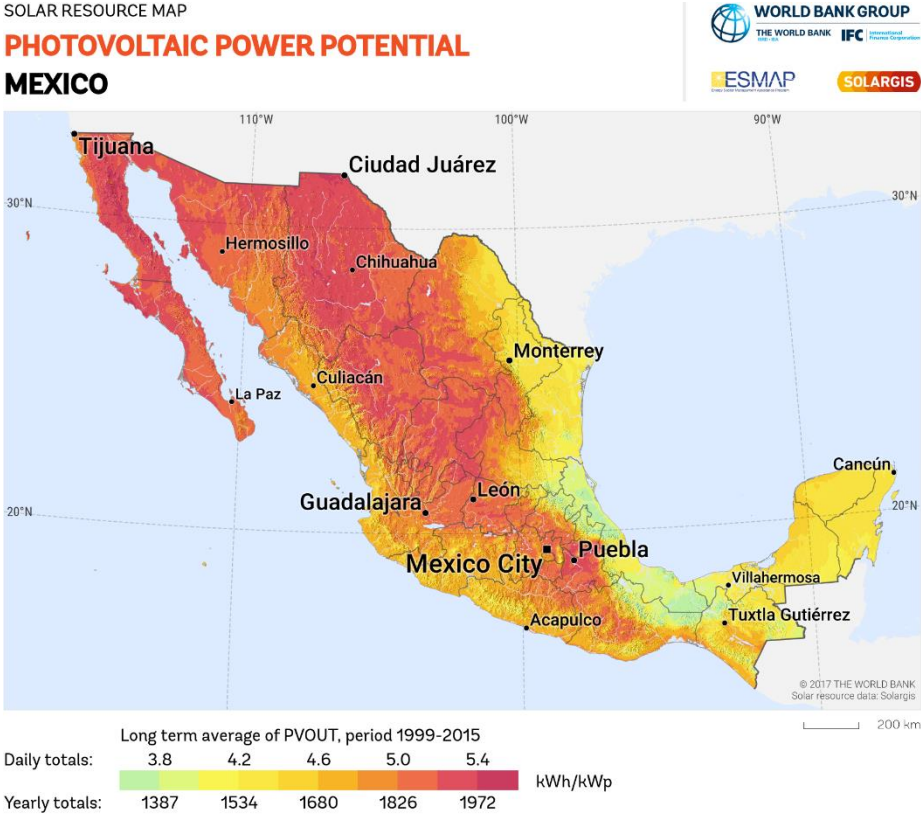
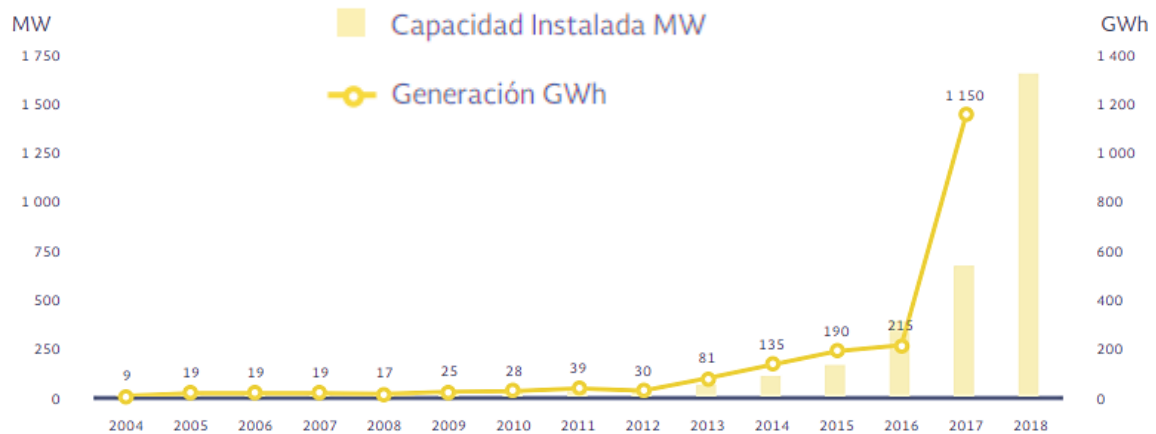


Figura 1 - Potencial de electricidad fotovoltaica. © 2017 El Banco Mundial, Datos de recursos solares: Solargis.

Según el reporte de avances de energías limpias en el primer semestre del 2018, la energía fotovoltaica presentó un crecimiento exponencial, en los primeros seis meses de ese año, ya que se instalaron cerca de 1,200 MW de capacidad. Adicionalmente, la generación distribuida creció de manera sostenida alcanzando 520 MW de capacidad instalada (Secretaria de Energía, 2018), por lo que enfocar

la investigación y desarrollo en el área de generación de energía fotovoltaica es de gran interés en nuestro país y a nivel global.



Gráfica 2- Capacidad instalada de energía fotovoltaica en México (2004-2018).

Existen diferentes tecnologías que aprovechan la energía solar y la transforman en energía eléctrica, cada una de ellas ha evolucionado y mejorado su eficiencia fotovoltaica como se muestra en la figura 2. Según el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL por sus siglas en inglés) estas tecnologías se pueden clasificar de la siguiente manera (Alicce for Sustainable Energy, 2019):

- Multijunción Cell (Celdas de multiunión)
- Single-Junction GaAs (Unión simple de GaAs)
- Crystalline Si Cell (Celdas Cristalinas de Si)
- Thin-Film Technologies (Tecnologías de película delgada)
- Emerging PV (PV emergentes)

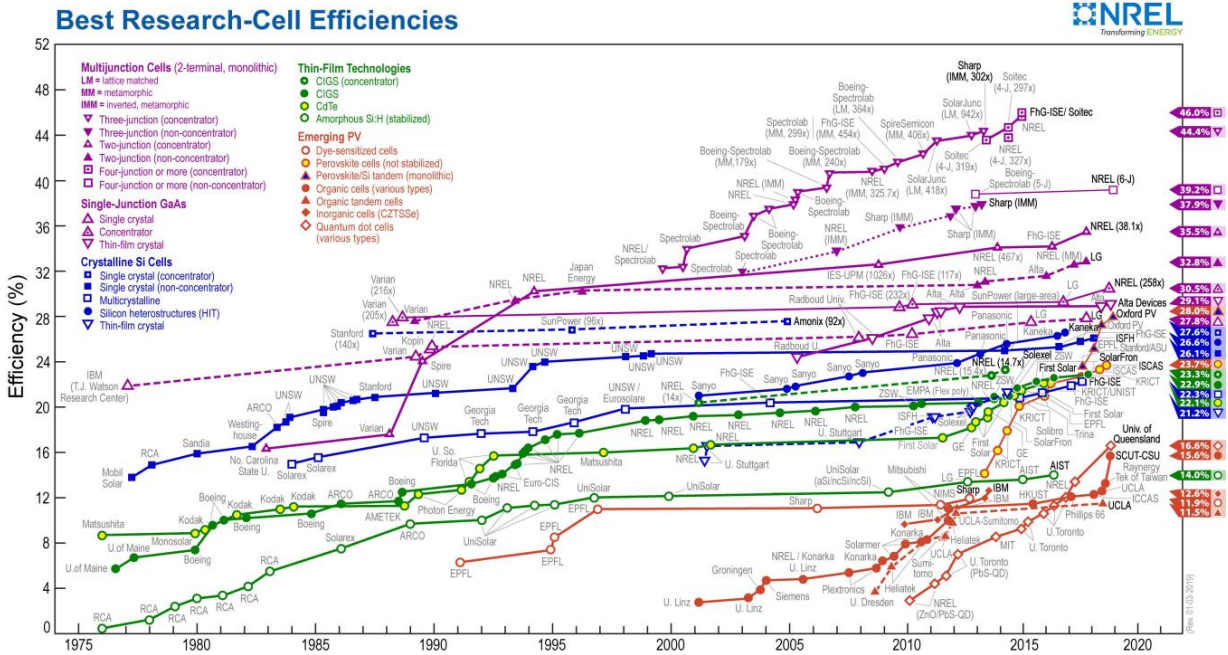


Figura 2 – Evolución de celdas solares fotovoltaicas (1975-2019) NREL.

La tecnología más conocida y comercial hasta el momento es la de celdas cristalinas de Silicio (Si), o también conocidas como celdas de primera generación. Éstas pueden ser de Si monocristalino (Si-m) o Si policristalino (Si-p), las cuales tienen un espesor total entre 0.25 y 0.35 mm; generalmente son de forma cuadrada, tienen una superficie comprendida de 100 cm² y cuando son radiadas a una potencia de 1000 W/m² y a una temperatura de 25°C, éstas producen una corriente continua comprendida entre 3 y 4 A (Gómez, 2018).

A comienzos de la década de los setenta se desarrollaron investigaciones de nuevos materiales fotovoltaicos que permitieron fabricar celdas usando una nueva tecnología conocida como de capa delgada o de segunda generación por ejemplo: las de Cu(In,Ga)Se₂ mejor conocidas como CIGS o bien, las de CdTe que son aún más conocidas. A finales de los ochenta (Tang, 1985) se inició el desarrollo de un nuevo tipo de materiales fotovoltaicos denominados emergentes, que permitieron fabricar las denominadas celdas orgánicas basadas en polímeros semiconductores (Oyola & Gordillo, 2007).

En México la tecnología fotovoltaica de primera generación se ha desarrollado desde la época de los setenta. El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) inició la manufacturación de obleas Fotovoltaicas (FV) y su ensamble en módulos (AUTREN, 2019).

En lo que respecta al estudio de las Celdas Solares de Segunda Generación de Película Delgada (CSSGPD) de Teluro de Cadmio (CdTe), normalmente se realizan con la estructura más común $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}+\text{CdCl}_2/\text{Cu}-\text{Mo}$, conocidas del tipo superestrato tal como se muestra en la figura 3. Estos materiales cuentan con más de 40 años de ser procesados y estudiados por distintos laboratorios, muchos de estos adscritos a universidades y centros de investigación nacionales e internacionales. En nuestro país el estudio de estos dispositivos inicio en el año de 1976 por parte de los profesores Feliciano Sánchez Sinencio y Alfred Zehe con celdas solares electroquímicas de CdTe, cuyos estudios fueron realizados en el Dpto. de Física del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, campus Ciudad de México (CINVESTAV-CDMX)

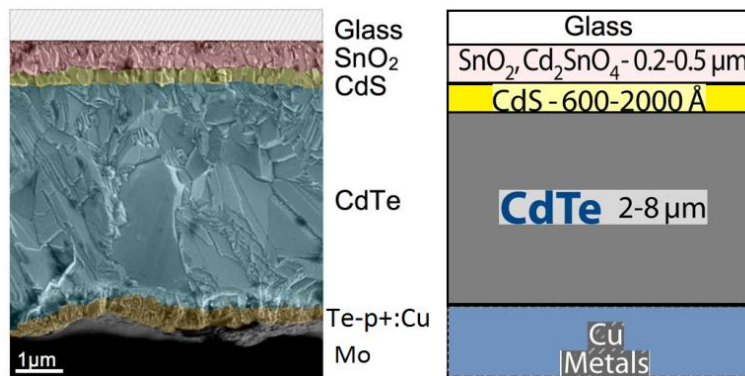


Figura 3 – Estructura típica de una CSSGPD del tipo superestrato a base de CdTe.

Problemática morfológica en el procesamiento de la película delgada de CdTe

En muchas ocasiones, al procesar las diferentes capas con los materiales que componen las celdas solares de CdTe, éstas no presentan las mejores

características morfológicas; tal es el caso de la CdTe que es el semiconductor absorbente, ya que, posteriormente a su procesamiento, el CdTe presenta pequeñas imperfecciones morfológicas conocidas en la literatura especializada de celdas solares fotovoltaicas como "pinholes". Estos pinholes se presentan en las celdas debido a la manera en la que se logró formar la película delgada de CdTe, también se puede presentar por las condiciones experimentales en las que se lleva a cabo el depósito, las cuales son: la temperatura y presión. La presencia de pinholes en la capa de CdTe pueden afectar seriamente el funcionamiento de la celda, provocando pequeños cortos circuitos, lo que incide en una baja eficiencia fotovoltaica de dichas celdas solares. En la figura 4, se muestra una película delgada de CdTe con múltiples pinholes.



Figura 4 – Muestra después del depósito de CdTe. Se observan pinholes.

Hipótesis

El polímero poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(4-styrenesulfonate), abreviado como PEDOT:PSS, es un material semiconductor orgánico en estado líquido, con propiedades atractora de huecos, que al ser depositado por la técnica de Sping-Coating podría cubrir los pinholes que se generen durante la elaboración de la película delgada semiconductor de CdTe de una celda solar inorgánica, permitiendo de esta manera, eliminar los micro cortos circuitos y mejorando así la respuesta fotovoltaica de la celda solar.

Así mismo, si el espesor de la película de PEDOT:PSS varía debido a la modificación de las revoluciones por minuto (rpm) de depósito, podríamos encontrar el espesor óptimo para la mejor respuesta fotovoltaica.

Objetivo general

Mejorar la eficiencia de conversión fotovoltaica en una celda solar a base de película delgada de CdTe mediante la incorporación del polímero orgánico PEDOT:PSS en la estructura usual.

Objetivos particulares

1. Elaborar una celda solar de segunda generación (a base de película delgada) de CdTe
2. Estudiar el comportamiento del PEDOT:PSS como una capa reparadora de huecos en celdas solares inorgánicas de CdTe
3. Estudiar la variación de las rpm en el proceso de depósito de la capa orgánica polimérica de PEDOT:PSS por la técnica de Spin Coating
4. Obtener, comparar y analizar las curvas características de I vs. V para una celda solar que presente "pinholes" antes y después de depositarle PEDOT:PSS

Capítulo 1 – Marco teórico

1.1 Efecto Fotovoltaico

La palabra fotovoltaico(a) está formada por la combinación de dos palabras de origen griego: foto, que significa luz, y voltaico que significa eléctrico. El nombre resume la acción de las celdas fotovoltaicas que transforman directamente la energía luminosa en energía eléctrica (Gasquet, 2004).

Para entender el efecto fotovoltaico es importante conocer el concepto de material semiconductor y unión P-N. Un material conductor, como el cobre o el aluminio, permite fácilmente el paso de una corriente eléctrica porque tiene un gran número de cargas libres dentro del mismo. Un material es un no-conductor (aislante), como lo son el vidrio o el plástico, no tienen cargas libres en su estructura química. Los

semiconductores son materiales con coeficientes de resistividad con valores intermedios entre los conductores y los aislantes, tal como se muestra en la figura 5. Este tipo de materiales que en circunstancias normales (de presión y temperatura) no conducen la electricidad, sin embargo, lo pueden hacer cuando la temperatura en ellos aumenta. Un material semiconductor hecho sólo de un único tipo de átomo (igual concentración de portadores de carga libres), se le denomina *semiconductor intrínseco*, por ejemplo, el Silicio (Gómez, 2018).

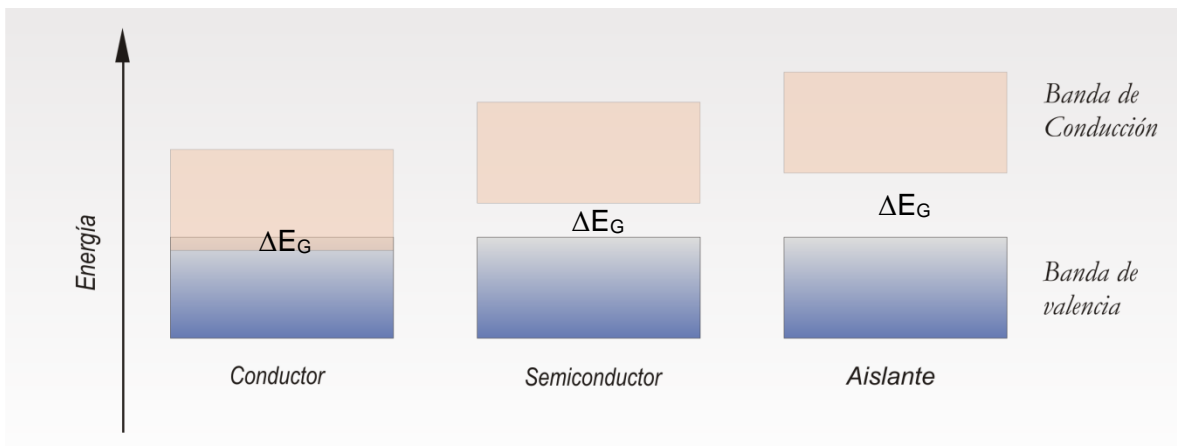


Figura 5 – Esquema de las bandas energéticas en los materiales. Entre la banda de valencia y la banda de conducción existe una brecha, la cual indica que entre más grande sea dicha brecha o banda prohibida, se requiere mayor energía (E_g) para que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción.

Un átomo de un semiconductor tiene 4 electrones en su órbita externa (electrones de valencia), forma 4 enlaces covalentes con los átomos de su alrededor. De esta manera cada átomo posee 8 electrones en su capa más externa, formando una red cristalina, en la que la unión entre los electrones y sus átomos es muy fuerte como se muestra en la figura 6. Por lo tanto, la red que se forma no permite fácilmente el desplazamiento de los electrones (por toda la red cristalina) y se comporta como un aislante, por lo tanto, la resistencia es muy alta (Gómez, 2018).

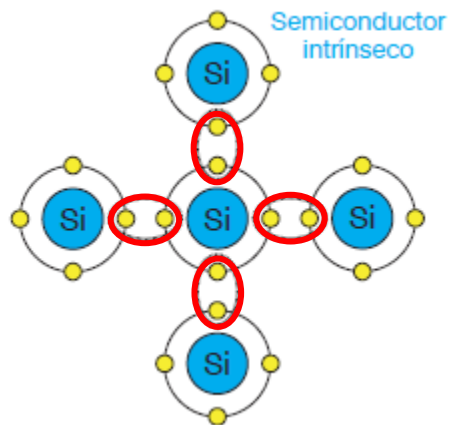


Figura 6 – Semiconductor intrínseco de Silicio (Si), donde se observan los enlaces covalentes.

Para que los electrones que se encuentran en los enlaces covalentes puedan ser liberados, se necesita proporcionarles una cierta energía, como aumentar la temperatura, de esta manera los electrones ganan energía y pueden estar en la banda de conducción, interviniendo de esta manera, en la conducción eléctrica, esto permite que la resistencia de los semiconductores disminuya y la conductividad aumente. Algunos semiconductores obtienen la energía necesaria para liberar electrones a temperaturas ambientes. Cuando los electrones son liberados se crea un “hueco” en la red cristalina, a este hueco, lo asociamos a una carga positiva como se muestra en la Figura 7.

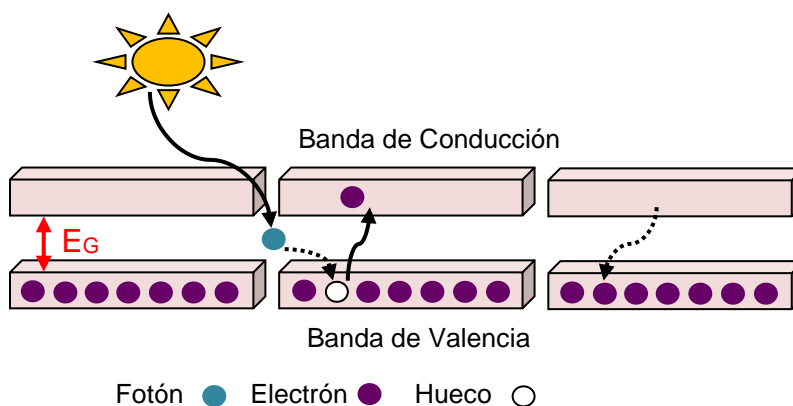


Figura 7 – Cuando un fotón excita a los electrones que se encuentran en la banda de valencia de un semiconductor, este aumenta su energía (E_G) y se libera para poder moverse a través de la banda de conducción del semiconductor; si el electrón no es extraído y pierde su E_G , este se recombina en la banda de valencia del semiconductor.

A los semiconductores se les puede dopar con elementos químicos que les permita disminuir el valor inicial de la resistencia, creando, al mismo tiempo, zonas con diferentes tipos de carga. Las celdas fotovoltaicas inorgánicas, de segunda generación, utilizan dos tipos de materiales semiconductores, el tipo N y el tipo P (Gasquet, 2004).

- Semiconductor tipo N – Cuando un material cede fácilmente electrones, se crea una zona dentro del semiconductor que tiene un exceso de cargas negativas (electrones). Esto es lo que se conoce como semiconductor de conductividad tipo N (negativo). A este tipo de semiconductores se emplean los elementos pentavalentes (con 5 electrones de valencia) que aportan electrones en exceso como se muestra en la figura 8.

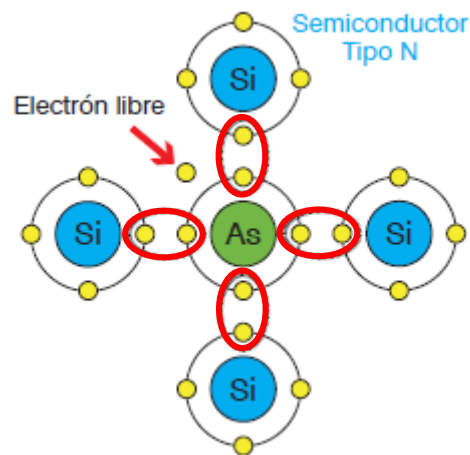


Figura 8 – El arsénico (As) es un elemento que se encuentra ubicado en la familia V de la tabla periódica, por lo tanto es un elemento que puede trabajar con 5 electrones de valencia, o sea, es un pentavalente. El Si al ser dopado con As forma 4 enlaces covalentes y deja un electrón libre (carga negativa).

- Semiconductor tipo P – Cuando la sustancia difusa atrapa electrones libres, los átomos que los pierden quedan cargados positivamente. En esta zona predominan las cargas positivas o huecos, obteniendo un semiconductor de conductividad tipo P (positivo). A diferencia de los semiconductores de tipo

N, a este tipo de semiconductores, se le emplean elementos trivalentes (con 3 electrones de valencia), ya que estos no permiten que se formen los 4 enlaces covalentes alrededor del átomo como se muestra en la figura 9, por lo tanto, se originan huecos que aceptan electrones que no pertenecen a su red cristalina, a este tipo de semiconductores también se les conocen como aceptador de electrones.

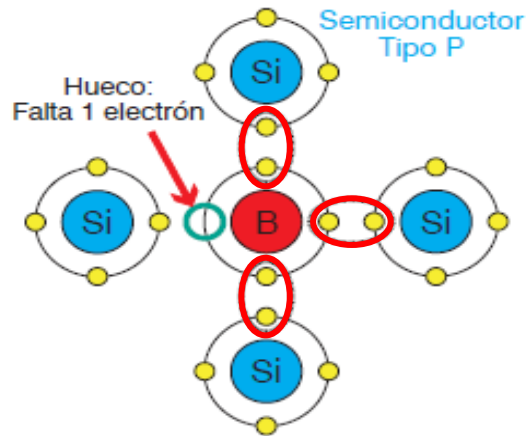


Figura 9 – El Boro (B) es un elemento que se encuentra ubicado en la familia III de la tabla periódica, por lo tanto es trivalente. Al dopar el Si con B se forman 3 enlaces covalentes y queda un hueco (carga positiva).

- Unión P-N – Es la parte de la celda solar donde aparece la recombinación y difusión de electrones (en la interface de los dos materiales) gracias a los portadores de cargas, pero estos efectos se pueden presentar en el mismo material donde hay zonas semiconductoras del tipo n y del tipo p como se muestra en la figura 10, a esta unión también se le conoce como *homounión p-n*. Así mismo, las regiones n y p se pueden presentar en distintos materiales y se le conoce comúnmente como *heterounión p-n*.

En una unión P-N, los electrones del semiconductor tipo-n se desplazan hacia la región tipo p y viceversa; estos desplazamientos dejan átomos ionizados que no se pueden mover. En las dos regiones cargadas con signos opuestos, cercanas a la unión (interface) de los dos semiconductores, se crea

un campo eléctrico interno E_{int} y un potencial de contacto V_{bi} entre los iones positivos y los iones negativos (Mendoza Pérez, 2007).

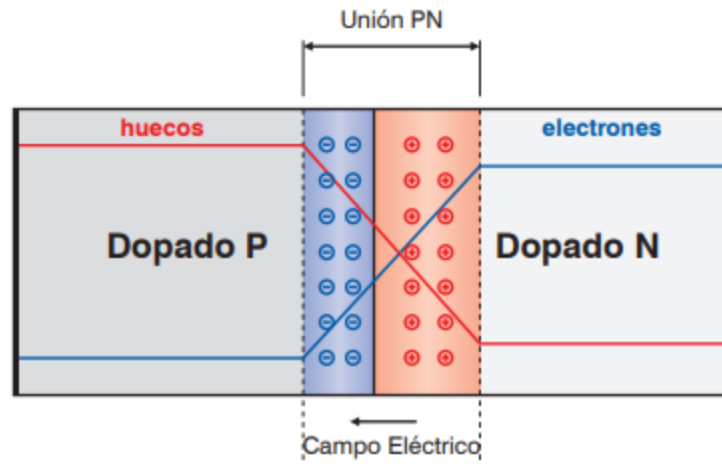


Figura 10 – Hererounión P-N de dos semiconductores dopados. El semiconductor tipo P (+) atrae cargas negativas de la zona N (-) y viceversa, estas cargas que son atraídas se ionizan y permiten que se forme un campo eléctrico entre ambas zonas.

En resumen, el efecto fotovoltaico se crea cuando la energía luminosa (radiación solar) en forma de fotones excitan a los electrones (-) que se encuentran en la unión p-n y estos se liberan creando huecos (+) y gracias al campo eléctrico interno (E_{int}) estas cargas se mueven en dirección opuesta como se muestra en la figura 11.

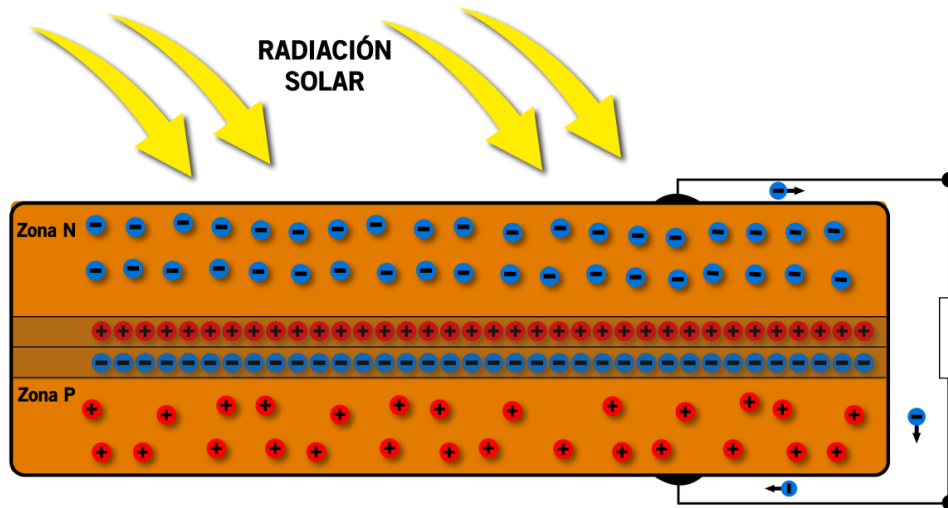


Figura 11 – Cuando se liberan las cargas negativas, éstas son atraídas por un metal que permite su conducción (corriente eléctrica) y al cerrar el sistema, se forma un circuito eléctrico.

1.2 Parámetros eléctricos de una celda solar fotovoltaica

Una celda solar fotovoltaica se le debe considerar como un diodo (dispositivo semiconductor que cuenta con dos terminales, un ánodo (+) y un cátodo (-), el cual sólo permiten el flujo de la electricidad en un solo sentido) en iluminación. En la celda solar la “zona P” sería el ánodo y la “zona N” el cátodo. Una celda solar en general debe presentar una resistencia en paralelo muy alta y una resistencia en serie muy baja. El circuito eléctrico equivalente de una celda solar se muestra en la figura 12.

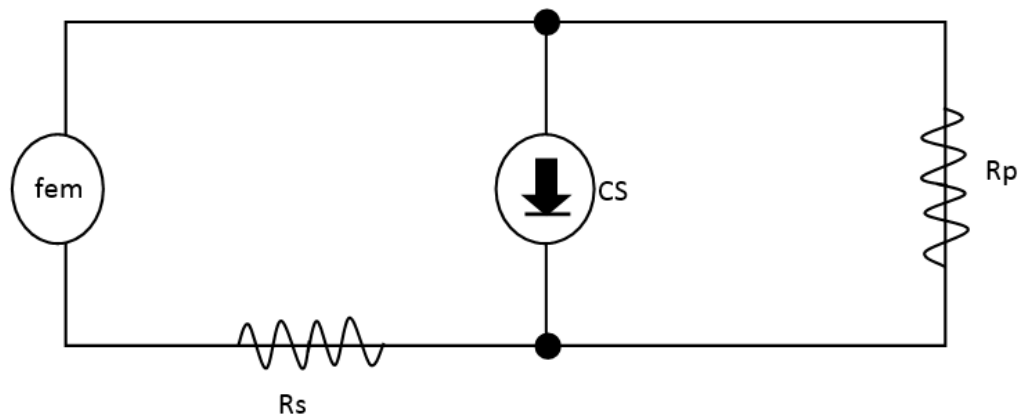


Figura 12 – Circuito eléctrico de una celda solar, donde se representa la Fuerza Electromotriz (FEM), Celda Solar (CS), Resistencia en paralelo (R_p -alta) y Resistencia en serie (R_s -baja).

La representación eléctrica más representativa sobre el rendimiento de una celda solar o un módulo fotovoltaico, es la curva de corriente vs voltaje (I vs V). Dicha caracterización se realiza en condiciones estándares de medición (STC – Standard Test Condition) en un espectro AM1.5 (air mass) a $T=25^\circ\text{C}$ bajo un nivel de radiación electromagnética de 100 mW/cm^2 ó 1000 W/m^2 .

Bajo estas condiciones se realizan las mediciones estándar normalizadas reproducibles en todo el mundo.

La curva I vs V de una celda solar en oscuridad proporciona una relación de la calidad de su comportamiento como diodo, es decir, la unión P-N. Un diodo

semiconductor que se convierte en generador de corriente cuando incide la corriente sobre él, teniendo el efecto de desplazar la curva I vs V hacia abajo como se muestra en la figura 13.

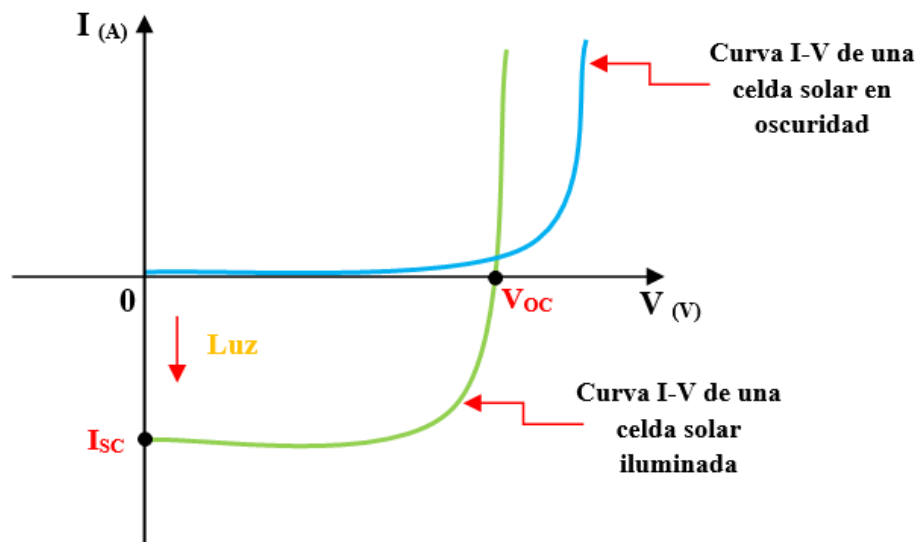


Figura 13 – Curva representativa I vs V de una celda solar en condiciones de oscuridad e iluminación.

Curva J vs V

La curva Densidad de Corriente vs Voltaje (J vs V) nos permite conocer los parámetros eléctricos de salida, así como la eficiencia de conversión fotovoltaica de una celda solar. Para describirlo mejor, primero definiremos los conceptos asociados a los parámetros eléctricos de salida de la celda solar.

- **Voltaje de circuito abierto (V_{oc} por sus siglas en inglés)** – Es la cantidad de voltaje que proporciona una celda solar cuando se encuentra a “circuito abierto” o sea, no tiene una carga eléctrica circulando a través de él.
- **Corriente de corto circuito (I_{sc} por sus siglas en inglés)** – Es la cantidad de corriente que atraviesa la celda solar cuando el voltaje entre sus terminales es nulo, o sea que está en corto circuito. La I_{sc} depende de la generación y recolección de los portadores de carga.

- **Densidad de corriente de corto circuito (J_{sc} por sus siglas en inglés)** – Es la cantidad de corriente por unidad de área efectiva, que va a tener una celda solar cuando no está conectada a una carga eléctrica (corto circuito).

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{\text{Área}} \quad \left[\frac{A}{m^2} \text{ ó } \frac{mA}{cm^2} \right] \dots \dots \dots (1)$$

- **Potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$)** – Es la máxima potencia que puede alcanzar una celda solar cuando la densidad de corriente y el voltaje son máximos, la $P_{m\acute{a}x}$ se define como:

$$P_{m\acute{a}x} = J_{m\acute{a}x} * V_{m\acute{a}x} = \left(\frac{I_{m\acute{a}x}}{\text{Área}} \right) * V_{m\acute{a}x} \quad \left[\frac{W}{m^2} \text{ ó } \frac{mW}{cm^2} \right] \dots \dots (2)$$

- **Factor de llenado (FF por sus siglas en inglés)** - El FF es la relación de la potencia máxima de la celda y su potencia característica obtenida del producto de V_{oc} y I_{sc} . Gráficamente, el FF es una medida de la "cuadratura" de la gráfica I vs V , en una celda solar y que coincide también con el área del rectángulo más grande que se ajuste en la curva I vs V ; tal como se muestra en la figura 14. El FF se define de la siguiente manera:

$$FF = \frac{J_{m\acute{a}x} * V_{m\acute{a}x}}{J_{sc} * V_{oc}} = \frac{\left(\frac{I_{m\acute{a}x}}{\text{Área}} \right) * V_{m\acute{a}x}}{\left(\frac{I_{sc}}{\text{Área}} \right) * V_{oc}} = \frac{I_{m\acute{a}x} * V_{m\acute{a}x}}{I_{sc} * V_{oc}} \dots \dots (3)$$

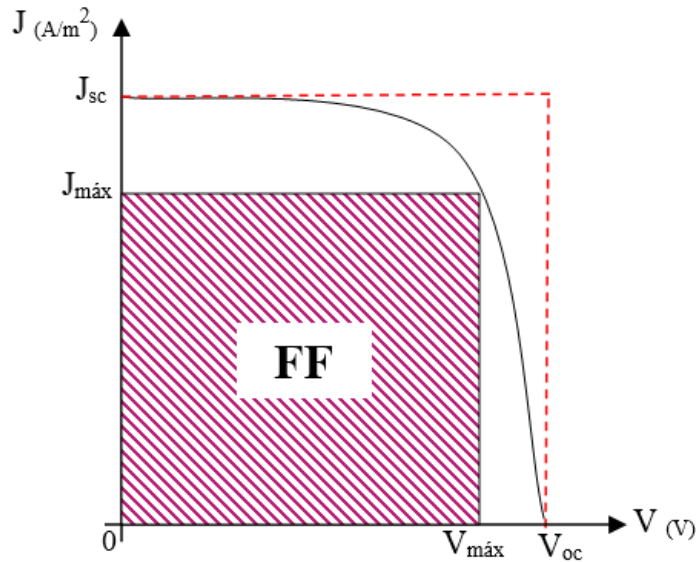


Figura 14 – Curva representativa J vs V de una celda solar fotovoltaica.

→ **Eficiencia fotovoltaica (η)** – Es el rendimiento porcentual de la cantidad de energía solar que se convierte en energía eléctrica ($P_{m\acute{a}x}$), con respecto a la energía solar incidente (potencia de incidencia de la radiación solar – 1000 W/m² para módulos ó 100 mW/cm² [P_{in}]).

$$\eta = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{in}} * 100 = \frac{J_{m\acute{a}x} * V_{m\acute{a}x}}{P_{in}} * 100 = \frac{FF * V_{oc} * J_{sc}}{P_{in}} * 100 \quad [\%] \dots \dots (4)$$

1.3 Celda solar inorgánica de película delgada

En el año de 1967, se descubren nuevos materiales fotovoltaicos teóricos que podrían aumentar el rendimiento de las celdas solares, reducir el costo de los sistemas fotovoltaicos y reducir la cantidad de material empleado en la fabricación de las celdas sin que se afecte su tiempo de vida. Existen tres clases de celdas solares de película delgada que han emergido y que usan como materiales absorbentes, a el silicio amorfo (a-Si), a los compuestos de los materiales: Cobre, Indio, Galio y Selenio Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) y al Teluro de Cadmio CdTe (Ornelas Acosta, 2011) como se muestra en la figura 15. Este tipo de celdas implementan tecnologías tipo tándem ó multi-unión y se desarrolló la primera celda solar de

película delgada “thin film” (por sus siglas en inglés) mediante sulfuro de cadmio (CdS) (Aguilera González & Sandoval Espinoza, 2014).

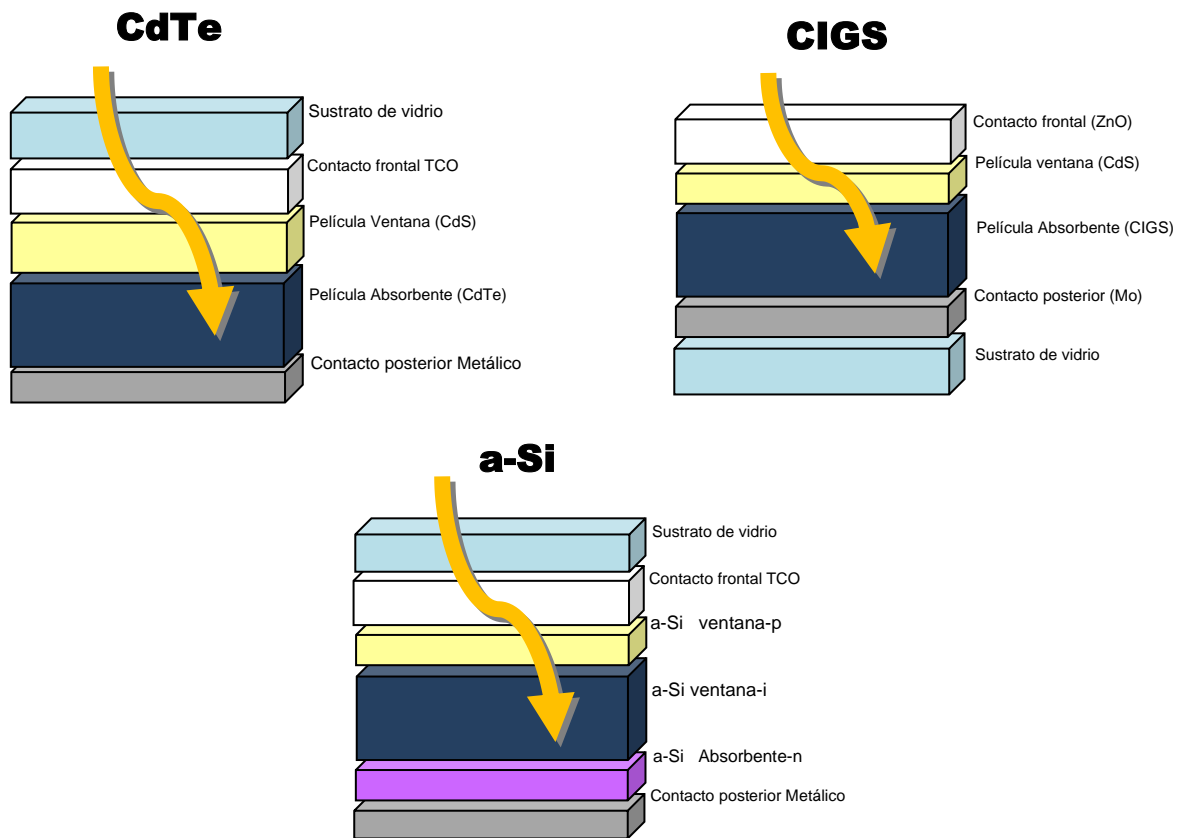


Figura 15 – Diferentes estructuras de celdas solares de película delgada más representativas: Arriba-Izquierda. Celda Solar a base de CdTe, Arriba- Derecha. Celda solar a base de CIGS y Abajo-Centro. Celda solar a base de Silicio amorfo.

1.3.1 Principales materiales utilizados en el procesamiento usual de celdas solares a base de película delgada de CdTe

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se analizarán las celdas de película delgada de CdTe, generalmente fabricados en la estructura típica del tipo superestrato a base de CdTe por: $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}+\text{CdCl}_2/\text{Cu}-\text{Mo}$; cada uno de estos materiales tiene características importantes por lo cual fueron seleccionados para su aplicación en celdas solares e incluso, estas características permiten elegir el orden dentro de la estructura típica en el que son colocados.

Óxido de Estaño (SnO₂)

La base de una celda solar es la capa conocida como sustrato (transparente en el espectro Vis-IR) conductor recubierto de algún óxido conductor transparente que servirá como contacto frontal; en este caso se utilizó óxido de estaño dopado con flúor (FTO) específicamente TEC-15 de 3.0 mm de espesor de la base de vidrio y de aproximadamente 500 nm de espesor del FTO; cuyas características físicas se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1- Propiedades de los sustratos NSG TEC™ marca Pilkington

| Producto | Espesor (mm) | Transmitancia (%) | Resistencia (Ohm/sq.) |
|--|------------------------------|-------------------|-----------------------|
| NSG TEC™ Propiedades del producto | | | |
| NSG TEC™ 7 | 2.2, 3.0, 3.2 | 80-82 | 6-8 |
| NSG TEC™ 8 | 2.2, 3.2 | 80-81.5 | 7-9 |
| NSG TEC™ 15 | 2.2, 3.0, 3.2, 4.0, 5.0, 6.0 | 82-84.5 | 12-14 |
| NSG TEC™ 35 | 3.2, 4.0 | 82-84 | 32-48 |
| NSG TEC™ 70 | 3.2, 4.0 | 82-84 | 58-72 |

Se utilizó el vidrio TEC-15 porque es la mejor opción para aplicaciones que requieren control de condensación pasiva y rendimiento térmico con baja emisión, además tiene una apariencia semi transparente y con una resistencia de alrededor de los 84.5% que es una característica necesaria para un sustrato de celdas solares de película delgada.

Óxido de Zinc (ZnO) y Sulfuro de Cadmio (CdS)

Las primeras capas en la tecnología de películas delgadas que se procesaron sobre el vidrio TEC-15 limpio fueron el Óxido de Zinc (ZnO) y el Sulfuro de Cadmio (CdS). El ZnO es un óxido metálico semiconductor de la familia II-VI, con una banda de energía con un valor de ancho de banda prohibida de 3.37 eV a temperatura ambiente, es un compuesto muy iónico debido a la diferencia de

electronegatividades¹ del zinc y el oxígeno y la estructura más estable de este compuesto se presenta en su fase hexagonal como se muestra en la figura 16. Cada átomo de zinc se encuentra rodeado por un tetraedro de 4 átomos de oxígeno y viceversa; por lo tanto, el ZnO es un semiconductor tipo-n (Pérez Taborda, et al., 2008).

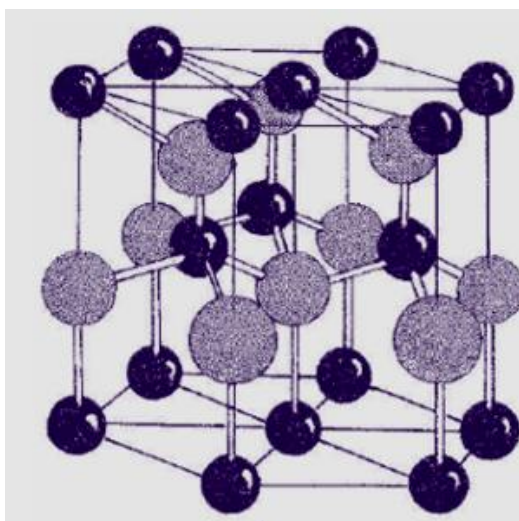


Figura 16 – Estructura cristalina hexagonal del Óxido de Zinc (ZnO), donde los átomos de Zinc (Zn) son los más oscuros y los de oxígeno (O) lo más claros (Pérez Taborda, et al., 2008).

Sulfuro de Cadmio (CdS)

El Sulfuro de Cadmio (CdS) funciona como materiales ventana, ya que es un compuesto semiconductor de la familia XII-XVI, el cual presenta un valor de su ancho de banda prohibida (E_g) de aproximadamente 2.42 eV (Pérez González & Valeriano Arreola, 2008) en la región visible del espectro electromagnético (400–700 nm). Generalmente es un semiconductor de tipo-n debido al exceso de Cadmio (Cd) o la ausencia de Sulfuro (S) en la preparación del compuesto, la fase cristalina más estable del CdS se presenta en una estructura hexagonal, como se muestra en la figura 17 (Mazón Montijo, 2009).

¹La electronegatividad, es la capacidad de un átomo para atraer hacia sí los electrones de un enlace químico. Los elementos con electronegatividad alta tienen mayor tendencia para atraer electrones que los elementos con electronegatividad baja.

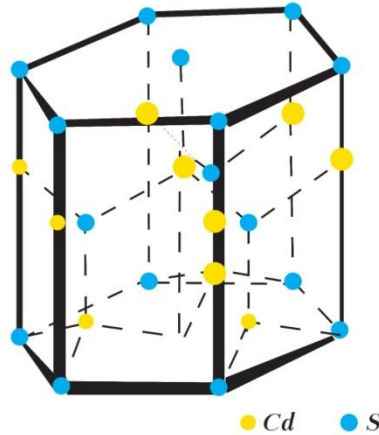


Figura 17 – Estructura hexagonal del Sulfuro de Cadmio (CdS) (Mazón Montijo, 2009).

La ventana óptica dentro de la celda solar está constituida por la capa buffer y la capa de óxido conductor transparente (TCO); su función principal es permitir que la mayor cantidad de radiación solar llegue hasta la capa absorbente además de favorecer la generación de un campo eléctrico del dispositivo, reduce la cantidad de defectos entre la capa absorbente y el TCO mejorando la unión entre las dos capas.

En particular los materiales que se utilizan como capa buffer deben ser altamente transparentes a la radiación incidente, deben presentar un E_g superior a 2.4eV, las capas deben tener espesores entre 50-150 nm para que la absorción de radiación sea baja y deben presentar una estructura cristalina definida (Vallejo Lozada, 2011).

Teluro de Cadmio

El Teluro de Cadmio (CdTe) es un material semiconductor absorbente tipo p, absorbente conocido como “el material activo” debido al valor de su banda prohibida que es $E_g \approx 1.45$ eV a temperatura ambiente (Farid, et al., 2015). A esta película se le conoce como absorbente, ya que tiene un coeficiente de absorción α (λ) alto que nos indica la cantidad de fotones que se absorben por unidad de longitud de material atravesado por la radiación electromagnética incidente para cada longitud de onda (λ), como se muestra en la figura 18.

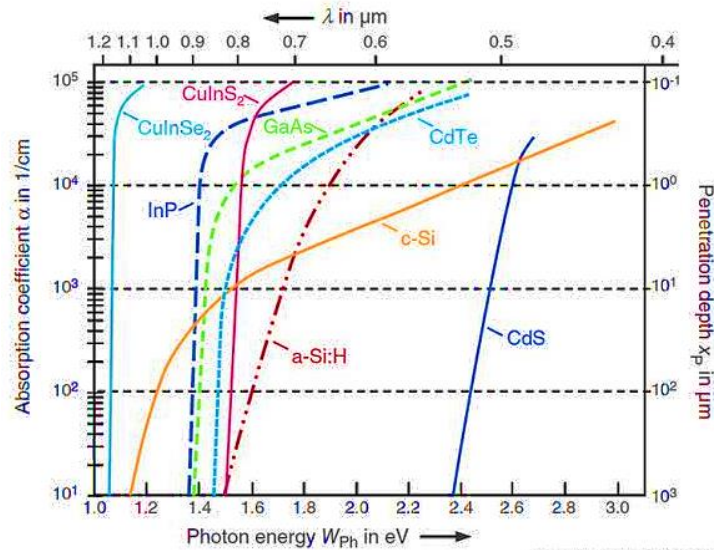


Figura 18 – Coeficientes de absorción de diferentes materiales semiconductores en dependencia de la energía del fotón: los semiconductores directos muestran un fuerte aumento de la absorción por encima de la energía de banda prohibida (Mertens, 2019).

Las películas delgadas de CdTe usadas en dispositivos fotovoltaicos son usualmente policristalinas (figura 19) y las fronteras entre sus granos tienen un impacto significativo en el desempeño de las celdas solares a base de CdS/CdTe. Las fronteras de grano en las películas delgadas de CdTe pueden actuar como centros de recombinación eléctrica. Las fronteras de grano, también actúan como barreras de potencia para el transporte de corriente eléctrica, o causar fugas de corriente. El tamaño de los granos en las películas delgadas de CdTe es conocido que dependen fuertemente de la temperatura de depósito (Gómez, et al., 2013).

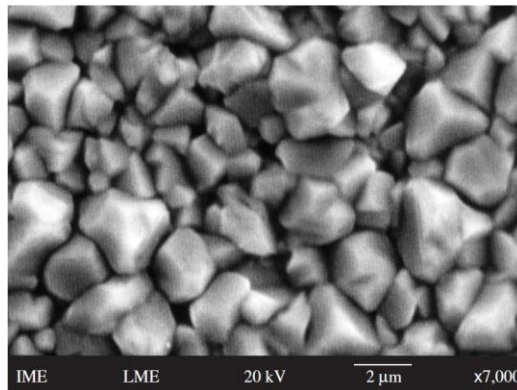


Figura 19 – Fotografía de la morfología de una capa de CdTe, medida por Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) (Falcao, et al., 2006).

Cloruro de Cadmio (CdCl_2)

El Cloruro de Cadmio en una de sus presentaciones comerciales es un polvo blanco, incoloro e inodoro. Se utiliza en la fabricación de fungicidas, el teñido e impresión de textiles y baños de acabado metálico.

El CdCl_2 en lo referente a las celdas solares de CdTe, se utiliza para implementarlo en un tratamiento térmico (TT), ya que se ha observado que este tipo de tratamientos térmicos con CdCl_2 produce un crecimiento de cristales en las capas de CdS y CdTe (figura 20), lo cual permite que haya una mejor redistribución del tamaño y número de cristales de la capa; así como la pasivación de las fronteras de grano y una extracción de impurezas en la capa. Tanto el TT con CdCl_2 como la iluminación en la celda producen una disminución de las barreras de potencial entre los granos que se refleja en la disminución de la resistividad de las películas (Galán, et al., 2004).

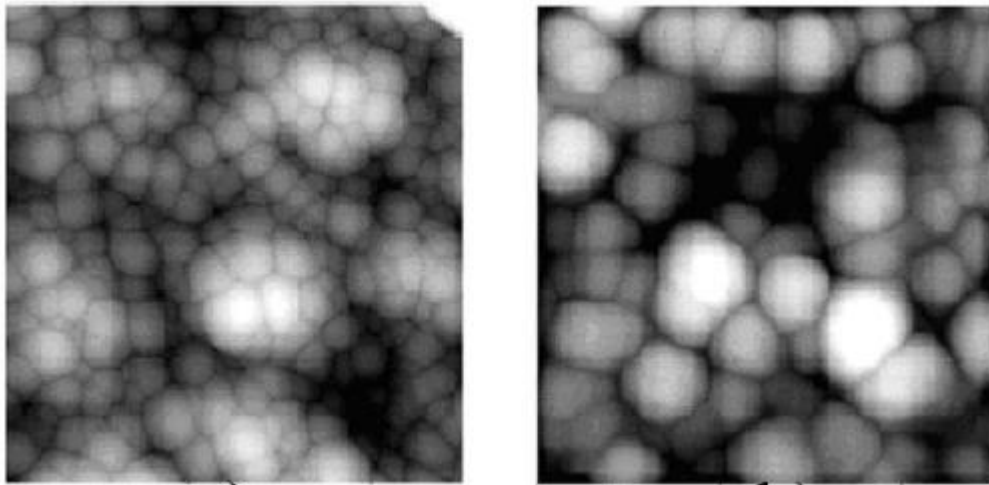


Figura 20 – Fotografía de AFM de capas de CdS crecidas por Transporte de Vapor en Espacio Cercano (CSVT por sus siglas en inglés). La fotografía del lado izquierdo muestra la morfología de una película delgada sin tratamiento TT con CdCl_2 y lado derecho con tratamiento con CdCl_2 (Galán, et al., 2004).

Contactos Cobre – Molibdeno (Cu-Mo)

El Cobre-Molibdeno (Cu-Mo) es una aleación metálica que se utiliza como contacto posterior en las celdas fotovoltaicas. Existen diferentes aleaciones de Cobre (Cu) resistentes a altas temperaturas, así como excelentes propiedades de

conductividad eléctrica y térmica, su principal uso es en celdas solares fotovoltaicas de alta eficiencia de conversión, contactores eléctricos, componentes de tubos para difracción de rayos X, filamentos, electrodos de soldadura, entre otros. Las principales aleaciones son, Cu-Cr, Cu-Ti, Cu-Zr y Cu-Mo (Aguilar, et al., 2004).

Cuando un metal hace contacto con un semiconductor se forma una barrera en la interface metal-semiconductor. Esta barrera se forma para un material semiconductor tipo-n donde la función trabajo² del metal que se utiliza para hacer contacto es mayor que la afinidad electrónica³ del semiconductor ($\Phi_m > \Phi_n$). Para un semiconductor tipo-p, la función trabajo del metal debe ser menor que la afinidad electrónica del semiconductor ($\Phi_m < \Phi_p$) permitiendo que los electrones de la banda de conducción del semiconductor fluyan hacia el metal hasta que los niveles de Fermi de los materiales se alinean.

Para los casos contrarios ($\Phi_m < \Phi_n$ y $\Phi_m > \Phi_p$) se obtienen contactos no rectificadores o también llamados contactos óhmicos. Esta barrera es responsable de controlar la conducción de corriente, también del comportamiento capacitivo del dispositivo (Calleja Gómez, 2011).

El contacto posterior puede tener una fuerte contribución en la R_s debido a la alta función de trabajo del semiconductor CdTe si ésta presenta un valor alto, la eficiencia de conversión fotovoltaica es limitada a través del Factor de llenado (FF) (Peña, et al., 2011).

1.4 Celda solar fotovoltaica orgánica (OPV)

Las OPVs son otro tipo de dispositivos fotovoltaicos basados en compuestos orgánicos, éstos están formado principalmente por átomos de carbono (C) e hidrógeno (H), también contienen átomos de nitrógeno (N), oxígeno (O), azufre (S), entre otros; los átomos de carbono se unen por enlaces covalentes que pueden ser

² Función de trabajo: Es la diferencia de energía entre el nivel del vacío y el nivel de Fermi, esta cantidad es denotada por $q\Phi_m$ para el metal, y es igual a $q(\chi+\Phi_n)$ en el semiconductor, donde $q\chi$ es la afinidad electrónica medida desde el mínimo de la banda de conducción (E_c) al nivel de vacío, y $q\Phi_n$ es la diferencia de energía entre E_c y el nivel de Fermi.

³ Afinidad electrónica (Φ): La diferencia energética entre el nivel inferior de la banda de conducción E_c y el nivel de vacío.

de dos diferentes tipos, sigma (σ) con enlaces sencillos y pi (π) que puede tener enlaces dobles o triples como se muestra en la figura 21; en estas configuraciones se presenta la deslocalización de los electrones en la estructura conjugada lo cual le permite al compuesto presentar propiedades opto-electrónicas; al combinar estos compuestos se obtienen polímeros semiconductores de bajo peso molecular (Barbosa García, et al., 2012).

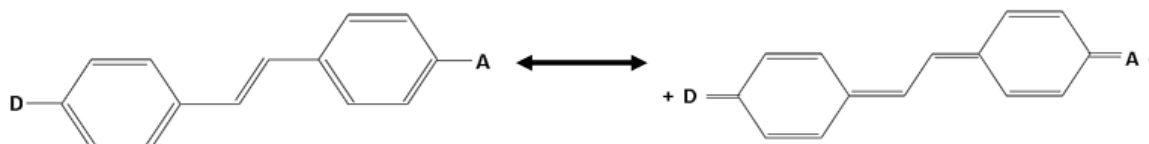


Figura 21 – Estructura química de moléculas dipolares orgánicas conjugadas
Fuente: (Barbosa García, et al., 2012).

Los polímeros semiconductores utilizados en una OPV deben cumplir con la fotogeneración de carga y el transporte de las mismas a través de una unión p-n al igual que las celdas inorgánicas. Los polímeros orgánicos se pueden combinar con fullerenos, ya que los polímeros funcionan como materiales tipo p (conductores con portadores de carga mayoritariamente huecos) y los fullerenos como materiales de tipo n (aceptor y conductor de electrones) (Barbosa García, et al., 2012).

Una celda OPV tiene un comportamiento similar a una celda solar inorgánica, ya que, al ser iluminada, absorbe la luz por el material orgánico y se produce un excitón, o sea, una pareja electrón-hueco fuertemente enlazada. El excitón se desplaza entre las moléculas orgánicas (capa activa) ocurriendo una separación de éste, provocando que los huecos y electrones libres se dirijan a sus electrodos (ánodo y cátodo respectivamente) produciendo un voltaje y una corriente (Barbosa García, et al., 2012).

Como se ha observado la banda prohibida o “band gap” juega un papel importante para la generación del efecto fotovoltaico de una celda solar. En el caso de una OPV el “band gap” se encuentra entre los niveles energéticos llamados HOMO (orbital molecular ocupado de más alta energía) y LUMO (orbital molecular no ocupado de más baja energía), el HOMO estaría ocupando el lugar de la banda de valencia y el

LUMO el lugar de la banda de conducción, similar a un semiconductor inorgánico (Chamorro Coral & Urrego Riveros, 2012). La función de trabajo de los electrodos debe correlacionarse con los niveles energéticos, denominados HOMO y LUMO de los compuestos orgánicos empleados como se muestra en la figura 22. Al igual que las celdas solares inorgánicas, las celdas solares orgánicas pueden elaborarse ya sea procesando una o varias capas en su configuración.

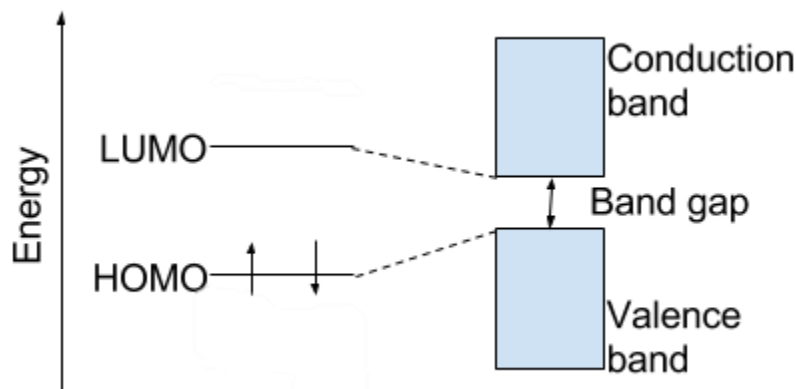


Figura 22 – Band gap entre los niveles energéticos “HOMO y LUMO” (Anon., 2017).

1.4.1 OPV con una capa o unicapa

La celda solar fotovoltaica unicapa, como su nombre lo dice sólo consiste de una capa de un polímero conjugado entre dos electrodos metálicos que tienen la función de generar el campo eléctrico de intensidad necesaria, tal como se muestra en la figura 23. Este tipo de OPV no es tan eficiente, ya que los polímeros conjugados tienen una baja constante dieléctrica. Al fotoexcitarse un electrón del HOMO del polímero conjugado, se forma un excitón que al entrar en contacto con el cátodo se disocia generando portadores de carga libre que se dirigen hacia sus respectivos electrodos, generando así la corriente eléctrica. Estos excitones sólo tienen unas decenas de eV, lo que limita el valor obtenido de la eficiencia de conversión fotovoltaica alrededor de un 0,1% (Chamorro Coral & Urrego Riveros, 2012).

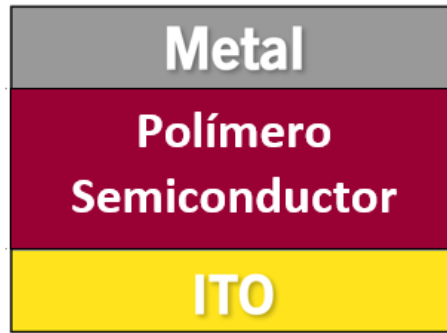


Figura 23 – Esquema de una OPV de una sola capa.

1.4.2 OPV de bicapa

Es la heterounión entre dos materiales con diferentes afinidades electrónicas y potenciales de ionización, estas propiedades provocan la disociación del excitón en la interface de los dos materiales, generando que los electrones que serán aceptados por el material con mayor afinidad electrónica (material aceptor), y los huecos que se moverán a través del material con menor potencial de ionización (material donador), obteniéndose de esta manera, la corriente eléctrica tal como se muestra en la figura 24 (Chamorro Coral & Urrego Riveros, 2012).

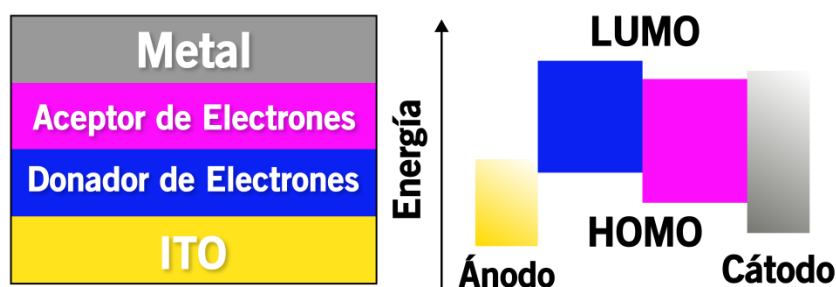


Figura 24 – Esquema de una celda solar de heterounión y su disposición de bandas de energía. (Chamorro Coral & Urrego Riveros, 2012).

1.4.3 Heterounión en el bulto o BHJ (Bulk heterjunction)

Este tipo de celda solar fotovoltaica, tiene entre otras capas, una película delgada (de 100 nm aprox.) que está compuesta por una mezcla homogénea de un donador

de electrones (polímero semiconductor altamente conjugado) y un aceptor de electrones (generalmente un derivado de fullereno) a esta capa se le conoce como capa activa; en este tipo de celda también se colocan otro tipo de polímeros semiconductores antes de los electrodos, los cuales facilitan y mejoran el transporte de cargas como se puede ver en la figura 25. Este tipo de mezcla permite que cualquier punto de la película tenga una mezcla donador/aceptor, disminuyendo así, la distancia entre ellos y favoreciendo el proceso de disociación del excitón (Chamorro Coral & Urrego Riveros, 2012).

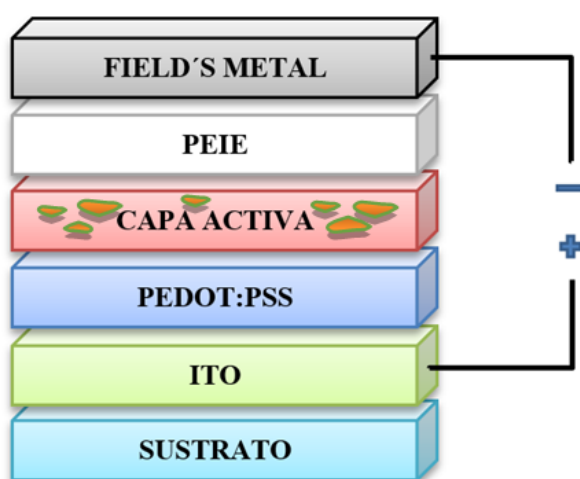


Figura 25 – Esquema de una celda de Heterounión de bulto (BHJ).

1.5 Película extractora de portadores de carga PEDOT:PSS

1.5.1 Polímeros orgánicos conductores

Los polímeros orgánicos conductores fueron descubiertos en 1977, cuando fue sintetizado el Poliacetileno y dopado por los científicos Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid y Hideki Shirakawa, este hallazgo los hizo acreedores al premio Nobel de Química en el año 2000 (González González & López Sandoval, 2014).

Los polímeros conductores son materiales orgánicos con largas cadenas conjugadas, que tienen una distribución de dobles enlaces de carbono C=C (tipo π) alternándose con enlaces simples C-C (tipo σ), y poseen aniones (ión con carga

negativa) dopantes incorporados a la cadena. Estos aniones incrementan varios órdenes de magnitud su conductividad eléctrica; además, tienen una alta capacidad de almacenamiento de carga, es decir, la carga que puede ser almacenada por la unidad de masa del polímero (Estrany Coda, et al., 2011).

En el caso de los polímeros conductores lo que facilita el transporte de carga a través de sus cadenas son los polarones y bipolarones. Un polarón es un catión radical parcialmente deslocalizado en varias unidades monoméricas (Estrany Coda, et al., 2011), por el polarón pasan los electrones. Cuantos más electrones se arranquen de cada cadena del polímero mayor será la concentración de polarones y, por lo tanto mayor la conductividad de la película polimérica. Las cargas positivas generadas se distribuyen homogéneamente a lo largo de la cadena. Cuando la concentración de polarones en una cadena es alta, al arrancar el siguiente electrón dos polarones se recombinan para dar un bipolarón que es un dicatión radical como se muestra en la figura 26 (Romero, 2017).

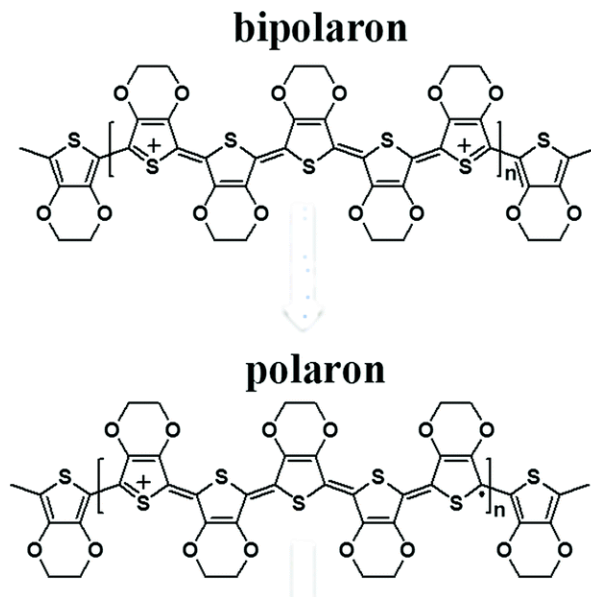


Figura 26 – Estructura química de un bipolaron y un polaron para el poli(3,4-etilendioxitiofeno), PEDOT
Fuente: (Romero, 2017).

Por otra parte, existen dos tipos de polímeros semiconductores que son de gran importancia para las OPVs: los polímeros semiconductores que se utilizan como

donadores de electrones y los polímeros aceptores de electrones (Chamorro Coral & Urrego Riveros, 2012).

Para que un polímero semiconductor orgánico sea empleado como donador de electrones, debe cumplir las siguientes propiedades:

- Alta conductividad (mayor a 1,000 S/cm)
- Altas movilidades de los huecos generados ($0.05 - 0.1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
- Una diferencia energética entre HOMO y LUMO, esto es, que la banda prohibida (E_g) sea la óptima y que permita la mayor absorción de radiación posible ($< 2 \text{ eV}$)
- Un coeficiente de absorción alto ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$)
- Alta solubilidad en solventes volátiles, lo que permite facilitar la formación de la película, por las diferentes técnicas, como por ejemplo Spin-Coating o cualquiera de tipo impresión tipo *roll to roll*, doctor Blade, etc.

La función del donador de electrones es el de absorber la mayor cantidad posible de radiación proveniente del Sol, en esta etapa los electrones son excitados; sin embargo, la conversión de luz solar en corriente eléctrica necesita de un paso adicional, la transferencia de estos electrones hacía el electrodo respectivo, para lo cual es necesario hacer uso de un material aceptor de electrones que evite las pérdidas en procesos radioactivos, es decir que evite la recombinación del excitón.

1.5.2 Estructura química de los polímeros PEDOT y PSS

El compuesto polimérico PEDOT:PSS, poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli(estirenosulfonato) PEDOT:PSS, se considera como uno de los materiales electrónicos más importantes tecnológicamente debido a su alta conductividad electrónica de más de 1000 S/cm a temperatura ambiente que equivalen a $100 \Omega/\square$. El PEDOT puede interactuar entre sí a través de las interacciones orbitales π entre las cadenas de politiofeno incluso en la partícula enredada. (Takano, et al., 2012).

Una de las desventajas que presenta el PEDOT es su insolubilidad en distintos solventes, lo que limita su rango de aplicaciones. Esto se solucionó cuando se le

añadió a la mezcla un compuesto policatiónico conocido como ácido poliestiréno sulfónico, conocido comúnmente por sus abreviaturas como PSS, éste compuesto es soluble en agua y transparente, por lo que al dispersarlo durante la polimerización del PEDOT, se forma una polidispersión conocida como PEDOT:PSS (figura 17); este a diferencia del PEDOT es soluble en agua, sin embargo esto provoca una disminución de la conductividad (González González & López Sandoval, 2014). La dispersión del PEDOT:PSS en agua es importante para mejorar la alta conductividad y cristalización del polímero (Takano, et al., 2012).

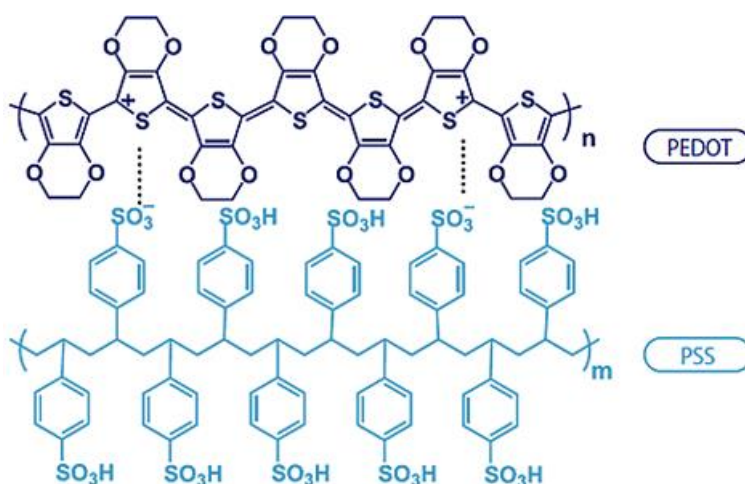


Figura 27 – Estructura química de la mezcla polimérica PEDOT:PSS (Suzhou Yacoo Science Co., 2018).

El PEDOT:PSS realmente no se disuelve en agua, sino que se forma una microdispersión de partículas de gel estable de color azul oscuro, es electroquímicamente estable en su forma dopada positiva y fácil de procesar (Ramírez Quiroz, 2011).

La conductividad en bulto del PEDOT:PSS está definida por las propiedades de transporte de carga a través de la cadena polimérica, de una cadena a otra y a través de los límites de dominio. Existe una fuerte dependencia entre la conductividad, aportada por el PEDOT, y la morfología o distribución de la cadena polimérica del PSS dentro de la película (Ramírez Quiroz, 2011).

1.5.3 –Propiedades generales del PEDOT:PSS

El PEDOT:PSS es una mezcla de los polímeros poli(3,4-etilendioxitiofeno) o PEDOT, el cual es un polication y el poli(estirenosulfonato) o PSS que es un polianion (Barbosa García, et al., 2012). El PEDOT:PSS presenta una alta conductividad eléctrica arriba de los 1000 S/cm a temperatura ambiente (Takano, et al., 2012) y 5eV de su banda prohibida de energía (Gutiérrez, 2016). Este polímero conductor se emplea particularmente en las celdas OPVs para mejorar la colección de huecos (cargas positivas) en el ánodo, lo cual lo hace un polímero de conductividad del tipo p.

El PEDOT:PSS se usa ampliamente en varios dispositivos optoelectrónicos orgánicos, ya que su alta conductividad eléctrica y la buena resistencia a la oxidación lo hacen adecuado para la aplicación en OPVs (Bednarski, et al., 2016). Por otra parte, se ha reportado que la película polimérica poseía una alta transparencia en todo el espectro de luz visible e incluso en regiones cercanas a IR y UV, prácticamente una absorción del 100% en las longitudes de onda 900-2,000 nm y sin absorción máxima en el rango de 400-800 nm (Stöcker, et al., 2012).

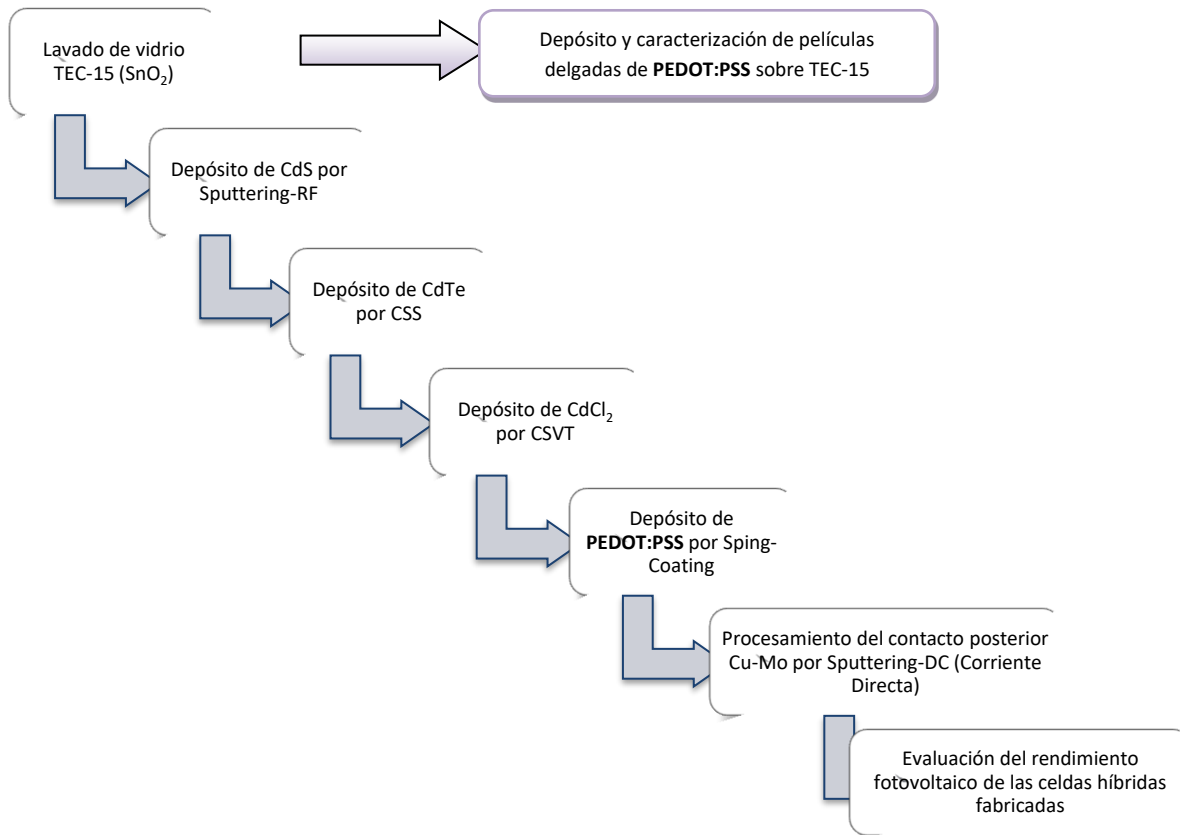
El sistema PEDOT:PSS también presenta una alta estabilidad térmica, o sea que tiene la capacidad de resistir altas temperaturas (≈ 100 °C) por largos periodos de tiempo (≈ 1000 h) sin tener cambios notables en su conductividad eléctrica o transparencia óptica. (Ramírez Quiroz, 2011).

Las partículas del PEDOT:PSS tienen alrededor de 90 % a 95 % de agua y tienen excelentes propiedades para la formación de películas, aparte de ser fáciles de procesar para la obtención de recubrimientos delgados sobre una variedad de sustratos (Elschner, et al., 2010).

Capítulo 2 - Metodología

2.1 Fabricación de celdas solares híbridas

Diagrama del proceso de fabricación de celdas solares híbridas y del procesamiento del PEDOT:PSS para su posterior caracterización



2.1.1 Lavado de vidrio TEC-15

El lavado del sustrato es una parte importante en el proceso de fabricación, ya que éste será la base de toda nuestra celda, en donde principalmente se usan los siguientes materiales:

- Detergente alcalino concentrado – Se colocan 10 ml de jabón en 15 ml de agua destilada, con esta mezcla y con ayuda de una gasa se talla cada vidrio durante 1 min. por ambos lados.

- Agua destilada – Los vidrios se enjuagan con agua destilada a temperaturas por arriba de los 80°C y menor a los 160°C, se mantienen a esas temperaturas alrededor de 10 min. Posteriormente se colocan en un baño ultrasónico con cronómetro (CPN-952-516 Branson) durante 10 min.
- Acetona – Después de retirar el agua destilada, los vidrios se sumergen en acetona y ésta se calienta a 60°C durante 10 min. Posteriormente se colocan en baño ultrasónico durante 10 min.
- Alcohol isopropílico – Se sigue el mismo procedimiento que el de la acetona, sólo que la temperatura en la que se calienta el alcohol es a 90°C.
- Nitrógeno – Finalmente los vidrios se secan con nitrógeno (99.99% de pureza) y están listos para su primer depósito, como se muestra en la figura 28.



Figura 28 – Esquema de un vidrio conductor TEC-15 limpio.

2.1.2 Caracterización de películas de PEDOT:PSS sobre vidrio TEC-15

El sustrato que usualmente se usa para el análisis del espesor del polímero PEDOT:PSS es el vidrio con una película delgada de óxido de Indio Estaño (ITO por sus siglas en inglés), el espesor del ITO, es de aproximadamente 50 nm cuando es depositado por Spin-Coating a 5000 rpm durante 30 s como se muestra en la figura 29.

En este trabajo se utilizó un sustrato a un vidrio recubierto con una película delgada de dopado con flúor (FTO), específicamente se utilizó el Tec-15 mca. Pilkington. Se utilizó dicho sustrato debido a que es el mismo que se utilizará para la fabricación de la celda solar a base de CdTe.

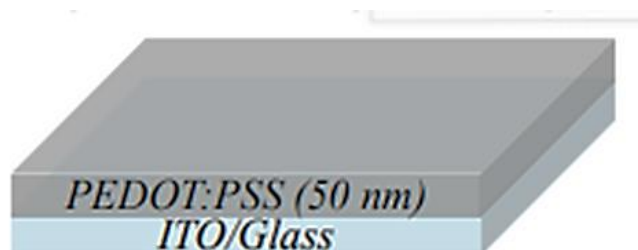


Figura 29 – Espesor de PEDOT:PSS sobre ITO (Gutiérrez, 2016).

2.1.2.1 Espesor y tratamiento térmico

El valor de rapidez de rotación utilizado durante el depósito del PEDOT:PSS fue variado en el objetivo observar si éstas repercutía en gran medida del espesor de la película polimérica obtenida, las revoluciones empleadas fueron a 2000, 4000, 5000 y 6000 rpm; después se sometieron a un tratamiento térmico de 80°C durante 30 min., en la siguiente tabla 2 se muestran los espesores de las películas delgadas poliméricas obtenidas antes y después del tratamiento térmico (mediante un perfilometría), se midieron cuatro puntos diferentes de cada muestra obtener un promedio del espesor de la misma.

Los promedios determinados de las películas delgadas poliméricas procesadas se encuentran entre los 15 a 30 nm aproximadamente y se puede observar que los espesores determinados varían aleatoriamente en función de la rapidez de rotación utilizada durante el procesamiento, al igual que después del tratamiento térmico.

Tabla 2 – Espesores de PEDOT:PSS depositado por sping-coating sobre vidrio TEC-15

| | PEDOT:PSS sin TT | | | | PEDOT:PSS + TT | | | |
|---------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| Rapidez de rotación (RPM) | 2000 | 4000 | 5000 | 6000 | 2000 | 4000 | 5000 | 6000 |
| Espesor (nm) | 63 | 34 | 30 | 13 | 34 | 15 | 21 | 9 |
| | 35 | 27 | 17 | 28 | 27 | 15 | 18 | 10 |
| | 23 | 18 | 12 | 16 | 7 | 29 | 12 | 18 |
| | 11 | 19 | 13 | 25 | 16 | 15 | 24 | 11 |
| Promedio (nm) | 33 | 25 | 18 | 21 | 21 | 19 | 19 | 12 |

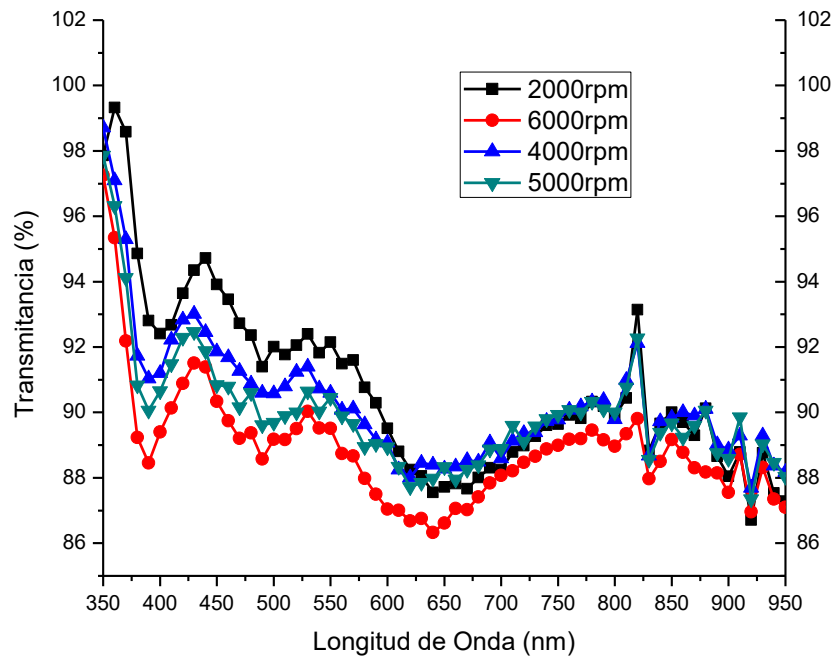
2.1.2.2 Transmitancia y Absorbancia del PEDOT:PSS

La transmitancia y la absorbancia son parámetros importantes para caracterizar las películas delgadas procesadas en este trabajo, ya que son algunas de las propiedades ópticas que presentan los materiales y en base a los valores obtenidos de estas, podemos decidir la configuración más adecuada que debería tener la celda solar fotovoltaica fabricada con estos materiales.

La Transmitancia (T): Es la razón entre la luz monocromática transmitida por una muestra y la energía o luz incidente sobre ella. Tanto la energía radiante incidente como la transmitida deben ser medidas a la misma longitud de onda. La Transmitancia se puede expresar como un porcentaje (%). En otras palabras, la Transmitancia nos permite conocer el porcentaje de la luz incidente que una muestra permite que sea transmitida a través de ella.

En el caso del PEDOT:PSS, al ser un material prácticamente transparente en el rango de la longitud de onda de nuestro interés y con un adecuado espesor, la (T) es muy alta casi en todas las longitudes de onda del UV-Vis, lo cual nos permite medir realizar un análisis en el sistema QE/IPCE para medición de Respuesta Espectral certificado. Se realizaron cuatro mediciones de (T) a diferentes muestras

de PEDOT:PSS, donde se observa que todas las muestras presentan un %T por arriba del 86%, como se puede observar en la gráfica 3.



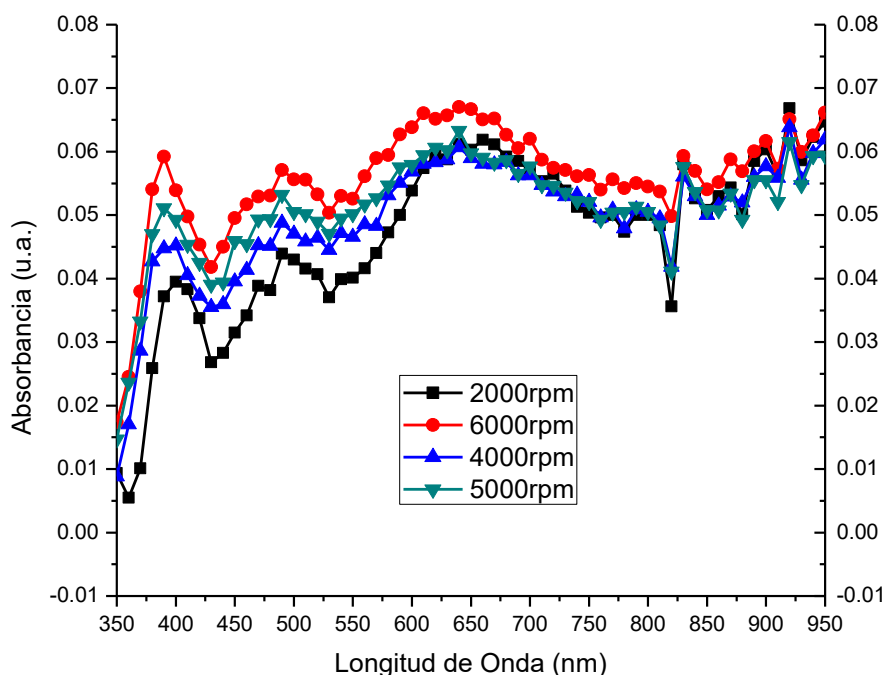
Gráfica 3 – %T de la capa de PEDOT:PSS a diferente velocidad de rotación (2000, 4000, 5000 y 6000) después del TT.

Por otra parte, cabe mencionar que cada material polimérico tiene su espectro de absorción característico, el material absorbe en cada longitud de onda del espectro electromagnético, de manera característica para cada longitud de onda, lo que hace que cada compuesto presente formas de curvas muy particulares en su espectro de absorción.

La absorbancia (A): Se define como la cantidad de energía radiante absorbida por una sustancia pura o en solución. La expresión matemática de la absorbancia depende del logaritmo negativo de la transmitancia (T).

El PEDOT:PSS al ser un material con un alto porcentaje de transmitancia esto implica que tenga muy poca absorbancia como se muestra en la siguiente gráfica 4, donde se observa absorbancia del material alrededor de los 600-700 nm

inversamente en la gráfica de la transmitancia donde se observa que hay menor (%T).



Gráfica 4 – Espectro de la absorbancia de PEDOT:PSS a diferentes velocidades de rotación (2000, 4000, 5000 y 6000) después del TT.

Como se observa tanto en la gráfica 3 y 4 no hay variación de los espectros de (T) y (A) con respecto a la variación de la rapidez de rotación. En estas mediciones no se incluyeron las muestras de 3000, 4500 y 5500 rpm, ya que, como se observa en la tabla 2 los espesores son muy similares en las otras rpm y consideramos que los espectros serían muy similares. Por otra parte, los valores de (T) y (A) en las gráficas anteriores en la región de longitud de onda corta entran en los errores experimentales del equipo.

2.1.3 Depósito de ZnO y CdS por Sputtering-RF

El depósito de la película delgada de ZnO se llevó a cabo en un sistema “Sputtering-RF” el cual está basado en la erosión catódica magnetoplanar; ésta consiste en que

se evapore un metal que se conoce como “blanco”, el cual se encuentra en forma de oblea y para este trabajo fue de 99.999% de pureza de la marca kurt lesker. Este proceso necesita de mucha energía para lograr que los átomos del metal se desprendan, la energía necesaria se obtiene ionizando un gas (Ar en nuestro caso) al interior de la cámara de alto vacío del sistema y aplicándole un voltaje muy alto (kV), esto permite la ionización del gas y la generación de la energía que necesitamos para desprender el material, también le conoce como plasma (Rodríguez Albarrán, 2014). La fuente que alimenta este sistema es de radiofrecuencia (13.56 MHz), esto permite que sea un sistema conveniente para las películas delgadas de semiconductores, ya que éstos no se ionizan permitiendo el depósito de materiales altamente resistivos y no pierden sus propiedades semiconductoras. En la figura 30 se puede observar el depósito por erosión catódica magnetoplanar.

La película delgada de ZnO tiene las características de ser altamente transparente a la radiación incidente, altamente conductora y altamente resistiva; lo cual nos permite que sea utilizada como parte de óxido conductor transparente (TCO) que en este caso es el TEC-15. Por lo tanto, la película delgada de ZnO también actúa como contacto eléctrico superior de la celda solar a base de CdTe.

En este trabajo se hicieron diferentes series de depósito donde los espesores de este material (ZnO) son de 58 a 70 nm de acuerdo en el sensor de cuarzo dentro del sistema.

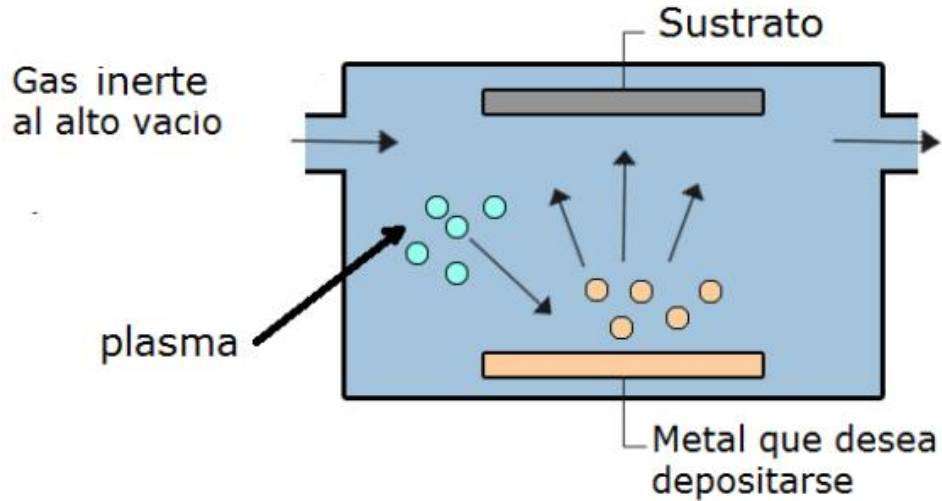


Figura 30 – Esquema de un sistema de Sputtering-RF.

El depósito de CdS se realizó con el mismo sistema experimental de Sputtering-RF y el mismo proceso, este se coloca enseguida de la película de ZnO sin necesidad de abrir el sistema o sacar los sustratos y los espesores fueron de 68 a 75nm según el sensor dentro del sistema.

La función que cumple la película delgada de CdS en la celda solar a base de CdTe será la de capa buffer, ya que cumple con las características de ser altamente transparente a la radiación incidente y presenta un valor de su ancho de banda prohibida (E_g) aproximadamente 2.42, lo cual nos permitirá ampliar la respuesta fotovoltaica en longitudes de onda cortas.

Las condiciones aproximadas que se emplearon en los depósitos fueron: $T=250^{\circ}\text{C}$ y $P=10$ mTorr; $T=225^{\circ}\text{C}$ y $P=15$ mTorr para el ZnO y el CdS respectivamente. En la tabla 3 se muestran espesores sensados de cada uno de los materiales depositados en las tres series de celdas que fueron usadas para este trabajo, las cuales están separadas por colores. En la figura 31 se puede observar un sustrato después de los depósitos de ZnO y CdS.

Tabla 3 – Espesores determinados experimentalmente durante los depósitos de ZnO y CdS.

| | Muestra | ZnO | CdS |
|----------------|---------|--------------|--------------|
| | | Espesor (nm) | Espesor (nm) |
| Serie 1 | CS135 | 70 | 71 |
| Serie 2 | CS185 | 50 | 68 |
| | CS189 | 50 | 68 |
| | CS190 | 50 | 68 |
| | CS192 | 50 | 68 |
| Serie 3 | CS197 | 58 | 75 |
| | CS200 | 58 | 75 |
| | CS202 | 58 | 75 |
| | CS205 | 58 | 75 |

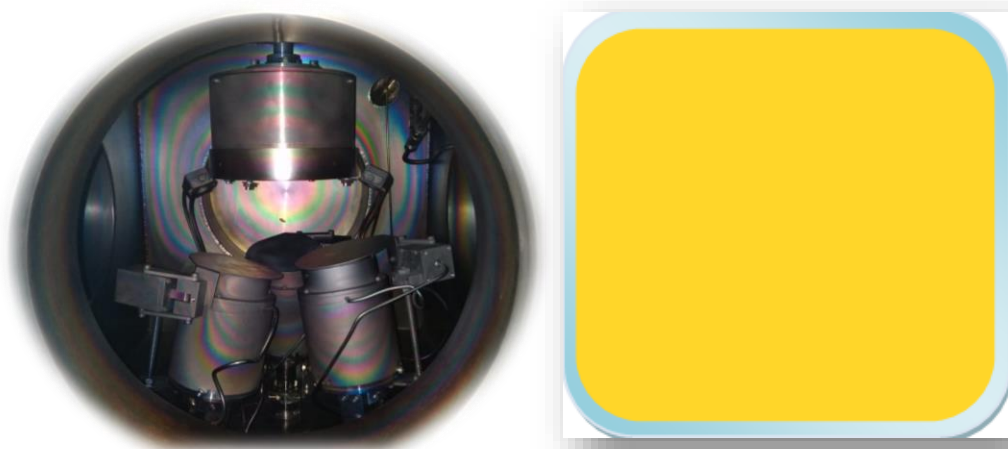


Figura 31 - Izquierda: imagen del arreglo interior de magnetrones del sistema experimental de Sputtering-RF de la UACM, plantel San Lorenzo Tezonco. Derecha: muestra de ZnO/CdS sobre Tec-15.

2.1.4 Depósito de CdTe por CSS

La película delgada de CdTe fue procesada en un sistema de sublimación de espacio cercano (CSS por sus siglas en inglés) es un sistema experimental, donde se crea una atmosfera de la mezcla de gases (en este caso se utilizó O₂ y Ar) dentro de la cámara de alto vacío del sistema donde se encuentran el bloque sustrato

(vidrio/son:F/ZnO/CdS) y el bloque fuente que mediante la radiación proporcionada por lámparas infrarrojas permite realizar la evaporación del material como se muestra en la figura 32; tanto el bloque sustrato como el bloque fuente son de grafito de alta densidad y baja porosidad, y ambas contienen lámparas infrarrojas controladas externamente que permiten variar la intensidad de la radiación (Gómez, et al., 2013). En la figura 33 se observa como se ve la película de CdTe después del depósito. En la tabla 4 se muestran los parámetros experimentales de procesamiento que se usaron para los depósitos de las películas delgadas de CdTe, el espesor determinado y la apariencia morfológica observada mediante perfilometría.

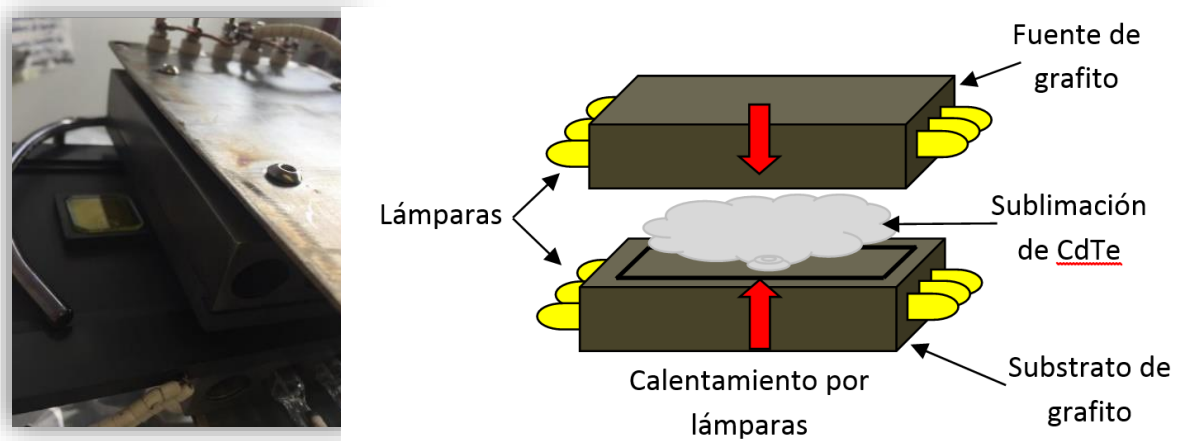


Figura 32 – Derecha: Imagen del calefactor del sistema experimental CSS utilizado. Izquierda: Esquema del calefactor de un sistema CSS por calentamiento de lámparas infrarrojas.



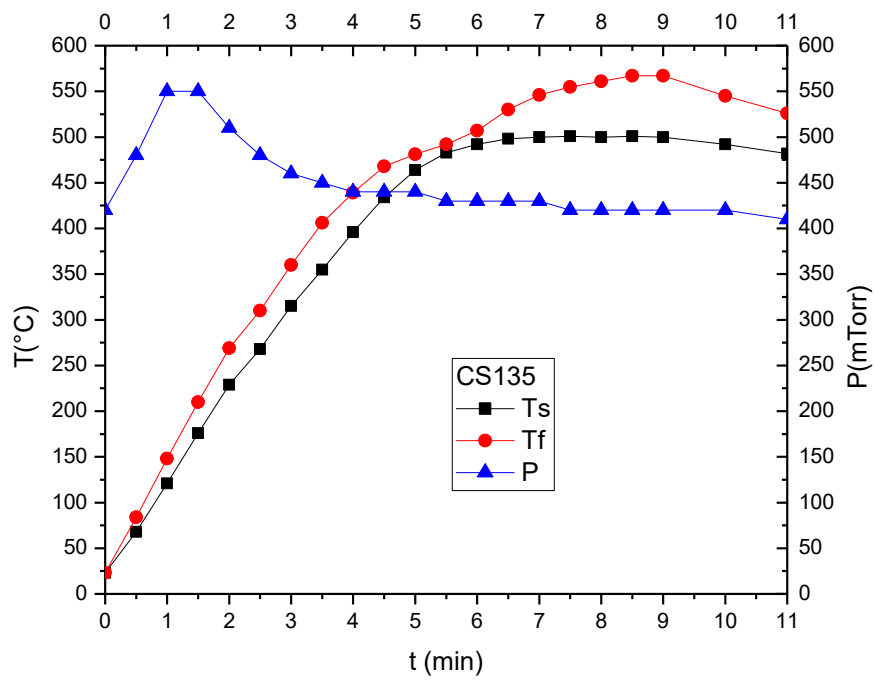
Figura 33 – Muestra de ZnO/CdS + CdTe sobre Tec-15.

Tabla 4 - Parámetros de las temperaturas empleadas en los depósitos de CdTe, espesor y morfología.

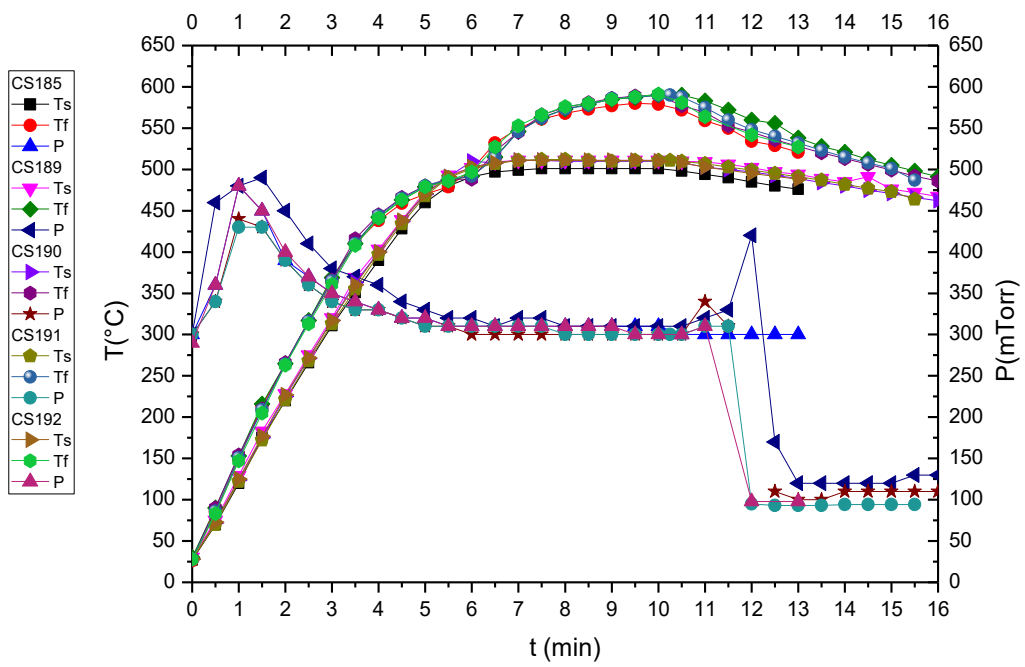
| | Muestra | CdTe | | | |
|----------------|---------|---------------------|---------------------|--------------------------|----------------------|
| | | Temperatura | | Espesor(μm) | Morfología observada |
| | | T _F (°C) | T _S (°C) | | |
| Serie 1 | CS135 | 570 | 500 | 3.0 | Poco granular |
| Serie 2 | CS185 | 580 | 500 | 5.0 | Semi granular |
| | CS189 | 590 | 510 | 7.0 | Granular |
| | CS190 | 590 | 510 | 6.0 | Semi granular |
| | CS192 | 590 | 510 | 6.0 | Poco granular |
| Serie 3 | CS197 | 580 | 500 | 5.0 | Poco granular |
| | CS200 | 580 | 500 | 5.0 | Semi granular |
| | CS202 | 580 | 500 | 4.5 | Semi granular |
| | CS205 | 580 | 500 | 4.0 | Poco granular |

Los valores de los espesores nos permiten observar que el proceso experimental varía en función de las temperaturas utilizadas lográndose en algunos experimentos que fueran reproducible el espesor obtenido, esto se puede ver para el caso de las muestras CS185, CS197, CS200 y CS202, aunque fueron procesadas en distintas series. También se puede observar que el espesor se incrementaba al aumentar la temperatura de fuente y sustrato a pesar de que el gradiente se mantuvo constante, como es el caso de las celdas CS189, CS190 y CS192.

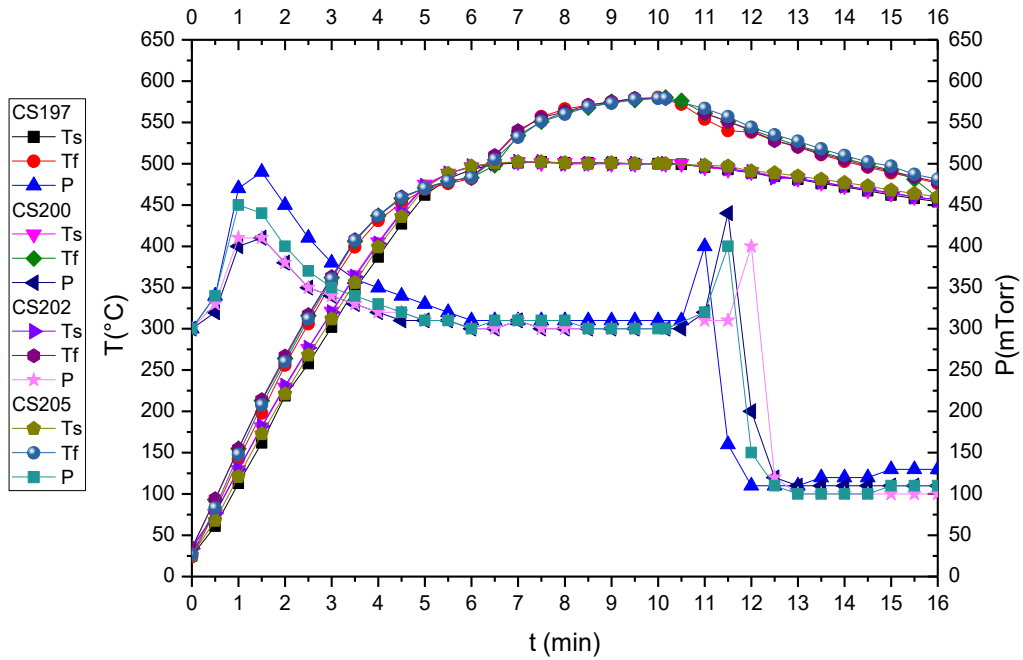
Para analizar las películas delgadas de CdTe es importante observar las curvas de calentamiento y de presión durante el depósito en el sistema CSS. Al igual que el espesor, la variación de las curvas son una herramienta fundamental para monitorear la estabilidad durante el procesamiento del sistema experimental. En la gráfica 5, 6 y 7 se muestran las curvas de calentamiento de las celdas que se usaron para este trabajo, y en la gráfica 8 se muestran todas las curvas de calentamiento empleadas para comprar la estabilidad del sistema.



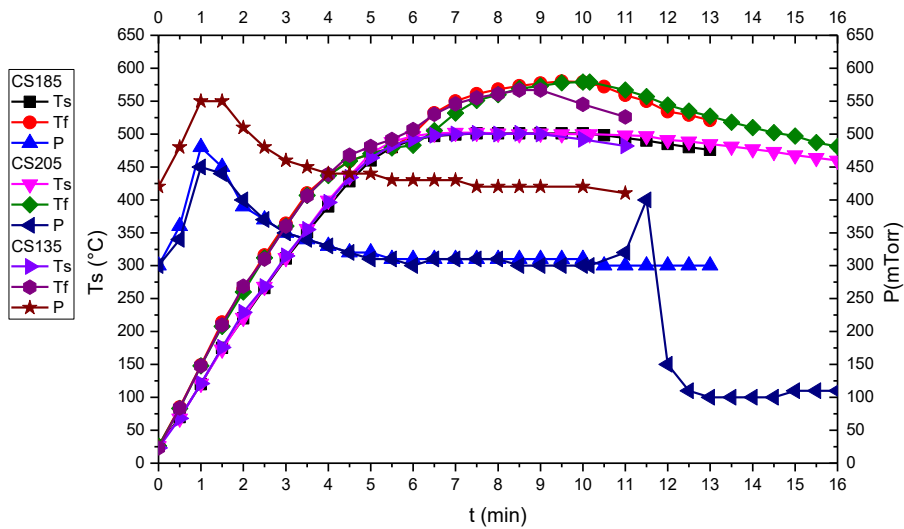
Gráfica 5 – Curvas de calentamiento y de la variación de la presión de la celda CS135 en la serie 1 procesada mediante CSS.



Gráfica 6 – Curvas de calentamiento y de la variación de la presión de las muestras de la serie 2 procesadas mediante CSS.



Gráfica 7 – Curvas de calentamiento y de la variación de la presión de las muestras de la serie 3 procesadas mediante CSS.



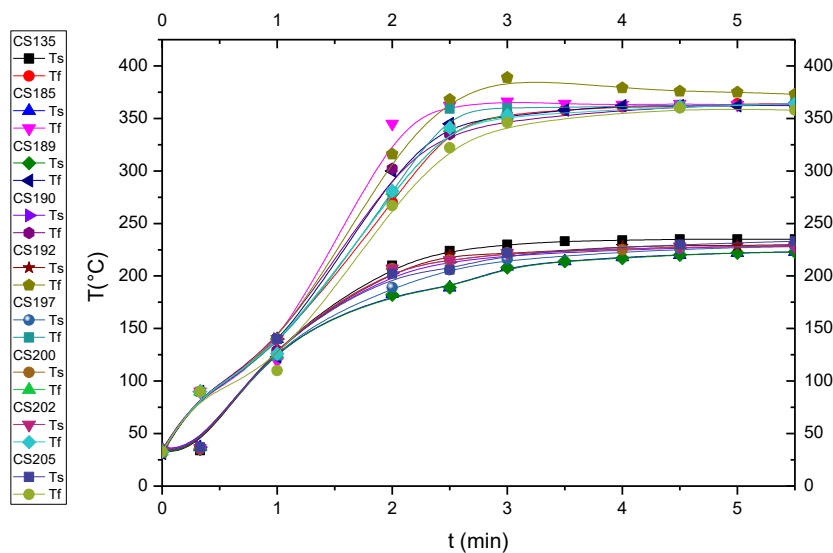
Gráfica 8 – Curvas de calentamiento de las celdas CS185, CS205 y CS135, donde se observa que la temperatura del sustrato y la de fuente tienen un comportamiento similar, apesar de ser de tres series de celdas diferentes. La curva de la variación de la presión durante el procesamiento es la que presenta diferencias notorias para las tres muestras representativas de cada serie.

2.1.5 Depósito de CdCl₂ por CSVT

El Cloruro de Cadmio se depositó en un Sistema de Transporte de Vapor en Espacios Cerrados (CSVT por sus siglas en inglés); este proceso más que generar una película delgada, es tratamiento térmico que se realiza al CdTe para lograr oxidarlo y aumentar el tamaño de grano como ya se había mencionado anteriormente.

La técnica de CSVT es prácticamente la misma que se usa en el CSS, ya que también cuenta con dos fuentes con lámparas infrarrojas y necesita la intercesión de gases de arrastre durante el depósito. La diferencia principal entre CSS y CSVT es la configuración de sistema sustrato fuente y la utilidad de los gases interiores, en el CSS sólo es una atmosfera inerte y en el CSVT es un gas de transporte. En la gráfica 9 se observan las curvas de calentamiento en la serie de celdas utilizadas.

Después del depósito de una película delgada de CdCl₂ en el CSVT se le hace un tratamiento térmico (TT) a 400°C durante 30 min., con la intención de evaporar el Cl y oxidar la película delgada de CdTe. Este proceso finaliza con una limpieza superficial para retirar el exceso de Cd y de impurezas que se encuentren en la película de CdTe, esta limpieza se realiza con agua desionizada como se muestra en la figura 34.



Gráfica 9 – Curvas de calentamiento de todas las muestras en el sistema CSVT.



Figura 34 – Limpieza superficial del CdCl_2 sobre el CdTe después del TT en mufla.

2.1.6 Elaboración de la película de PEDOT:PSS por Spin-Coating

Los depósitos del polímero PEDOT:PSS mca. Hereaus, con una conductividad reportada por el fabricante de 1000 S/cm ($100 \Omega/\square$) se hicieron a través de un spin-coating modelo WS-650 (figura 35). La técnica de depósito por spin-coating es un proceso utilizado para obtener películas delgadas uniformes sobre sustratos planos. El proceso típico implica depositar una pequeña cantidad de material (en estado líquido) en el centro de un sustrato y luego hacerlo girar a altas velocidades como se muestra en la figura 36 (Tyona, 2013).



Figura 35 – Izquierda: Spin-Coating modelo WS-650 para películas delgadas. Derecha: Depósito de película delgada de PEDOT:PSS sobre CdTe.

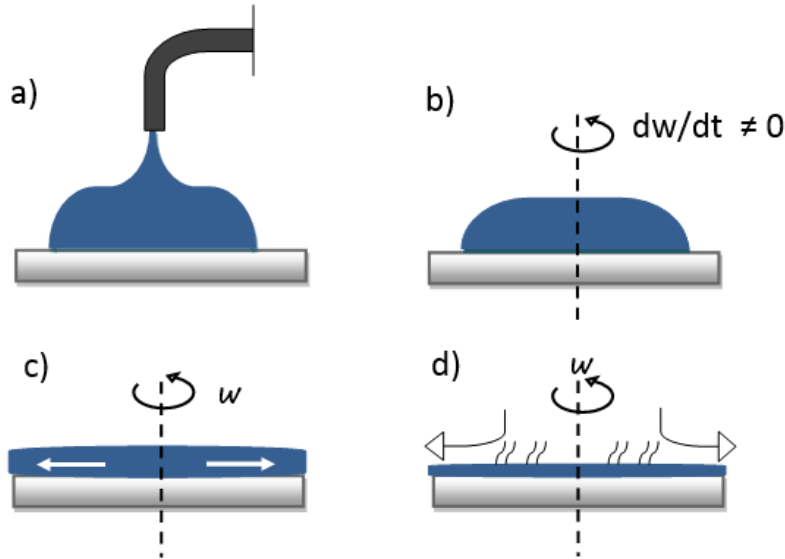


Figura 36 – Fases de depósitos por la técnica de Spin-Coating.
 a) Se agrega el material en el centro del sustrato.
 b) La aceleración centrífuga distribuye el material por el sustrato.
 c) La velocidad angular se mantiene constante y la el material se expande hacia los bordes.
 d) Los disolventes orgánicos se evaporan permitiendo que sólo quede el material de interés.

El espesor final de la película y otras propiedades dependerán de la naturaleza del material (viscosidad, velocidad de secado, porcentaje de sólidos, tensión superficial, etc.) y los parámetros elegidos para el proceso de centrifugado (Tyona, 2013).

Después de colocar el PEDO:PSS sobre la película de CdTe, en cada uno de las series llevadas a cabo con anterioridad, se someten a un tratamiento térmico (TT) durante 30 min. Dentro de una mufia se colocan todas las celdas de la misma serie en el TT, la temperatura que se buscó mantener estable durante el TT fue entre 80 a 90 °C, como se observa en la tabla 5.

Tabla 5 – Parámetros durante los depósitos de PEDOT:PSS

| | Celda | PEDOT:PSS | | |
|----------------|-------|---------------|------|---------------|
| | | Cantidad (μl) | rpm | TT (30min) °C |
| Serie 1 | CS135 | 250 | 5000 | 75 |
| Serie 2 | CS185 | 250 | 5000 | 88 |
| | CS189 | 350 | 3000 | 87 |
| | CS190 | 350 | 4000 | 87 |
| | CS192 | 350 | 6000 | 87 |
| Serie 3 | CS197 | 350 | 4500 | 89 |
| | CS200 | 350 | 5500 | 89 |
| | CS202 | 350 | 6000 | 89 |
| | CS205 | 350 | 5000 | 89 |

En la figura 37 se observan todas las celdas después de depositarles el PEDOT:PSS, donde se puede ver que la dispersión del material polimérico aparente fue mejor al aumentar las rpm del depósito.

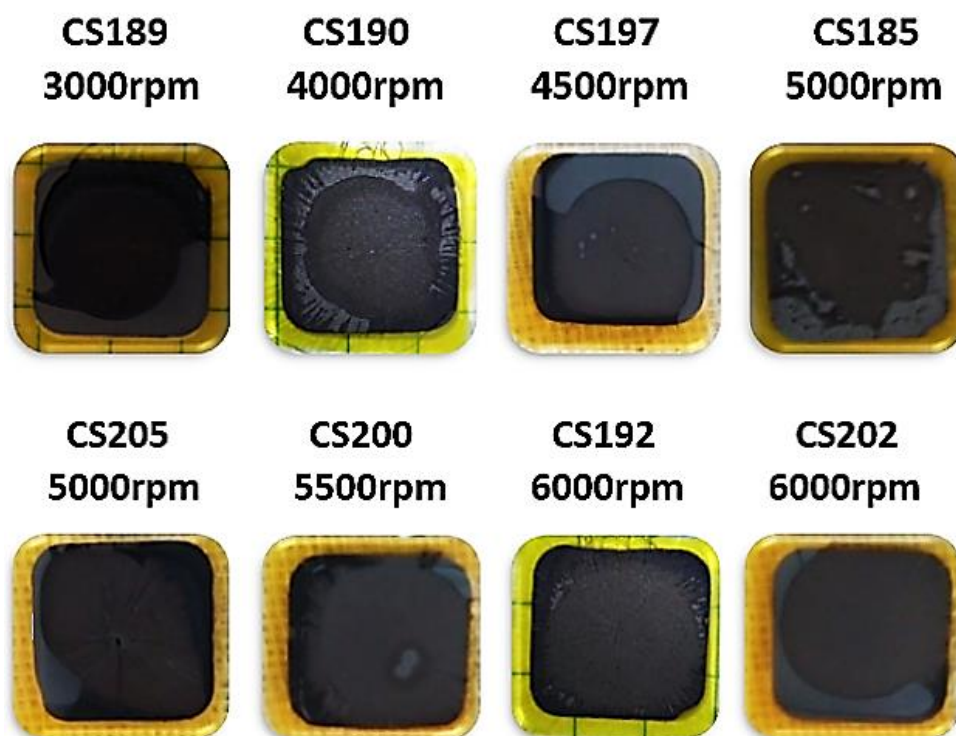


Figura 37 – Depositos obtenidos (sobre la película de CdTe) del polímero PEDOT:PSS a diferente velocidad de rotación.

3.2.5 Contactos posteriores de Cu-Mo por Sputtering-DC

El depósito de los contactos de Cu-Mo se realizó con un sistema similar al Sputtering-RF, el sistema cuenta con el mismo principio de erosión catódica magnetoplana, la cual como se mencionó con anterioridad necesita de mucha energía para poder evaporar un metal y que este sea depositado; esta energía se obtiene ionizando una atmosfera de un gas inerte (Ar en nuestro caso) y aplicando un voltaje alto (kV) donde la fuente es de corriente directa (DC), a diferencia del sistema “RF”. Este tipo de sistemas es usado para cierto tipo de metales como lo es en este caso con el Cu-Mo. En la tabla 6 y en la figura 38, se observan los espesores que se utilizaron en los depósitos de Cu-Mo de las series elegidas para este trabajo.

Tabla 6 – Espesores obtenidos después de los depósitos de Cu-Mo

| | Celda | CuMo | |
|----------------|-------|--------------------------|--------------|
| | | Cu | Mo |
| | | Espesor (nm) | Espesor (nm) |
| Serie 1 | CS135 | 7.5 | 280.8 |
| Serie 2 | CS185 | 7.5 | 250.0 |
| | CS189 | 15.0 | 320.0 |
| | CS190 | 15.0 | 320.0 |
| | CS192 | 15.0 | 320.0 |
| Serie 3 | CS197 | 16.0 | 295.0 |
| | CS200 | 16.0 | 295.0 |
| | CS202 | 16.0 </td <td>295.0</td> | 295.0 |
| | CS205 | 16.0 | 295.0 |

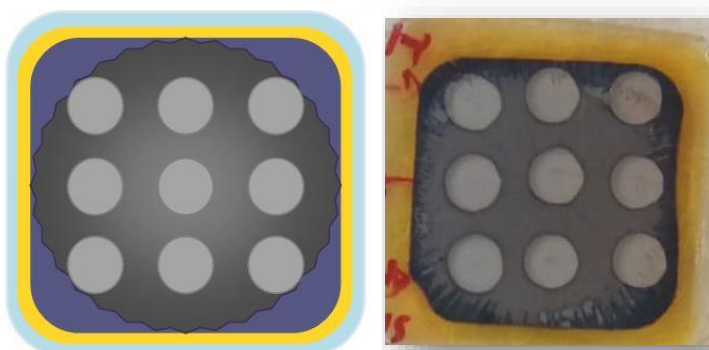


Figura 38 – Esquema de una celda solar hibrida con contactos de Cu-Mo y una imagen real de la celda solar finalizada.

2.2 Evaluación del rendimiento fotovoltaico de las celdas híbridas fabricadas

Como se mencionó anteriormente se realizaron tres series de celdas solares con nueve muestras cada una, de las cuales algunas fueron seleccionadas para depositarles PEDOT:PSS a diferente velocidad de rotación y otras fueron utilizadas para otros procesos experimentales dentro del laboratorio. De la primera serie se utilizó sólo una muestra que fue la CS135, de la segunda se utilizaron cuatro muestras que son la CS185, CS189, CS190 y CS192. De la tercera serie también se utilizaron cuatro muestras que son la CS197, CS200, CS202 y CS205. Estas celdas híbridas fueron comparadas con una celda base de nombre CS48, la cual no contiene PEDOT:PSS es su arquitectura.

Para caracterizar cada una de nuestras celdas solares híbridas se obtuvieron sus curvas I vs V, fue determinada eficiencia cuántica de cada celda y una tabla de los parámetros eléctricos de las celdas. Cada una de estos datos fueron comparados con la celda base (CS48).

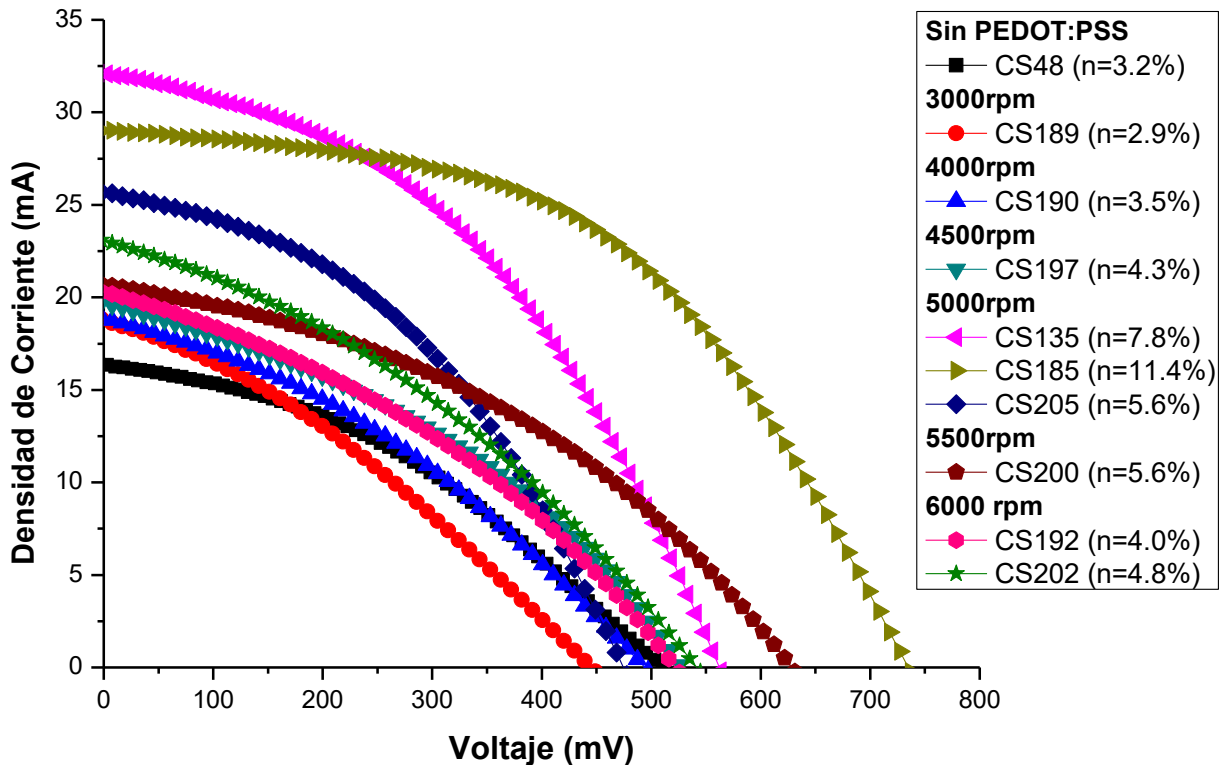
2.2.1 Curva I vs V

Para obtener las curvas I vs V se utilizó un simulador solar certificado Oriel Clase AAA, el cual nos permite determinar los valores eléctricos de salida en los contactos de una celda (V_{oc} , I_{sc} , J_{sc} , I_{max} , V_{max} , P_{max} , FF y eficiencia de conversión). En este caso, cada una de nuestras celdas tiene 9 subceldas con un área de 0.08 cm^2 . En la tabla 7 se observan los parámetros eléctricos más importantes de las subceldas de cada celda solar. Recordando que la celda CS48 no contiene PEDOT:PSS.

Tabla 7 – Parámetros eléctricos característicos de celdas solares fabricadas, respecto a la velocidad de rotación utilizadas durante el depósito de PEDOT:PSS

| Velocidad de rotación (RPM) | Celda | V_{oc} | J_{sc} | FF | Eficiencia |
|-----------------------------|-------|----------|-----------------------|------|------------|
| | | (mV) | (mA/cm ²) | | (%) |
| 0 | CS48 | 487 | 16.3 | 35.7 | 3.2 |
| 3000 | CS189 | 446 | 18.7 | 32.3 | 2.9 |
| 4000 | CS190 | 494 | 18.9 | 34.8 | 3.5 |
| 4500 | CS197 | 526 | 19.7 | 37.5 | 4.3 |
| 5000 | CS135 | 562 | 32.1 | 50.3 | 7.8 |
| | CS185 | 734 | 29.0 | 43.9 | 11.4 |
| | CS205 | 474 | 25.6 | 42.1 | 5.6 |
| 5500 | CS200 | 627 | 20.7 | 39.5 | 5.6 |
| 6000 | CS192 | 521 | 20.3 | 35.7 | 4.0 |
| | CS202 | 541 | 23.0 | 35.0 | 4.8 |

Las curvas J vs V obtenidas se presentan a continuación en la gráfica 10, donde se observa una mejoría significativa en la I_{sc} de las celdas que contienen PEDOT:PSS, específicamente las que tuvieron un depósito a 5000 rpm (CS135, CS185 y CS205). Como se mencionó en el capítulo 1, si la I_{sc} aumenta, la J_{sc} también lo hará, este es un parámetro que ayuda a incrementar la eficiencia de conversión de la celda.



Gráfica 10 – Curvas J vs V de celdas solares fabricadas sin PEDOT:PSS y con PEDOT:PSS a diferente velocidad de rotación.

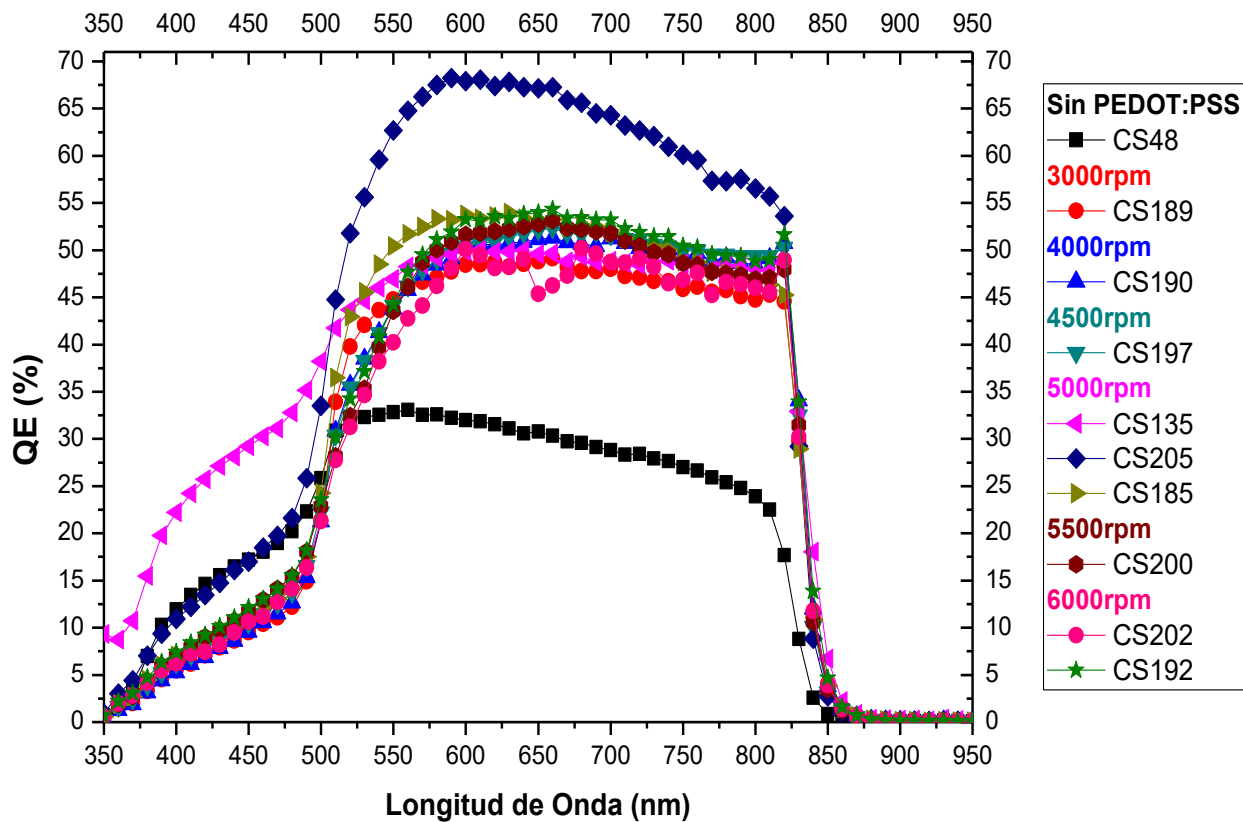
2.2.2 Eficiencia cuántica (QE)

Para obtener la gráfica de eficiencia cuántica se utilizó un sistema QE/IPCE para medición de Respuesta Espectral certificado, el cual nos permite conocer el porcentaje de fotones que se aprovechan para producir un par electrón-hueco a diferentes valores de longitudes de onda.

En la gráfica 11 se puede observar que la celda base (CS48) que no tiene PEDOT:PSS presenta una EQE entre 24 y 30% a comparación de las que tienen PEDOT:PSS que presentan una EQE entre 50 y 55%.

Además observamos que hay un desplazamiento en la región de la longitud de onda larga de alrededor de 25 nm; por lo que, la ventana de colección de los portadores

de carga es mayor para las muestras que tienen PEDOT:PSS que para aquella que no lo tiene.



Gráfica 11 – Eficiencia cuántica de celdas solares híbridas.

Capítulo 3 – Análisis de Resultados

Para analizar la morfología del PEDOT:PSS sobre el CdTe se utilizaron dos celdas con “pinholes”; una de estas celdas sin PEDOT:PSS y una con PEDOT:PSS a 5000rpm.

Las imágenes que nos arrojó el SEM, nos permiten observar que los “pinholes” que se presentan en una película delgada de CdTe pueden ser cubiertos por el polímero PEDOT:PSS. En la figura 39 se pueden apreciar las películas de CdTe, del lado izquierdo aparece el CdTe sin PEDOT:PSS, donde los “pinholes” están marcados con una coloración roja, la cual se obtuvo con la herramienta gráfica ImageJ. Al comparar los “pinholes” del lado derecho, estos no desaparecen, pero si se observan menos profundos debido al PEDOT:PSS sobre la película de CdTe, esto se puede observar en la figura 40 donde el área del PEDOT:PSS no cubre toda la superficie del CdTe y la ser iluminada esta celda, los “pinholes” que no son cubiertos por el PEDOT:PSS permiten pasar mayor cantidad de luz a comparación de los que están cubiertos por el polímero.

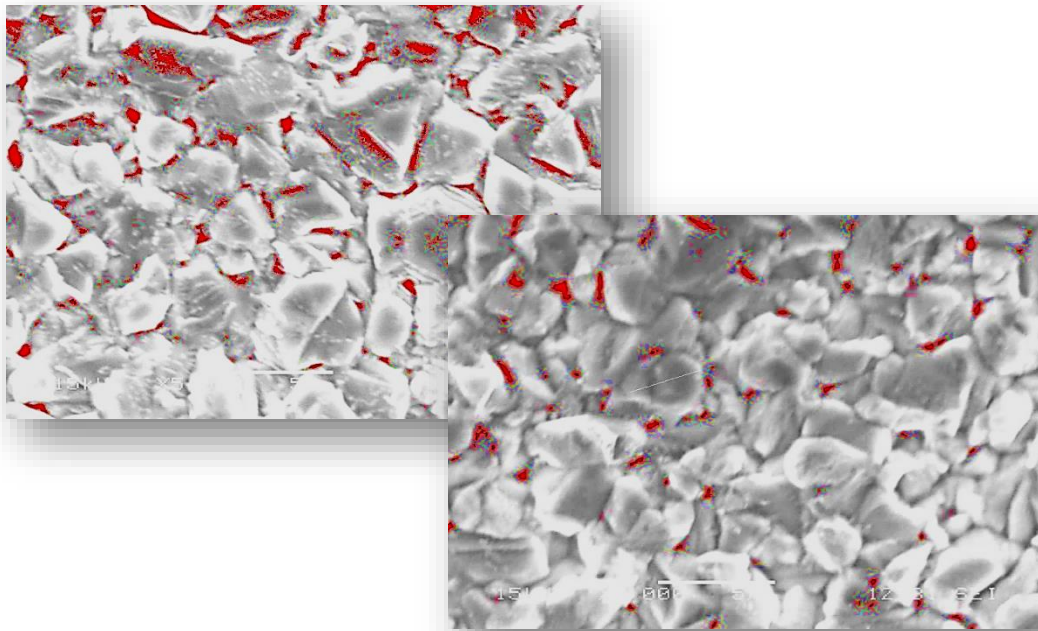


Figura 39 – Se utilizo un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) a 5000x para analizar las películas de CdTe con y sin PEDOT:PSS.

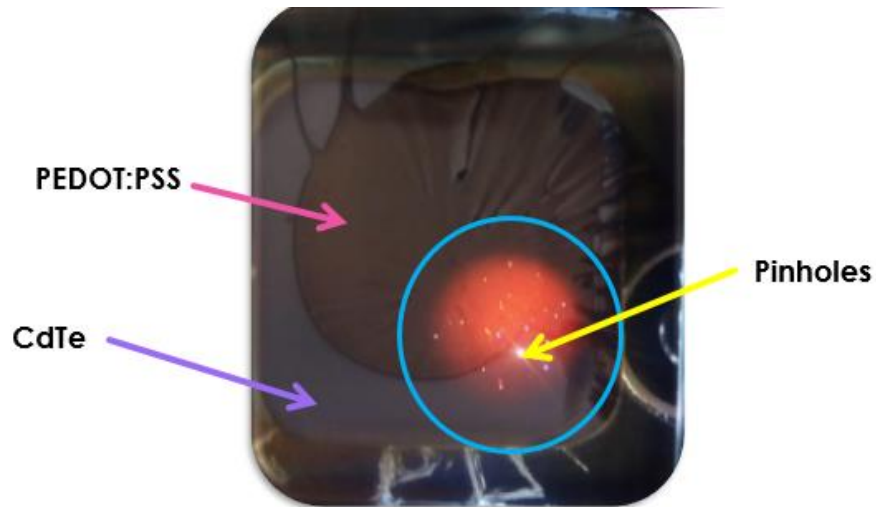
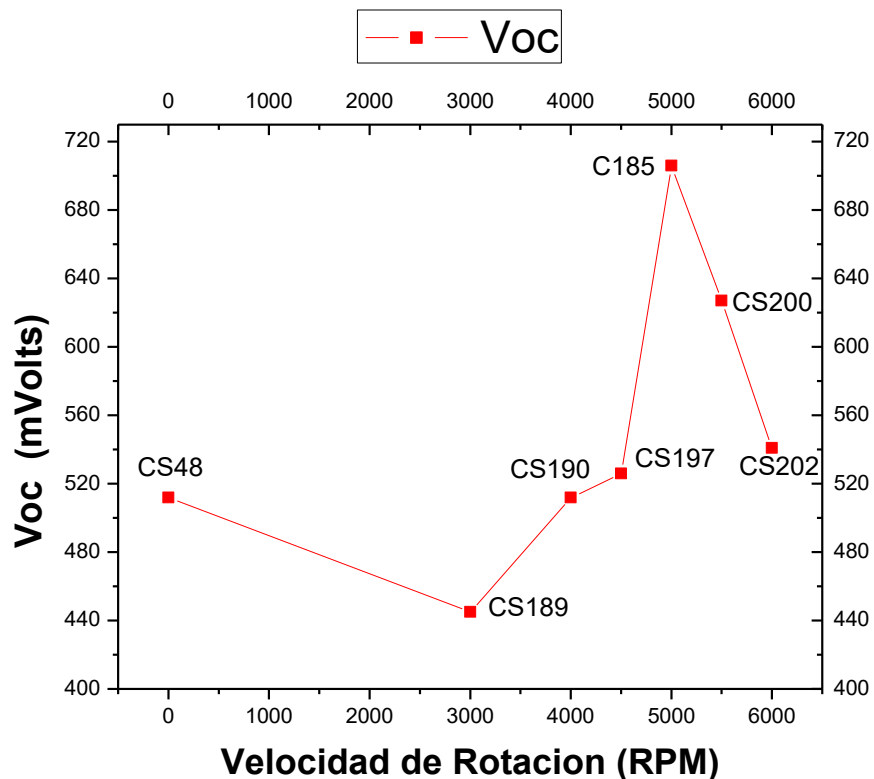


Figura 40 – Celda de CdTe con “pinholes” cubierta con PEDOT:PSS.

En este capítulo también se analizaron los parámetros eléctricos de salida más representativos de una celda solar (V_{oc} , J_{sc} , FF y eficiencia de conversión), para este análisis se elaboraron gráficas de dichos parámetros en función de los valores de la velocidad de rotación utilizados durante el procesamiento por Spin-Coating. Así mismo, a las gráficas se representan la posible tendencia entre la velocidad de rotación durante el depósito y su relación con los parámetros eléctricos más representativos de los dispositivos fotovoltaicos finalizados.

El primer parámetro que mencionaremos será el V_{oc} , su valor está fuertemente relacionado con la unión p-n, sin embargo, el PEDOT:PSS parece mejorar el voltaje como se puede observar en la gráfica 12; ya que este valor crece conforme la

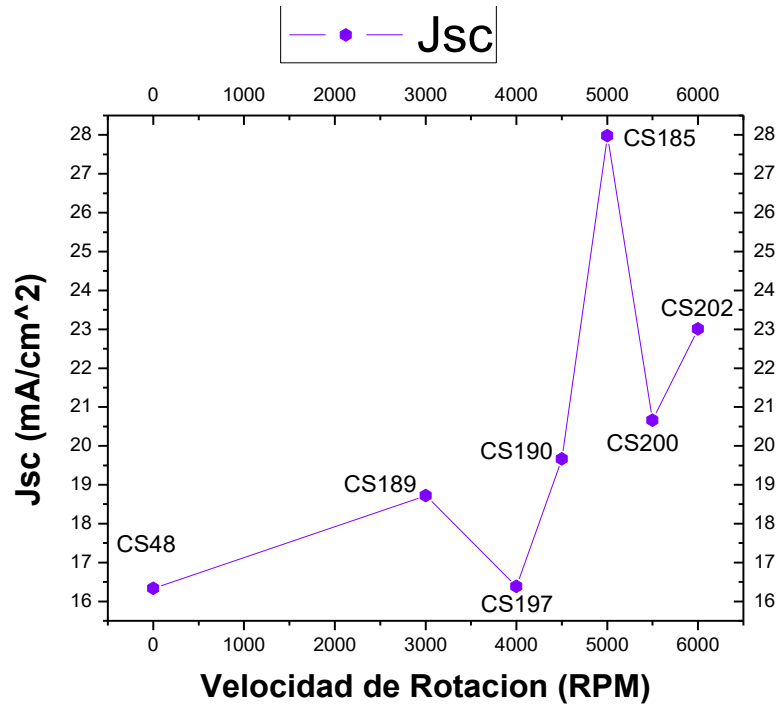
velocidad de rotación aumentan, obteniendo un valor máximo en las 5000 rpm y después comienza a disminuir.



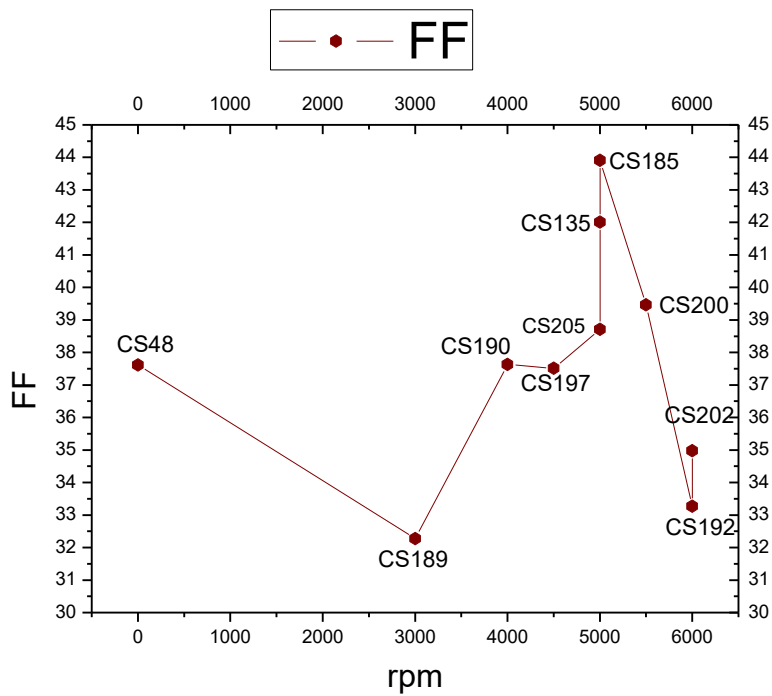
Gráfica 12 – Voltaje de circuito abierto (V_{oc}) respecto a la velocidad de rotación durante el rocesamiento.

Como se mencionó anteriormente el PEDOT:PSS tiene la capacidad de recolectar portadores de carga (huecos) y evita que estos se vuelvan a recombinar, esto provoca que la I_{sc} sea beneficiada en gran medida, por lo tanto la J_{sc} se observa un mayor incremento en este parámetro fotovoltaico con respecto al V_{oc} .

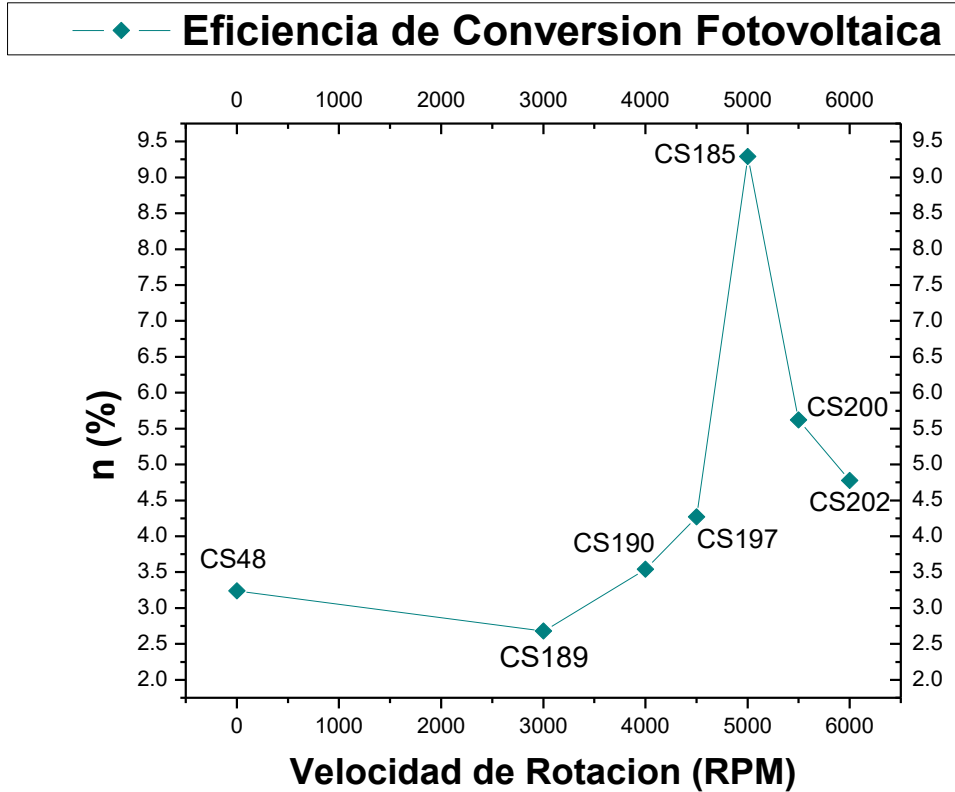
En la gráfica 13 se observa que la J_{sc} tiende a mejor valor cuando se deposita PEDOT:PSS sobre la película delgada de CdTe y presenta un incremento conforme aumentan la velocidad de rotación, llegando a su valor máximo en 5000 rpm y después disminuye ligeramente. Un comportamiento similar al descrito para el V_{oc} se presenta en el FF y en la eficiencia de conversión fotovoltaica (η), como se puede observar en la gráfica 14 y 15.



Gráfica 13 – Variación de la densidad de circuito abierto (J_{sc}) respecto a la velocidad de rotación durante el procesamiento.



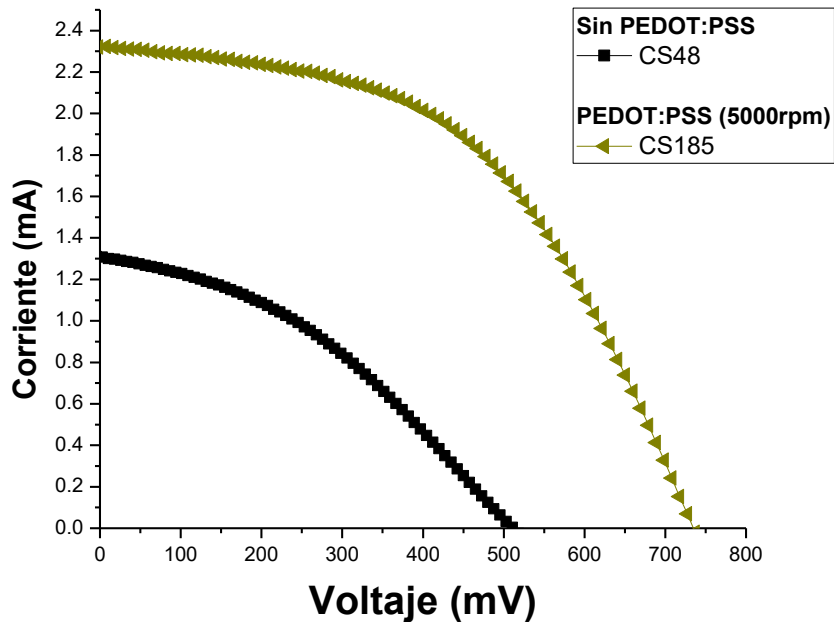
Gráfica 14 – Variación del factor de llenado (FF), respecto a las rpm de depósito.



Gráfica 15 – Variación de la eficiencia de conversión respecto a la velocidad de rotación durante el procesamiento.

El mejor resultado en cuanto al mejoramiento de la eficiencia de conversión fotovoltaica que se obtuvo en este trabajo fue en la celda CS185, donde se obtuvieron los siguientes parámetros eléctricos de salida: $V_{oc} = 734.31$ mV, $J_{sc} = 29.03$ mA/cm², $FF = 50.25$ y $\eta = 11.4\%$. Si realizamos un comparativo de la curva I vs V de la celda híbrida CS185 y la celda base CS48 (gráfica 16), podemos observar que la corriente de corto circuito aumenta de 1.3 mA a 2.3 mA, o sea, un incremento del 76.9%.

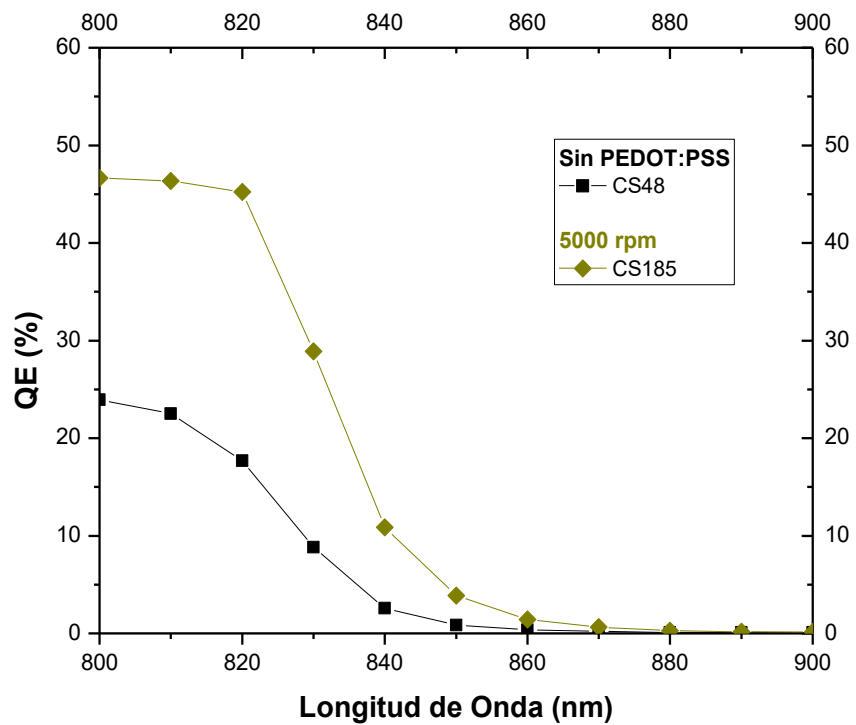
En el voltaje de circuito abierto también se observa un incremento del 43.1% ya que se observa un incremento de 513 a 734 mV; el FF también incrementa de 0.38 a 0.44 y finalmente la eficiencia de conversión fotovoltaica de los dispositivos finalizados aumenta del 3.2 a 11.4%.



Gráfica 16 – Comparativo de las curvas de I vs V de celdas CS48 y CS185.

En lo que respecta al EQE, si en una celda solar fotovoltaica mejora, sus parámetros eléctricos también lo hacen. En este caso observamos una mejoría en la curva I vs V en la celda híbrida CS185 con respecto a la celda base CS48, por lo tanto, se esperaría que la EQE también presentara dicha mejoría. En la gráfica 11 podemos observar que existe un incremento aproximadamente del 20%, ya que la celda híbrida CS185 a 5000rpm en el depósito de PEDOT:PSS presenta entre un 50 a 55 [%QE] y la celda base entre 30 a 35 (%QE).

En la gráfica 17 se hace una comparación de la EQE de la celda base sin PEDOT:PSS y de la celda CS185 con PEDOT:PSS, donde se observa que existe un corrimiento hacia la derecha en el canto de absorción del CdTe, el decaimiento de la celda CS48 si PEDOT:PSS tiene una energía de fotón de 1.53 eV y al usar el polímero esta se corre hasta 1.48 eV, mejorando 50 meV; este desplazamiento se observa en todas las celdas con PEDOT:PSS.



Gráfica 17 – Gráfica de %QE de celda CS48 y CS185.

Conclusiones

Hasta donde se conoce en la literatura consultada hasta la fecha, en este trabajo se presentan las primeras celdas solares híbridas de CdTe con el polímero orgánico PEDOT:PSS hechas en nuestro país.

Se logró comprobar que el polímero orgánico PEDOT:PSS de la mca. Hereaus, al ser depositado por la técnica de Sping-Coating posiblemente ayuda a recubrir los pinholes que se generan durante el depósito de la película semiconductor de CdTe, ayudando a evitar que se generen micro cortos circuitos no deseados en las celdas solares fabricadas. Este efecto reparador del polímero orgánico se ve reflejado en el aumento de voltaje, ya que este mejora la morfología y por lo tanto, la union p-n.

El polímero PEDOT:PSS al ser colocado después de la película de CdTe no pierde sus propiedades conductoras (Conductividad aprox. de 100 S/cm y $E_g = 5\text{eV}$), esto posiblemente nos permitió incrementar los parámetros eléctricos característicos de nuestra celda base. El principal parámetro en el que hubo una mejoría substancial fue la I_{sc} (76.9%), ya que este polímero tiene la capacidad de disminuir la influencia de los pinholes, beneficiando a la capa tipo p (CdTe). Por lo tanto, mejora la colección y tránsito de los portadores de carga minoritarios, cuando se genera el efecto fotovoltaico en las celdas fabricadas.

La cinética de crecimiento del PEDOT:PSS sobre el CdTe no se comporta igual que al ser deposita sobre ITO, eso en cuanto al espesor, ya que dependerá de la rugosidad que presente el sustrato o película anterior en que sea depositado. Cuando se analizó en espesor del PEDOT:PSS sobre TEC-15 se observó que el espesor no variaba considerablemente respecto a la velocidad de rotación utilizada durante el procesamiento del PEDOT:PSS y de igual manera después del TT, sin embargo, la variación de la velocidad de rotación ayudó a optimizar la distribuir del polímero sobre el vidrio y particularmente sobre la película delgada de CdTe.

Las mejores propiedades obtenidas para el polímero PEDOT:PSS (Clevios) de la marca HERAEUS (procesado por Spin-Coating a condiciones de 5000 rpm de

depósito, una cantidad de 250 μl y un TT de 88°C durante 30 min.) fueron los siguientes:

- El promedio de la Transmitancia y la Absorbancia entre 350 y 1000 nm fue aproximadamente de 89.8% y 0.05 respectivamente.
- Los parámetros eléctricos en la celda de CdTe con PEDOT:PSS fueron: $V_{oc}= 734.31\text{mV}$, $J_{sc}=29.03\text{mA/cm}^2$, $FF=50.25$ y $\eta=11.4\%$.
- El promedio de la Eficiencia Cuántica Externa de una celda solar híbrida con PEDOT:PSS entre los 500 y 850 nm reportada en este trabajo es aproximadamente de $\%QE \approx 46.3\%$

De los resultados obtenidos en este trabajo podemos concluir que el PEDOT:PSS es un polímero que posiblemente beneficia al rendimiento fotovoltaico de celdas solares a base de CdTe, no sólo en la posible cobertura de “pinholes”, sino también tiene una contribución en la mejora de los factores eléctricos característicos de la celda, por lo tanto, el PEDOT:PSS permite el aumento de la eficiencia de conversión fotovoltaica (η) cuando es incluido en la estructura típica de este tipo de celdas solares teniendo un aumento en la eficiencia de conversión fotovoltaica de alrededor del 8.2%.

Perspectivas

Los resultados de este trabajo abren un nuevo panorama de a dónde nos gustaría seguir encaminando la investigación y aplicación del PEDOT:PSS.

Una de nuestras nuevas interrogantes es, saber si el polímero de PEDOT:PSS de otro proveedor tiene un comportamiento similar al Clevios de marca Heraeus, ya que la características como la conductividad y el porcentaje de disolución varía dependiendo del proveedor.

Como mencionamos en este trabajo, después del depósito de PEDOT:PSS se realiza un tratamiento térmico, este tratamiento está basado en la literatura de las celdas orgánicas, sin embargo, como hemos demostrado el espesor dependerá de

la base o sustrato en que sea depositado. Por lo tanto, se pretende hacer un estudio más detallado de del efecto que tiene dicho tratamiento a temperaturas y tiempos diferentes.

Otra área en la que se desea implementar el PEDOT:PSS, es sobre las celdas de Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS), con la intención de aumentar la I_{sc}, usando de base lo que se logró hacer en este trabajo.

Índice de Figuras

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 1 - Potencial de electricidad fotovoltaica. © 2017 El Banco Mundial, Datos de recursos solares: Solargis.</i> | <i>9</i> |
| <i>Figura 2 – Evolución de celdas solares fotovoltaicas (1975-2019) NREL.</i> | <i>11</i> |
| <i>Figura 3 – Estructura típica de una CSSGPD del tipo superestrato a base de CdTe.</i> | <i>12</i> |
| <i>Figura 4 – Muestra después del depósito de CdTe. Se observan pinholes.</i> | <i>13</i> |
| <i>Figura 5 – Esquema de las bandas energéticas en los materiales. Entre la banda de valencia y la banda de conducción existe una brecha, la cual indica que entre más grande sea dicha brecha o banda prohibida, se requiere mayor energía (E_G) para que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción.</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 6 – Semiconductor intrínseco de Silicio (Si), donde se observan los enlaces covalentes.</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 7 – Cuando un fotón excita a los electrones que se encuentran en la banda de valencia de un semiconductor, este aumenta su energía (E_G) y se libera para poder moverse a través de la banda de conducción del semiconductor; si el electrón no es extraído y pierde su E_G, este se recombina en la banda de valencia del semiconductor.</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 8 – El arsénico (As) es un elemento que se encuentra ubicado en la familia V de la tabla periódica, por lo tanto es un elemento que puede trabajar con 5 electrones de valencia, o sea, es un pentavalente. El Si al ser dopado con As forma 4 enlaces covalentes y deja un electrón libre (carga negativa).</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 9 – El Boro (B) es un elemento que se encuentra ubicado en la familia III de la tabla periódica, por lo tanto es trivalente. Al dopar el Si con B se forman 3 enlaces covalentes y queda un hueco (carga positiva).</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 10 – Hererounión P-N de dos semiconductores dopados. El semiconductor tipo P (+) atrae cargas negativas de la zona N (-) y viceversa, estas cargas que son</i> | |

| | |
|---|----|
| <i>atraídas se ionizan y permiten que se forme un campo eléctrico entre ambas zonas.</i> | 19 |
| <i>.....</i> | 19 |
| <i>Figura 11 – Cuando se liberan las cargas negativas, éstas son atraídas por un metal que permite su conducción (corriente eléctrica) y al cerrar el sistema, se forma un circuito eléctrico.....</i> | 19 |
| <i>Figura 12 – Circuito eléctrico de una celda solar, donde se representa la Fuerza Electromotriz (FEM), Celda Solar (CS), Resistencia en paralelo (Rp-alta) y Resistencia en serie (Rs-baja).</i> | 20 |
| <i>Figura 13 – Ciuurva representativa I vs V de una celda solar en condiciones de oscuridad e iluminación.....</i> | 21 |
| <i>Figura 14 – Curva representativa J vs V de una celda solar fotovoltaica.</i> | 23 |
| <i>Figura 15 – Diferentes estructuras de celdas solares de película delgada más representativas: Arriba-Izquierda. Celda Solar a base de CdTe, Arriba- Derecha. Celda solar a base de CIGS y Abajo-Cetro. Celda solar a base de Silicio amorfo.</i> | 24 |
| <i>Figura 16 – Estructura cristalina hexagonal del Óxido de Zinc (ZnO), donde los átomos de Zinc (Zn) son los más oscuros y los de oxígeno (O) lo más claros (Pérez Tabora, et al., 2008).....</i> | 26 |
| <i>Figura 17 – Estructura hexagonal del Sulfuro de Cadmio (CdS) (Mazón Montijo, 2009).....</i> | 27 |
| <i>Figura 18 – Coeficientes de absorción de diferentes materiales semiconductores en dependencia de la energía del fotón: los semiconductores directos muestran un fuerte aumento de la absorción por encima de la energía de banda prohibida (Mertens, 2019).....</i> | 28 |
| <i>Figura 19 – Fotografía de la morfología de una capa de CdTe, medida por Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) (Falcao, et al., 2006).....</i> | 28 |
| <i>Figura 20 – Fotografía de AFM de capas de CdS crecidas por Transporte de Vapor en Espacio Cercano (CSVt por sus siglas en inglés). La fotografía del lado izquierdo muestra la morfología de una película delgada sin tratamiento TT con CdCl₂ y lado derecho con tratamiento con CdCl₂ (Galán, et al., 2004).....</i> | 29 |
| <i>Figura 21 – Estructura química de moléculas dipolares orgánicas conjugadas Fuente: (Barbosa García, et al., 2012).....</i> | 31 |
| <i>Figura 22 – Band gap entre los niveles energéticos “HOMO y LUMO” (Anon., 2017).....</i> | 32 |
| <i>.....</i> | 32 |
| <i>Figura 23 – Esquema de una OPV de una sola capa.</i> | 33 |
| <i>Figura 24 – Esquema de una celda solar de heterounión y su disposición de bandas de energía. (Chamorro Coral & Urrego Riveros, 2012).....</i> | 33 |
| <i>Figura 25 – Esquema de una celda de Heterounión de bulo (BHJ).</i> | 34 |
| <i>Figura 26 – Estructura química de un bipolaron y un polaron para el poli(3,4-etilendioxitiofeno), PEDOT Fuente: (Romero, 2017).....</i> | 35 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 27 – Estructura química de la mezcla polimérica PEDOT:PSS (Suzhou Yacoo Science Co., 2018).</i> | 37 |
| <i>Figura 28 – Esquema de un vidrio conductor TEC-15 limpio.</i> | 40 |
| <i>Figura 29 – Espesor de PEDOT:PSS sobre ITO (Gutiérrez, 2016).</i> | 41 |
| <i>Figura 30 – Esquema de un sistema de Sputtering-RF.</i> | 46 |
| <i>Figura 31 - Izquierda: imagen del arreglo interior de magnetrones del sistema experimental de Sputtering-RF de la UACM, plantel San Lorenzo Tezonco. Derecha: muestra de ZnO/CdS sobre Tec-15.</i> | 47 |
| <i>Figura 32 – Derecha: Imagen del calefactor del sistema experimental CSS utilizado. Izquierda: Esquema del calefactor de un sistema CSS por calentamiento de lámparas infrarrojas.</i> | 48 |
| <i>Figura 33 – Muestra de ZnO/CdS + CdTe sobre Tec-15.</i> | 48 |
| <i>Figura 34 – Limpieza superficial del CdCl₂ sobre el CdTe después del TT en mufla.</i> | 53 |
| <i>Figura 35 – Izquierda: Spin-Coating modelo WS-650 para películas delgadas. Derecha: Depósito de película delgada de PEDOT:PSS sobre CdTe.</i> | 53 |
| <i>Figura 36 – Fases de depósitos por la técnica de Spin-Coating. a) Se agrega el material en el centro del sustrato. b) La aceleración centrífuga distribuye el material por el sustrato. c) La velocidad angular se mantiene constante y la el material se expande hacia los bordes. d) Los disolventes orgánicos se evaporan permitiendo que sólo quede el material de interés.</i> | 54 |
| <i>Figura 37 – Depositos obtenidos (sobre la película de CdTe) del polímero PEDOT:PSS a diferente velocidad de rotación.</i> | 55 |
| <i>Figura 38 – Esquema de una celda solar híbrida con contactos de Cu-Mo y una imagen real de la celda solar finalizada.</i> | 56 |
| <i>Figura 39 – Se utilizo un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) a 5000x para analizar las películas de CdTe con y sin PEDOT:PSS.</i> | 61 |
| <i>Figura 40 – Celda de CdTe con “pinholes” cubierta con PEDOT:PSS.</i> | 62 |

Índice de Gráficas y Tablas

| | |
|---|----|
| <i>Gráfica 1- Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del sector energía. Ref. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2015).</i> | 8 |
| <i>Gráfica 2- Capacidad instalada de energía fotovoltaica en México (2004-2018).</i> . | 10 |
| <i>Gráfica 3 – %T de la capa de PEDOT:PSS a diferente velocidad de rotación (2000, 4000, 5000 y 6000) después del TT.</i> | 43 |
| <i>Gráfica 4 – Espectro de la absorbancia de PEDOT:PSS a diferentes velocidades de rotación (2000, 4000, 5000 y 6000) después del TT.</i> | 44 |

| | |
|---|----|
| Gráfica 5 – Curvas de calentamiento y de la variación de la presión de la celda CS135 en la serie 1 procesada mediante CSS. | 50 |
| Gráfica 6 – Curvas de calentamiento y de la variación de la presión de las muestras de la serie 2 procesadas mediante CSS. | 50 |
| Gráfica 7 – Curvas de calentamiento y de la variación de la presión de las muestras de la serie 3 procesadas mediante CSS. | 51 |
| Gráfica 8 – Curvas de calentamiento de las celdas CS185, CS205 y CS135, donde se observa que la temperatura del sustrato y la de fuente tienen un comportamiento similar, apesar de ser de tres series de celdas diferentes. La curva de la variación de la presión durante el procesamiento es la que presenta diferencias notorias para las tres muestras representativas de cada serie. | 51 |
| Gráfica 9 – Curvas de calentamiento de todas las muestras en el sistema CSVT. | 52 |
| Gráfica 10 – Curvas J vs V de celdas slares fabricadas sin PEDOT:PSS y con PEDOT:PSS a diferente velocidad de rotación. | 59 |
| Gráfica 11 – Eficiencia cuantica de celdas solares híbridas. | 60 |
| Gráfica 12 – Voltaje de circuito abierto (V_{oc}) respecto a la velocidad de rotación durante el rocesamiento. | 63 |
| Gráfica 13 – Variación de la densidad de circuito abiero (J_{sc}) respecto a la velocidad de rotación durante el procesamiento. | 64 |
| Gráfica 14 – Variación del factor de llenado (FF), respecto a las rpm de depósito. | 64 |
| Gráfica 15 – Variación de la eficiencia de conversión respecto a la velocidad de rotación durante el procesamiento. | 65 |
| Gráfica 16 – Comparativo de las curvas de I vs V de celdas CS48 y CS185. | 66 |
| Gráfica 17 – Gráfica de %QE de celda CS48 y CS185. | 67 |
| | |
| Tabla 1- Propiedades de los sustratos NSG TEC TM marca Pilkington | 25 |
| Tabla 2 – Espesores de PEDOT:PSS depositado por sping-coating sobre vidrio TEC-15. | 42 |
| Tabla 3 – Espesores determinados experimentalmente durante los depósitos de ZnO y CdS. | 47 |
| Tabla 4 - Parámetros de las temperaturas empleadas en los depósitos de CdTe, espesor y morfología. | 49 |
| Tabla 5 – Parámetros durante los depósitos de PEDOT:PSS. | 55 |
| Tabla 6 – Espesores obtenidos después de los depósitos de Cu-Mo. | 56 |
| Tabla 7 – Parámetros eléctricos caractreristicos de celdas solares fabricadas, respecto a la velocidad de rotación utilizadas durante el depósito de PEDOT:PSS | 58 |

Referencias

Aguilar, C., Martínez, V. D. P. & Ordoñez, S., 2004. Mlenda Mécánica de Polvos de Cobre-Molibdeno y Estudio Termodinámico de Solubilidad. *Revista Matéria*, pp. 86-92.

Aguilera González, V. E. & Sandoval Espinoza, D. A., 2014. *Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para la alimentación de oficinas de una nave industrial*. México: Instituto Politécnico Nacional.

Allice for Sustainable Energy, 2019. *NREL Transforming Energy*. [En línea] Available at: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> [Último acceso: 05 09 2019].

Anon., 2017. *physics.stackexchange.com*. [En línea] Available at: <https://physics.stackexchange.com/questions/293140/absorption-phenomenon> [Último acceso: 12 Diciembre 2019].

Anon., 2019. *SOLARGIS*. [En línea] Available at: <https://globalsolaratlas.info/detail?c=23.926013,-102.568359,4&r=MEX> [Último acceso: 10 Septiembre 2019].

AUTREN, 2019. *Identificación y selección de oportunidades de negocios con insumos energía renovable fotovoltaica en México y su proyección hasta el año 2020*. [En línea] Available at: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/58849/INSUMOS_DE_ENERGIA_RENOVABLE_FOTOVOLTAICA_Y_SU_PROYECCION_AL_2020_SEC.pdf [Último acceso: 19 Septiembre 2019].

Barbosa García, O. y otros, 2012. Celdas solares orgánicas como fuente de energía sustentable. *Acta Universitaria*, pp. 36-48.

Bednarski, H. y otros, 2016. The Influence of PEDOT to PSS Ratio on the Optical Properties of PEDOT:PSS Thin Solid Films— Insight from Spectroscopic Ellipsometry. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 130(5), pp. 1242-1244.

Calleja Gómez, C. M., 2011. *FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DETECTORES DE RADIACIÓN UV BASADOS EN SILICIO*. Puebla : INADE.

Chamorro Coral, W. A. & Urrego Riveros, S., 2012. Celdas solares orgánicas, una perspectiva hacia. *Elementos*, pp. 139-149.

Elschner, A. y otros, 2010. *PEDOT: Principles and Applications of an Intrinsically Conductive Polymer*. Florida: Taylor & Francis Group, LLC.

Estrany Coda, F., Alemán Llansó, C., Armelin Diggroc, E. & Casanovas Salas, J., 2011. Nuevas aplicaciones de los polímeros conductores. *Técnica Industrial*, pp. 24-33.

Falcao, V. D., Pinheiro, W. A., Ferreira, C. L. & De Oliveira Cruz, L. R., 2006. Influence of Deposition Parameters on the Properties of CdTe Films Deposited by Close Spaced Sublimation. *Materials Research*, pp. 29-32.

Farid, S. y otros, 2015. Analysis on the structural, vibrational and defect states of chlorine treated polycrystalline cadmium telluride structures grown by e-beam evaporation. *Materials Research Express*, pp. 1-6.

Galán, V. y otros, 2004. Influencia del tratamiento térmico con CdCl₂ sobre las características finales de las celdas solares Cd/CdTe procesadas por transporte de vapor en espacio cercano. *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA*, pp. 353-357.

Gasquet, H. L., 2004. *Conversión Teórico y Práctico sobre los Sistemas Fotovoltaicos*. México: Solartronic S.A. de C.V..

Gómez, O., Herrera Slvador, M., Chay, Á. & Castro Rodríguez, R., 2013. *Sistema de crecimiento de películas delgadas para celdas solares CdS/CdTe, con la técnica CSS combinando rotación simultanea de la fuente de evaporación y del sustrato*, Mérida: s.n.

Gómez, P. G., 2018. *Libro Blanco de Energías Renovables*. España: SALVADOR ESCODA S.A..

González González, F. J. & López Sandoval, R., 2014. *Polimerización del 3,4-eTILÉNDIOXITIOFENO por el método de oxidación química*. México, Publicado por la Coordinación Académica Región Altiplano de la UASLP, pp. 153-154.

Gutiérrez, E. P., 2016. *Arquitecturas y Fabricación de Celdas solares Orgánicas*. León Guanajuato, s.n., p. 45.

Mazón Montijo, D. A., 2009. *Síntesis de Películas delgadas de Sulfuro de Cadmio (CdS) en diferentes sustratos por Depósito en Baño Químico (DBQ)*. Sonora: Universidad de Sonora.

Mendoza Pérez, R., 2007. *Desarrollo de celdas solares prototipo de CdTe con CdS procesado por baño químico*. México: s.n.

Mertens, 2019. *Textbook Photovoltaics*. [En línea]
Available at: <http://www.textbook-pv.org>

Ornelas Acosta, R. E., 2011. *PELÍCULAS DELGADAS DE Cu(In,Al)Se₂ (CIAS) POR MÉTODOS NO TÓXICOS PARA APLICACIONES EN CELDAS SOLARES*. Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.

Oyola, J. S. & Gordillo, G., 2007. Estado del arte de los materiales fotovoltaicos y de la tecnología solar fotovoltaica. *Prospectiva*, pp. 11-15.

Peña, J. L. y otros, 2011. A detailed study of the series resistance effect on CdS/CdTe solar cells with Cu/Mo back contact. *ELSERVIER*, pp. 680-683.

Pérez González, A. M. & Valeriano Arreola, I., 2008. Structural, optical and electrical properties of CdS thin film obtained by spray pyrolysis. *Revista Mexicana de Física*, pp. 212-217.

Pérez Taborda, J. A., Gallegos, J. L., Stiven, R. W. & Riascos Landázuri, H., 2008. Películas nanoestructuradas de Oxido de Zinc (ZnO). *Scientia et Technica*, pp. 416-421.

Ramírez Quiroz, C. O., 2011. *Caracterización Óptica y Eléctrica de Películas de PEDOT/PSS tratadas con Dopantes Secundarios*. San Luis Potosí: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C..

Reyes, B. P., 2015. *libro*. Mexico: s.n.

Rodríguez Albarrán, S. P., 2014. *Investigación de depósito por pulverización catódica en sustratos para el desarrollo de antenas*. México: Escuela Superior de Ingeniería .

Romero, M. C., 2017. *CINÉTICA DE OXIDACIÓN DE POLÍMEROS CONDUCTORES: POLO-3,4-ETILENDIOXITIOFENO*. Catagena: s.n.

Secretaria de Energía, 2018. *Reporte de avances de energías limpias primer semestre 2018*, México: SENER.

Stöcker, T., Köhler, A. & Moos, R., 2012. Why Does the Electrical Conductivity in PEDOT:PSS Decrease with PSS Content? A Study Combining Thermoelectric Measurements with Impedance Spectroscopy. *JOURNAL OF POLYMER SCIENCE PART B: POLYMER PHYSICS*, Issue 50, pp. 976-983.

Suzhou Yacoo Science Co., L., 2018. *acoo*. [En línea]
Available at: https://es.yacooscience.com/preparation-and-application-of-pedot-pss-155090-83-8_n63
[Último acceso: 15 Noviembre 2019].

Takano, T. y otros, 2012. PEDOT Nanocrystalin Highly Conductive PEDOT:PSS Polymer Films. *Macromolecules*, pp. 3859-3865.

Tang, C. W., 1985. Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied Physics Letters*, pp. 183-185.

Tyona, D. M., 2013. A theoretical study on spin coating technique. *Advances in Materials Research*, pp. 195-208.

Vallejo Lozada, W. A., 2011. *DESARROLLO DE MATERIALES FOTOVOLTAICOS USADOS COMO VENTANA OPTICA EN CELDAS SOLARES*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.