

# 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

**Interconexión de prototipos de módulos fotovoltaicos híbridos  
de CdTe y PEDOT:PSS**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

**LICENCIADO EN INGENIERÍA EN  
SISTEMAS ENERGÉTICOS**

PRESENTA:

**Jesús Adrián Núñez Membrillo**

DIRECTOR

**Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo**

CODIRECTOR

**Dr. Rogelio Mendoza Pérez**

Ciudad de México, enero de 2022.

## 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.

A mis padres, José Antonio y Ana María por todo su apoyo y amor incondicional. Detrás de este logro están los valores y principios que me han inculcado para trabajar con esfuerzo y dedicación por lo que uno desea.

A mis hermanos y hermana tan asombrosos y únicos, son un ejemplo del trabajo duro en lo que se proponen. Gracias por las travesuras y todos los buenos momentos.

A Rocío, por formar parte esencial en mi vida. Tu amor y apoyo me motivan a alcanzar nuevas metas personales y profesionales. Sé que continuaremos sumando logros en nuestro camino.

## **Agradecimientos**

A cada uno de los profesores que han contribuido en mi formación académica y profesional, así como aquellos que han despertado mi interés en la investigación científica, como lo es el Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo, maestro sumamente comprometido con mi desarrollo académico y el trabajo que hemos realizado, y el Dr. Rogelio Mendoza Pérez, maestro y gran guía durante todo este tiempo tanto en lo académico como en diferentes lecciones que he aprendido a su lado.

A mis compañeros y amigos de la UACM, por todos los buenos momentos compartidos durante la carrera y por el apoyo y aprendizaje en el trabajo del laboratorio; es un gusto coincidir con personas que motivan a seguir creciendo en todos los aspectos de la vida.

A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por brindarme una educación gratuita y de calidad, al Programa de Becas de la UACM por brindarme el apoyo económico que me permitió enfocarme en mis estudios durante gran parte de mi estancia en la universidad, así como un agradecimiento por el apoyo otorgado para la impresión y empastado de este trabajo.

Agradecimiento al proyecto 189282 Fondo Mixto CONACYT-GDF: “Manufactura de módulos de CdS/CdTe en áreas de 100 cm<sup>2</sup> y con eficiencias de 8% por la técnica de sublimación y procesos preindustriales asociados. Noviembre 2013 – junio 2017.

Agradecimiento a la convocatoria interna UACM proyectos de investigación del Colegio de Ciencia y Tecnología (CCyT-2021). Clave CCyT-2021-16.

## INTEGRACIÓN DEL JURADO

Presidente: Dr. José Joaquín Lizardi Del Ángel

Secretario: Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo

Vocal: Dr. Jorge Sastré Hernández

1er. Suplente:

2do. Suplente:

Lugar donde se realizó la carrera:

PLANTEL SAN LORENZO TEZONCO, UACM

DIRECTOR DE TESIS:

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval. The signature is cursive and appears to read 'Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo'.

---

Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo

Universidad Autónoma de la Ciudad de México

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	5
<b>INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES</b>	6
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	10
<b>HIPÓTESIS</b>	10
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	11
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b>	11
<b>Capítulo 1 – MARCO TEÓRICO</b>	12
<b>1.1 Semiconductores</b>	12
<b>1.2 Efecto fotovoltaico</b>	13
<b>1.3 Modelo de diodo</b>	14
<b>1.4 Parámetros fotovoltaicos de salida (curva I-V)</b>	15
<b>1.4.1 Corriente de corto circuito (<math>I_{sc}</math>)</b>	16
<b>1.4.2 Voltaje en circuito abierto (<math>V_{oc}</math>)</b>	16
<b>1.4.3 Potencia Máxima (<math>P_{max}</math>)</b>	16
<b>1.4.4 Factor de llenado (FF)</b>	17
<b>1.4.5 Eficiencia fotovoltaica (<math>\eta</math>)</b>	17
<b>1.5 Celdas orgánicas</b>	17
<b>1.5.1 Funcionamiento de las celdas orgánicas</b>	18
<b>1.6 Celdas solares híbridas</b>	19
<b>1.7 Interconexión eléctrica</b>	21
<b>1.7.1 Interconexión eléctrica en celdas solares</b>	23
<b>Capítulo 2 – METODOLOGÍA</b>	26
<b>2.1 Preparación y limpieza de los sustratos</b>	26
<b>2.1.1 Preparación de los sustratos</b>	27
<b>2.1.2 Limpieza de los sustratos</b>	27
<b>2.3 Depósito de CdTe</b>	30
<b>2.4 Depósito de CdCl<sub>2</sub></b>	34
<b>2.5 Depósito de PEDOT:PSS</b>	36
<b>2.6 Depósito de los contactos posteriores Cu/Mo</b>	38
<b>2.7 Escritura láser del módulo</b>	40
<b>2.8 Proceso complementario de aislamiento</b>	42

<b>2.9 Interconexión eléctrica de los módulos fotovoltaicos</b>	44
<b>2.9.1 Interconexión eléctrica del módulo fotovoltaico RF52</b>	44
<b>2.9.2 Interconexión eléctrica del módulo fotovoltaico RF53</b>	46
<b>2.9.3 Uso de tinta conductiva de plata para la interconexión eléctrica de dos tipos diferentes para su comparación en el módulo fotovoltaico RF54</b>	49
<b>2.10 Terminales de conexión</b>	50
<b>2.11 Encapsulado</b>	51
<b>2.12 Caracterización I-V</b>	53
<b>Capítulo 3 –ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	55
<b>3.1 Medición de Transmitancia y absorbancia del ZnO-CdS</b>	55
<b>3.2 Perfilometría del CdTe</b>	57
<b>3.3 Caracterización I-V</b>	61
<b>3.3.1 Caracterización I-V de las subceldas del módulo RF52</b>	62
<b>3.3.2 Caracterización I-V de la interconexión serie-serie del módulo RF52</b>	63
<b>3.3.3 Caracterización I-V del prototipo del módulo RF52</b>	65
<b>3.3.4 Caracterización I-V de las subceldas del módulo RF53</b>	66
<b>3.3.5 Caracterización I-V de la interconexión en serie-paralelo del módulo RF53</b>	69
<b>3.3.6 Caracterización I-V de prototipo del módulo RF53</b>	71
<b>3.3.7 Caracterización I-V de las subceldas del módulo RF54</b>	73
<b>CONCLUSIONES</b>	78
<b>PERSPECTIVAS Y TRABAJOS A FUTURO</b>	79
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	81
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	84
<b>REFERENCIAS</b>	85

## RESUMEN

A lo largo de este proyecto de tesis se trabajó en el procesamiento e interconexión eléctrica de prototipos de módulos fotovoltaicos híbridos a base de Teluro de Cadmio (CdTe) y de Poli(3,4-etilendioxitiofeno): poli(estirensulfonato) (PEDOT:PSS). Se utilizó este polímero debido a que puede cubrir los pinholes presentes en la película de CdTe con lo que posiblemente se evitan rutas de corto circuito, al cubrir las fronteras de grano de este semiconductor se mejora la heterounión p-n y por lo tanto se pueden obtener mejores valores de  $V_{oc}$ ; además, el PEDOT:PSS dada su propiedad semiconductor de transportar huecos podría hacer la función de una capa semiconductor tipo p<sup>+</sup>, con lo que ayudaría al aumento de la corriente obtenida en los dispositivos, debido a su cómo extractora de huecos. El proceso se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentables (LACyTES) perteneciente a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Los módulos fotovoltaicos se desarrollaron en áreas de 100 cm<sup>2</sup> (10x10 cm) y la estructura que se empleó fue la configuración SnO<sub>2</sub>:F/ZnO-CdS/CdTe/CdCl<sub>2</sub>/PEDOT:PSS/Cu-Mo. El depósito de las películas de ZnO-CdS se realizó mediante la técnica de erosión catódica magnetoplanar en un sistema Sputtering RF, las películas de CdTe y CdCl<sub>2</sub> se depositaron mediante un sistema de sublimación de espacio cercano (CSS) y un sistema de transporte de vapor en espacio cercano (CSVT), respectivamente; la película de PEDOT:PSS se depositó por la técnica de deposición por centrifugado con el uso de un sistema de spin coating y finalmente el depósito de los contactos posteriores de Cu- Mo se realizó mediante la técnica de erosión catódica magnetoplanar en un sistema Sputtering DC. Con lo que se obtienen módulos conformados por 22 subceldas con un área aproximada de 2.5 cm<sup>2</sup> para cada una, por lo que se realiza un rayado láser para que las subceldas sean independientes lo que se complementa con un proceso de aislamiento con el uso de tinta epóxica para evitar rutas de corto circuito. Posteriormente se realiza la interconexión de las subceldas con la finalidad de obtener parámetros fotovoltaicos favorables; para ello se usaron plumones conductivos de Níquel (Ni) y de plata (Ag) que beneficiaron la respuesta fotovoltaica debido a las propiedades conductivas de ambos materiales. Finalmente se obtuvieron los prototipos de módulos fotovoltaicos encapsulados con una resina epóxica. En este trabajo se muestra que el proceso de interconexión, así como el de encapsulamiento es reproducible y estable ya que no genera pérdidas considerables en los parámetros fotovoltaicos de salida como son el  $V_{oc}$  y  $I_{sc}$  de los

dispositivos finales. Se obtuvo un prototipo módulo híbrido de área  $100 \text{ cm}^2$ , con un  $V_{oc}$  6.85 V,  $I_{sc}$  37.35 mA,  $P_{max}$  67.64 mW, FF 24.40 y  $\eta$  1.20%

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los avances de la humanidad en los últimos siglos en ciencia, tecnología, cultura y otros rubros de las actividades humanas, se debieron a la disponibilidad barata y abundante de energía de origen fósil, sobre todo del carbón y el petróleo. Sin embargo, el aumento creciente de la población a nivel mundial crea una mayor demanda y consumo de energía, lo que trae consigo la producción de gases de efecto invernadero (GEI) debido a la quema de estos combustibles, como lo son: el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ; que tienen repercusiones en la salud de las personas por la contaminación del aire y se asocian a problemas ambientales como el calentamiento global.

Lo anterior se debe tener en cuenta ya que el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha identificado que hay un 40% de posibilidades de que la temperatura global media anual alcance  $1.5^\circ\text{C}$  por encima de los niveles preindustriales en menos de 5 años, lo que implica un punto de inflexión donde habrá un aumento en fenómenos naturales como sequías extremas, incendios forestales, inundaciones y escasez de alimentos. En la figura 1 se puede apreciar los sectores que generan más emisiones de GEI, con lo que queda claro que es necesario aplicar las medidas necesarias en el sector energético en el que se incluye la producción de energía y calor y el transporte para que haya una disminución de las emisiones de GEI.

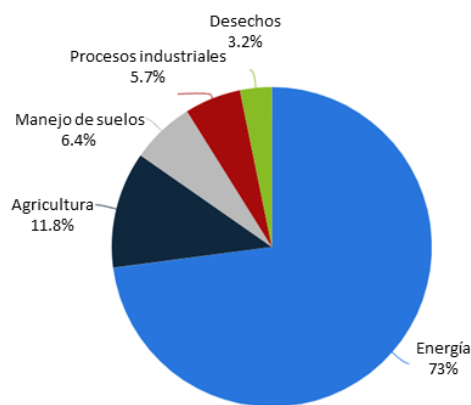


Figura 1. Distribución en sectores de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial en 2017. Fuente: Statista, 2021.

Además de los problemas ambientales, existen implicaciones económicas derivadas de que los hidrocarburos sigan ocupando la base de la economía global, debido a que se generan inestabilidades y escaladas en los precios de los combustibles; lo que trae consigo problemas en el crecimiento de la economía global, todo esto asociado a la disminución de reservas de los mismos, la dificultad para la extracción en yacimientos por métodos convencionales, así como la especulación del mercado (Ferrari, 2013).

A fin de lograr una menor dependencia de los combustibles fósiles y de un desarrollo sustentable en el que se disminuya el impacto ambiental por el crecimiento de la economía mundial, se apunta hacia el uso de fuentes de energías alternativas, pero especialmente a aquellas que se consideran renovables, rentables y fiables como lo son la eólica, la hidroeléctrica, la bioenergía y la solar. Especialmente esta última, y su aprovechamiento a través de módulos fotovoltaicos para obtener electricidad se perfila como una de las principales fuentes de energía para este siglo (Bakhiyi, *et al.*, 2014). La capacidad fotovoltaica acumulada a nivel mundial ha crecido continuamente desde el año 2000, para llegar a un valor de 707.5 GW a finales de 2020, con lo que significó un crecimiento del 34% entre el año 2010 y 2020. Además, para el año 2020 contribuyó con la generación de 855.7 TWh lo que representó un 3.2% de la energía generada en ese año con diferentes tecnologías (Fraunhofer, 2021).

En la figura 2 se muestra el potencial eléctrico fotovoltaico de todos los países, este potencial depende de la energía que puede ser generada (kWh) por cada KWp de capacidad fotovoltaica instalada en el transcurso de un día y anualmente. Si bien la mayor capacidad instalada se encuentra en países como China, Estados Unidos, Japón, Alemania e India, se puede observar que el mayor potencial se encuentra en los países localizados entre la latitud  $-35^{\circ}$  y  $+35^{\circ}$ , zona que se conoce como cinturón solar (señalada en la imagen 2). Particularmente se observa que México es uno de los países que tienen potencial para poder aprovechar esta tecnología, debido a que recibe una radiación anual de  $5.5 \text{ kWh/m}^2$  incluso presentándose en el estado de Sonora una las radiaciones más altas a nivel mundial, con lo que con una correcta inversión la producción de electricidad a partir de paneles solares representaría un excedente para el país. En especial si se toma en cuenta que Alemania fue

líder en producción de energía con esta tecnología hasta el año 2014, incluso cuando recibe una radiación anual de 2.7 kWh/m<sup>2</sup> (Bancomext, 2018).

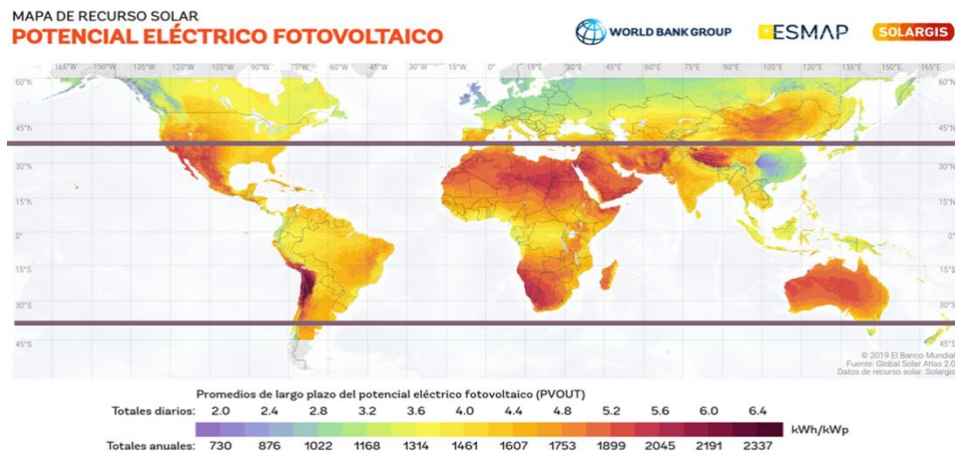


Figura 2. Potencial eléctrico fotovoltaico, se destaca con las líneas moradas el cinturón solar. Fuente: World Bank Group, 2019.

Las celdas solares se pueden clasificar dentro de tres generaciones. Se habla de generaciones debido al tiempo en que empezó su desarrollo, además se aprecia una marcada diferencia en las tecnológicas y uso de materiales que caracterizan cada categoría.

La primera generación empezó su desarrollo a principios de 1950 y la conforman las celdas solares más comunes en el mercado que son de silicio monocristalino, así como el silicio policristalino. Se constituyen de obleas finas de silicio que van desde los 100 hasta los 200  $\mu\text{m}$ , si bien los procesos de elaboración del policristalino son más caros, aunque menos complejos y complicados que para el monocristalino, en general ambos demandan una gran cantidad de energía y material. Debido a la cantidad de tiempo que se han estudiado se han alcanzado eficiencias de laboratorio de 26.7% para el monocristalino y 24.4% para el policristalino; mientras en módulos son de 24.4% y 20.4%, respectivamente. Lo que les permite tener una participación en el mercado del 80% y 14.7%, respectivamente (Fraunhofer, 2021).

La segunda generación surge como una propuesta por la gran cantidad de material que se usa en las celdas de silicio y se suelen llamar como celdas de película delgada (thin film

technology) porque los espesores pueden ir de unos cuantos nanómetros a algunos micrómetros, los materiales que las componen se suelen depositar uno tras otro sobre un sustrato. En esta generación destacan el silicio amorfo, el cobre indio galio selenio (CIGS) y el telurio de cadmio (CdTe). Este tipo de silicio está limitado en aplicaciones, pero representa un gran ahorro en material en comparación de la primera generación, las celdas CIGS se han posicionado como una opción prometedora, aunque tiene mayores costos de producción que las de CdTe, debido a que éstas últimas presentan un proceso más simple y barato que las otras celdas de su generación. En general éstas celdas no se ven tan afectadas en su desempeño por cuestiones de temperatura y sombreado (Ogbomo, *et al.*, 2017). Han alcanzado eficiencias de laboratorio de 23.4 % para las CIGS y 21.0 las de CdTe; mientras en módulos son de 19.2% y 19.0%, respectivamente. Lo que les permite tener una participación en el mercado del 1.28 % y 5.3%, respectivamente. En los últimos años el Si amorfo apenas tiene una participación del 0.2% (Fraunhofer, 2021).

La tercera generación se conforma por los concentradores fotovoltaicos y las tecnologías emergentes, como lo son celdas de tintes sensibilizados, puntos cuánticos, celdas orgánicas, perovskitas, nanoestructuras, compuestos aplicados en celdas híbridas y tándem con una matriz de semiconductores orgánicos con nanopartículas. La mayoría de estas tecnologías siguen en la parte experimental, con una muy pequeña o ninguna participación en el mercado actual. En la figura 3 se puede observar el desarrollo alcanzado en función de sus eficiencias de algunas de estas tecnologías a través de los años, así como de otras generaciones. Resulta de interés las altas eficiencias alcanzadas en un corto periodo de tiempo en celdas de perovskita y su aplicación sobre silicio.

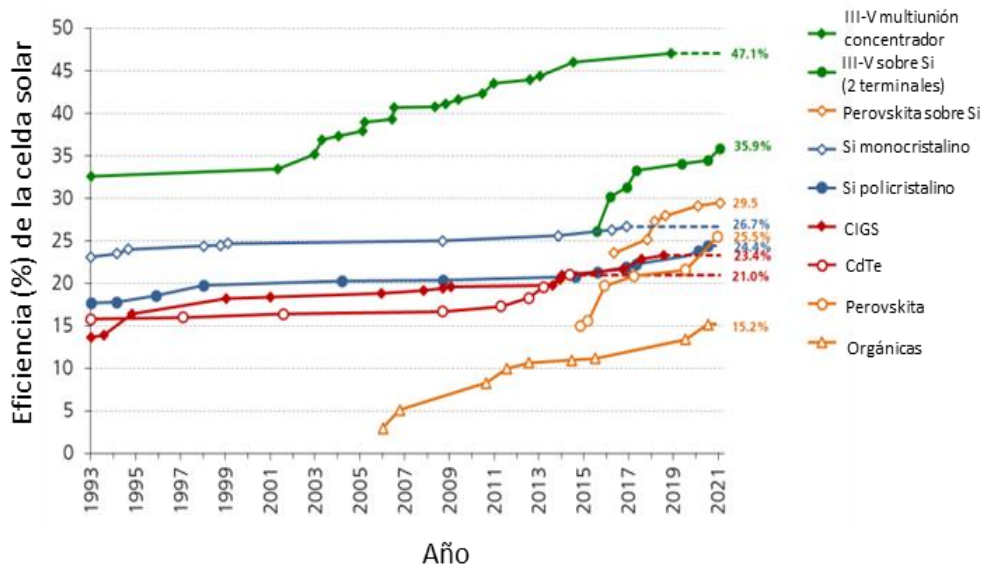


Figura 3. Evolución de las celdas récord por año (1993-2021) en diferentes tecnologías. Fuente: Fraunhofer, 2021.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al realizar el escalamiento de celdas solares de área pequeña (2.5 x 2.5 cm) a módulos fotovoltaicos (10 x 10 cm), existen pérdidas o reducción en la respuesta fotovoltaica debido a factores como la resistencia en serie y la resistencia en paralelo propias de estos dispositivos semiconductores. Lo que hace necesario realizar un aislamiento e interconexión de subceldas dentro del módulo para lograr la obtención de parámetros fotovoltaicos de mejor calidad.

A su vez se presentan defectos morfológicos y una falta de homogeneidad en el espesor del CdTe por el escalamiento, estos defectos son los llamados pinholes en el CdTe y terminan por afectar la respuesta fotovoltaica del dispositivo.

## HIPÓTESIS

Entre otras de las mejoras a las celdas de CdTe, una de ellas es realizar modificaciones en las interfases del CdTe, con el fin de disminuir las recombinaciones de los portadores de carga en esta región, y contribuir a un incremento de la respuesta fotovoltaica mediante el uso de una película semiconductor orgánica transportadora de portadores de carga, como sería el polímero PEDOT:PSS.

Dado su propiedad semiconductor de transportar huecos dicho material pudiera hacer la función de una capa del tipo  $p^+$ , con lo que se esperaría que aumente la  $I_{sc}$  debido a la recolección y tránsito de los portadores de carga, lo que se espera observar en el escalamiento del módulo fotovoltaico y así reducir los efectos de los micro cortocircuitos dado que cubre los pinholes en la capa del CdTe. Así mismo, se espera que el uso de las tintas conductoras ayude a la respuesta fotovoltaica, particularmente en la  $I_{sc}$ , debido a las propiedades conductivas del Ni y principalmente de la Ag.

## **OBJETIVO GENERAL**

Elaboración, fabricación y caracterización de un prototipo de módulo fotovoltaico híbrido de CdTe y PEDOT:PSS, en la UACM; en el que se aplique un proceso de interconexión de forma reproducible y controlada, con el propósito de incrementar los parámetros fotovoltaicos del dispositivo.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Obtener parámetros optimizados en el depósito de CdTe con el fin de mejorar su respuesta fotovoltaica.
- Obtener módulos fotovoltaicos con capas más delgadas de CdTe del orden de 8 micras y homogéneas tanto en su espesor como en la respuesta fotovoltaica.
- Realizar el procesamiento de un módulo fotovoltaico híbrido de CdTe y la capa tipo  $p^+$  de PEDOT:PSS en forma controlada y reproducible en dimensiones de  $100\text{ cm}^2$  ( $10 \times 10\text{ cm}$ ).
- Estudiar el comportamiento de la respuesta I-V al usar tintura de Níquel (Ni) y de plata (Ag) de diferentes presentaciones en la interconexión del módulo.
- Analizar la influencia del polímero orgánico PEDOT:PSS en los módulos fotovoltaicos obtenidos de CdTe.

# Capítulo 1 – MARCO TEÓRICO

## 1.1 Semiconductores

Los materiales se pueden clasificar de acuerdo a su capacidad para conducir la electricidad como: conductores, semiconductores y aislantes. Al estar conformados por átomos, protones y electrones, es posible describir la estructura electrónica de dicho material mediante una estructura de bandas electrónicas como se observa en la figura 4. En cada banda de energía, los niveles de energía permitidos están muy próximos entre sí y la energía de los electrones puede variar. Estas bandas están separadas por una brecha de energía prohibida. Así, la posición y extensión de las brechas de energía permitidas y prohibidas determinan las propiedades del material.

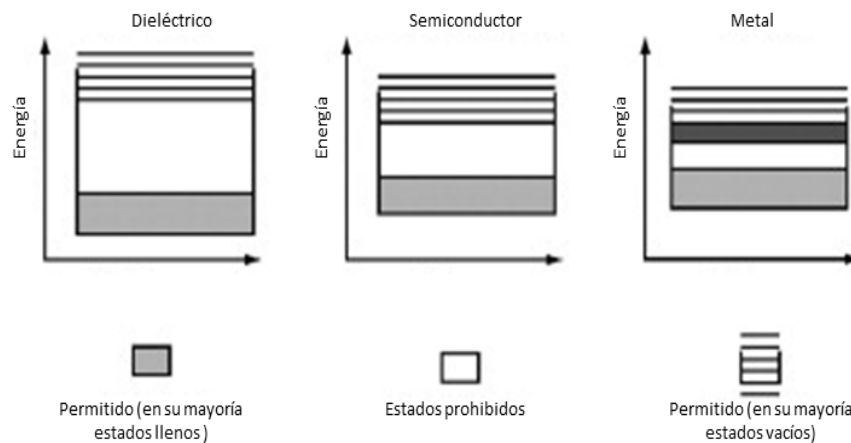


Figura 4. Estructura de bandas de un dieléctrico, un semiconductor y un metal. Se señalan los niveles de energía presentes como permitidos y prohibidos. Fuente: Shur, 2005.

En el caso de los semiconductores y dieléctricos, casi todos los niveles bajos están llenos de electrones mientras los estados en las bandas más altas están vacíos. Las bandas tanto inferior desocupada se llama banda de valencia y la superior ocupada por portadores de carga se denominan la banda de conducción, y la diferencia entre ambas bandas se conoce como la banda de energía prohibida (band gap) o la energía de gap. Por lo que un electrón de la banda de valencia necesita la energía igual o superior que la del ancho de banda prohibida para experimentar una transición hacia la banda de conducción. Mientras que en un dieléctrico

dicha energía puede ser de entre 5 a 6 eV, en un semiconductor esta energía puede variar entre 0.1 y 3.5 eV. Por lo que un semiconductor puede adquirir dicha energía a través de factores externos como la temperatura, campos eléctricos, variaciones en la presión e irradiación (Shur, 2005).

Un semiconductor formado de un solo elemento se conoce como semiconductor intrínseco, como es el caso del Silicio y el Germanio, en estos materiales la concentración de electrones en la banda de conducción y la concentración de huecos en la banda de valencia es muy pequeña en comparación con la el número de estados disponibles. Sin embargo, es posible modificar las mencionadas concentraciones mediante un mecanismo de dopaje, al agregar una impureza que puede donar electrones a la banda de conducción (tales impurezas se llaman donadores y se suele usar elementos pentavalentes), o se pueden agregar aceptadores de electrones provenientes de la banda de valencia creando huecos (tales impurezas se llaman aceptores y se suele usar elementos trivalentes). También se suelen conocer como semiconductor tipo n los semiconductores dopados con donantes, mientras los dopados con aceptadores se conocen como semiconductor tipo p.

## **1.2 Efecto fotovoltaico**

El efecto fotovoltaico es un proceso físico en el que la luz solar se convierte en electricidad y se produce en diferentes materiales, en especial en aquellos donde existe la unión de dos semiconductores, uno tipo p y uno tipo n, puesto que al existir dicho contacto los átomos de cada semiconductor empiezan a ionizarse creando una región empobrecida de cargas (región de carga espacial). Así, los electrones se difunden desde el semiconductor tipo n a través de la unión entre ambos materiales y se sitúan en el semiconductor tipo p dejando atrás cargas positivas (conocidas como huecos), mientras de forma similar las cargas positivas se difunden del semiconductor tipo p al tipo n y dejan atrás cargas negativas (Simya, *et al.*, 2018).

Una vez agotados los electrones y huecos que puedan continuar con la migración de cargas se alcanza un estado de equilibrio, con lo que la pérdida de electrones libres del semiconductor tipo n lo hace cada vez más positivo, mientras que al perder huecos el semiconductor tipo p se hace cada vez más negativo; por lo que se genera un potencial

eléctrico en la interfaz entre ambos materiales. Este potencial eléctrico proporciona la fuerza necesaria para impulsar una corriente a través de un circuito externo.

En particular en una celda solar se puede apreciar el efecto fotovoltaico como se muestra en la figura 5, donde la radiación solar incide sobre la superficie del dispositivo y el semiconductor absorbe la energía de los fotones y la transfiere a los electrones del mismo, con lo que los electrones que obtienen una energía superior a su ancho de banda prohibida se pueden mover a su banda de conducción y dejan un hueco en la banda de valencia, que se conoce como la generación de pares electrón-hueco. Posteriormente el campo eléctrico de la unión p-n hace que los electrones se desplacen hacia la región del tipo n y los huecos hacia la región del tipo p, con lo que los electrones forman parte del flujo de corriente.

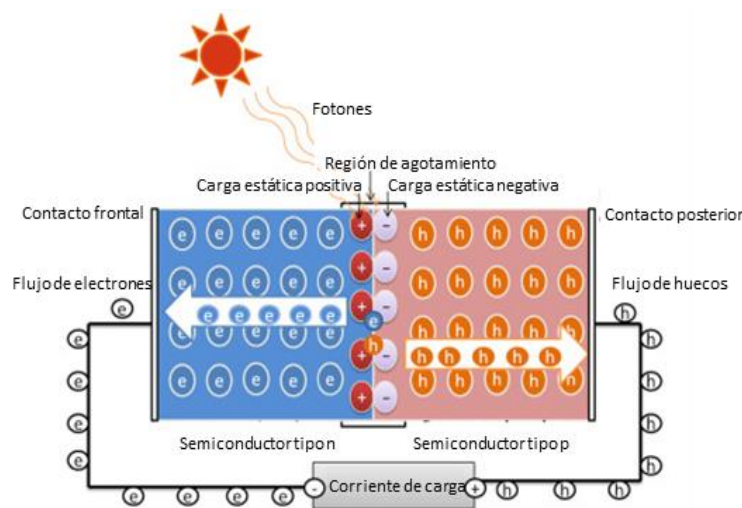


Figura 5. Representación esquemática del efecto fotovoltaico en una celda solar. Fuente: Simya, *et al.*, 2018.

### 1.3 Modelo de diodo

Las celdas solares son modeladas como diodos debido a que para su funcionamiento se requiere de la unión p-n, lo que se suele representar con el circuito eléctrico equivalente que se observa en la figura 6, el cual consta de una fuente de corriente que se induce debido al efecto fotovoltaico, un diodo en paralelo, una resistencia en paralelo  $R_p$  que se debe a la calidad de la unión p-n y es responsable de permitir la existencia de fugas de corriente; y una resistencia en serie  $R_s$  debida a la resistencia interna de los contactos metálicos y a los propios

semiconductores de la celda solar que permitirán la extracción de los portadores de carga. Por lo que el desempeño del dispositivo se ve afectado por ambas resistencias debido a que son pérdidas parasitarias (Carta, *et al.*, 2009).

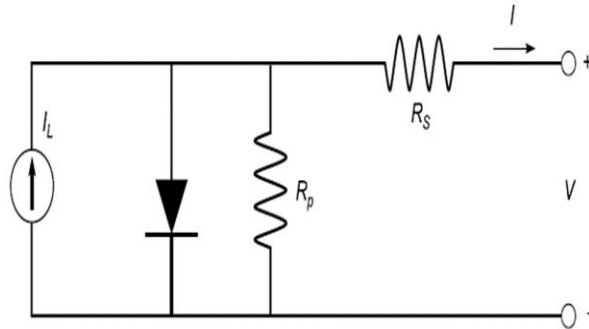


Figura 6. Circuito equivalente de una celda solar. Fuente: Carta, et al, 2009.

Mientras el modelo matemático que describe el comportamiento de la corriente de salida del dispositivo ( $I$ ) contra  $V$  es representado mediante la ecuación 1.

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \exp \left( \frac{q(V + IR_S)}{kTA} \right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_S)}{R_p} \quad (1)$$

Donde  $I_L$  es la corriente inducida por el efecto fotovoltaico,  $I_0$  es la corriente de saturación inversa,  $R_S$  es la resistencia en serie,  $R_p$  es la resistencia en paralelo,  $V$  es el voltaje,  $q$  es la carga elemental,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura absoluta de la celda y  $A$  es el factor de idealidad del diodo. Se tiene a partir de la ecuación 1 que el comportamiento I-V del dispositivo depende fuertemente de la irradiación y la temperatura, debido a que  $I_L$  depende de estos dos factores, mientras  $I_0$  depende de la temperatura (Roshan, *et al.*, 2013).

#### 1.4 Parámetros fotovoltaicos de salida (curva I-V)

Las mediciones de corriente contra voltaje (I-V) son un método para evaluar la calidad del comportamiento de las celdas solares bajo iluminación. En la figura 7 se muestra que a partir de la curva I-V se pueden observar los parámetros eléctricos de funcionamiento del dispositivo, los cuales se obtienen bajo condiciones estandarizadas internacionalmente, y se

conocen como Condiciones Estándares de Prueba, (STC, Standard Test Conditions), esto es con una iluminación de una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , un índice de Masa de Aire de AM 1.5 y una temperatura de operación de la celda de  $25^\circ\text{C}$  (Sánchez, *et al.*, 2017). Así bajo estas condiciones se realiza un barrido con diferentes valores para el voltaje y se mide la respuesta de corriente del dispositivo.

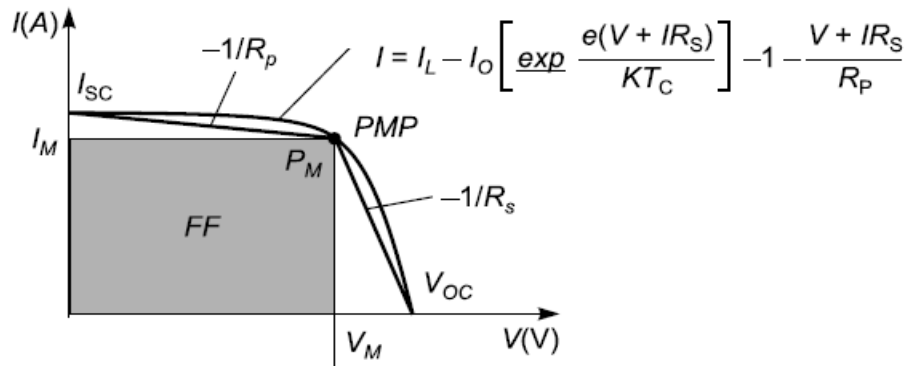


Figura 7. Curva I-V de una celda solar con sus principales parámetros. Carta, *et al.*, 2009.

#### 1.4.1 Corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ )

Es la corriente que se obtiene de la celda cuando el voltaje en sus terminales es nulo, es decir, está en corto circuito. Por lo que es la máxima corriente que se puede obtener del dispositivo, este valor dependerá principalmente del número de fotones absorbidos, pero también de generación y recolección de los portadores de carga (Carta, *et al.*, 2009).

#### 1.4.2 Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )

Es la cantidad de voltaje que proporciona una celda solar cuando se encuentra a circuito abierto, es decir, las terminales de la celda no están conectadas a una fuente variable ni a ninguna resistencia externa, por lo que no tiene una carga eléctrica circulando a través del dispositivo y es valor máximo de voltaje que genera la celda a circuito abierto.

#### 1.4.3 Potencia Máxima ( $P_{max}$ )

Es la máxima potencia que puede desarrollar la celda solar conectada a una carga eléctrica y su valor se define como el producto de la corriente máxima y el voltaje máximo y está dado por la ecuación 2:

$$P_{max} = I_{max} * V_{max} \quad (2)$$

#### 1.4.4 Factor de llenado (FF)

El factor de llenado (FF por sus siglas en inglés, Fill Factor) es un factor de forma asociado a la curva I-V que proporciona gráficamente la cuadratura de la curva como se puede observar en la figura 7, se define como la razón de la potencia máxima ( $P_{max}$ ), entre el producto del voltaje a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) (ecuación 3). Este parámetro habla de la calidad de la celda solar ya que el valor máximo para el FF es de 1, por lo que al aproximarse a dicho valor el dispositivo es de mejor calidad.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (3)$$

#### 1.4.5 Eficiencia fotovoltaica ( $\eta$ )

La eficiencia de fotoconversión eléctrica ( $\eta$ ) o eficiencia fotovoltaica, es el parámetro más utilizado para comparar el rendimiento de las celdas solares. Y se define como la razón de la máxima potencia generada por la celda ( $P_{max}$ ) entre la potencia de la radiación solar incidente ( $P_{in}$ ), este parámetro se suele expresar como un valor porcentual y está dado por la ecuación 4:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} * 100 = \frac{J_{max} * V_{max}}{P_{in}} * 100 = \frac{FF * J_{sc} * V_{oc}}{P_{in}} * 100 \quad (4)$$

Donde  $J_{max}$  y  $J_{sc}$  corresponden a la densidad de corriente máxima y la densidad de corriente de corto circuito, respectivamente, ya que son la cantidad de corriente por unidad de área efectiva de la celda solar. Si esta caracterización no se realiza en condiciones estándares de prueba se ajusta  $P_{in}$  al valor de irradiancia G que incide en la celda.

### 1.5 Celdas orgánicas

Un compuesto orgánico es aquel que está formado principalmente por átomos de carbono e hidrógeno. Estos compuestos pueden también contener átomos de nitrógeno, oxígeno, azufre, halógenos, entre otros. Los átomos de carbono se unen por enlaces covalentes que pueden ser de dos tipos diferentes, sigma ( $\sigma$ ) o pi ( $\pi$ ). Los primeros son enlaces sencillos, es decir

sólo intervienen un par de electrones de los cuatro disponibles, mientras que en los enlaces  $\pi$  pueden existir un enlace doble o uno triple (intervienen 2 ó 3 pares de electrones); ambos enlaces ( $\sigma$  y  $\pi$ ) presentan diferentes propiedades electrónicas. Un caso se observa en la deslocalización de los electrones que ocurre cuando en el enlace participan 2 ó 3 pares de electrones, y en este caso se tiene una estructura conjugada (alternancia de enlace simple y doble) y que confiere al compuesto propiedades optoelectrónicas interesantes. Ya que los electrones en los orbitales  $p_z$ , es decir, electrones  $\pi$ , pueden deslocalizarse sobre toda la molécula, formando un orbital de enlace  $\pi$  con una energía más baja y un orbital antienlazante ( $\pi^*$ ) con una energía más alta. Las estructuras electrónicas consisten esencialmente en los orbitales moleculares ocupados más altos (HOMO) y los orbitales más bajos no ocupados (LUMO). El HOMO y el LUMO también se denominan como banda de valencia y de conducción. Además, las bandas mencionadas forman estructuras de banda directa en polímeros conjugados, lo que permite las transiciones electrónicas directas para electrones  $\pi$  a través del band gap (Barbosa, *et al*, 2012).

### **1.5.1 Funcionamiento de las celdas orgánicas**

A diferencia de las celdas inorgánicas, los materiales orgánicos suelen ser poco cristalinos o amorfos, y por tanto el concepto de orbitales deslocalizados y organizados en bandas de energía no es aplicable. Con todo lo anterior queda claro que tanto HOMO y LUMO juegan un papel similar al de las bandas de valencia y conducción en semiconductores inorgánicos. La absorbancia de los semiconductores orgánicos es mayor que la de los inorgánicos, lo que permite utilizar capas más finas de material y esto se debe a la fácil polarización eléctrica de los  $\pi$  electrones. La llegada de un fotón con la energía suficiente a un material denominado donador puede promover un electrón del HOMO al LUMO, creándose un par electrón-hueco o mejor conocido como excitón (figura 8-a). Debido al bajo valor de la constante dieléctrica en los semiconductores orgánicos, los portadores de carga del excitón están fuertemente ligados por fuerzas electrostáticas, y la probabilidad de separarlos es menor que en un semiconductor inorgánico. El excitón se desplaza por el material mediante difusión y es necesario que alcance la interfaz entre el donador y el aceptador, para que se produzca la separación del excitón en portadores libres de carga (figura 8-b). La longitud promedio de difusión del excitón antes de que los portadores de carga se recombinen y se emita un fotón, es de alrededor de 10 nm. Por ello, es importante que la interfase donador-aceptador se

encuentre a una distancia lo más pequeña posible del punto donde se genera el excitón. Por último, para poder recoger los portadores de carga generados, es necesario que los materiales donador y aceptador sean buenos transportadores de huecos y electrones, respectivamente, y que formen fases continuas que permitan a los portadores de carga alcanzar su correspondiente electrodo (ánodo y cátodo) (figura 8-c) lo que produce una diferencia de potencial, ya que también la movilidad de electrones y huecos, es decir la rapidez de carga eléctrica por unidad de campo eléctrico aplicado, es otro factor muy importante para el óptimo funcionamiento de las celdas orgánicas (Alcázar y Ramírez, 2014 ).

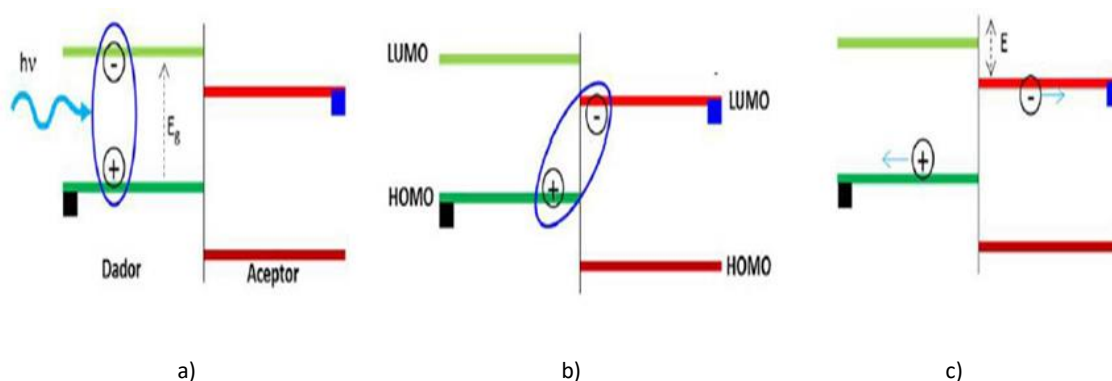


Figura 8. Esquema de la generación del excitón y su separación en portadores de carga a) absorción del fotón, b) transporte del excitón hasta la interface donador-aceptor, c) Transporte de los portadores de carga a su respectivo electrodo. Fuente: Alcázar y Ramírez, 2014.

## 1.6 Celdas solares híbridas

Si bien en el mercado domina la tecnología basada en silicio, con una participación del 90%, se espera que empiecen a ganar terreno en los próximos años tecnologías basadas en CdTe, CIGS, además de las celdas solares de tercera generación (Xu, *et al*, 2018). Por lo que para obtener eficiencias que harían más competitiva a la tecnología basada en CdTe es necesario enfocar las investigaciones en disminuir las pérdidas debido a los defectos en las capas de los semiconductores, así como replantear cambios en la arquitectura tradicional (Nayak, *et al*, 2019). Lo que supone aprovechar el desarrollo en las diferentes tecnologías de celdas solares y aplicarlo en un desarrollo híbrido que puede ayudar a alcanzar un mejor desempeño de los dispositivos.

Al plantear una celda solar híbrida de CdTe, se parte del uso de una estructura tradicional de esta tecnología (figura 9-a) que está conformada por compuestos inorgánicos: un contacto frontal que es un óxido conductor transparente (TCO por sus siglas en inglés, transparent conducting oxide), una película del semiconductor tipo n de sulfuro de cadmio (CdS) que es la capa ventana y que hará la heterounión con la siguiente capa, una película del semiconductor tipo p de telurio de cadmio (CdTe) que es la capa absorbente y finalmente se tiene un contacto metálico que es el contacto posterior. Al introducir un semiconductor orgánico en la estructura base se obtiene un dispositivo híbrido. La investigación y desarrollo en este nuevo campo es necesario para alcanzar mayores eficiencias debido a que a su vez es preciso llegar a un entendimiento teórico de las interfaces que se pueden presentar. Sin embargo, el hecho de usar semiconductores orgánicos parte de la idea de que no hay enlaces covalentes rotos en su superficie, con lo que no debería haber centros de recombinación con la interfaz inorgánica, además por el tamaño de las moléculas queda limitada su difusión en los semiconductores inorgánicos y se evita la formación de centros de impurezas (Bereznev, *et al*, 2007).

Algunos de los semiconductores orgánicos que han sido utilizados en las celdas de CdTe son: el spiro-OMeTAD donde se obtuvieron mejores valores de  $V_{oc}$  y  $I_{sc}$ , debido al efecto dipolo interfacial y a la reducción de la recombinación de los portadores de carga (Du, *et al*, 2015), se ha usado el P3HT que a pesar de ser un material absorbente demostró que puede ayudar a la extracción de huecos del contacto posterior, y a su vez logra cubrir las fisuras en las fronteras de grano del CdTe con lo que hay aumento en la uniformidad de la respuesta fotovoltaica en los dispositivos, especialmente un aumento en el  $V_{oc}$  (Major, *et al*, 2017); y se ha estudiado el uso del PEDOT:PSS debido a sus propiedades de capa transportadora de huecos, por su alta conductividad y debido a su alta función de trabajo de 5 eV es una buena opción para hacer un buen contacto óhmico con el CdTe; se ha encontrado que existe una buena interfaz entre el CdTe y el PEDOT:PSS porque hay una pequeña recombinación de los portadores de carga en esta zona y por lo mismo hay un aumento del  $V_{oc}$  y  $I_{sc}$  (Khyapunov, *et al.*, 2010), el depósito del polímero suaviza la superficie granular del CdTe con lo que se ayuda al transporte de los portadores de carga (Varadharajaperumal, *et al*, 2019), y se ha encontrado que a su vez puede cubrir los pinholes que existen en el CdTe y con una velocidad de rotación de 5000 rpm durante la deposición por centrifugado se puede obtener las mejores

características de esta capa al aumentar los valores de  $V_{oc}$  y  $I_{sc}$  (Reyes, 2020). En la figura 9-b se puede observar la arquitectura utilizada por Reyes (Reyes, 2020) para el desarrollo de celdas de área pequeña (2.5 x 2.5 cm), y es la base con la que se desarrollan los módulos fotovoltaicos de este trabajo.

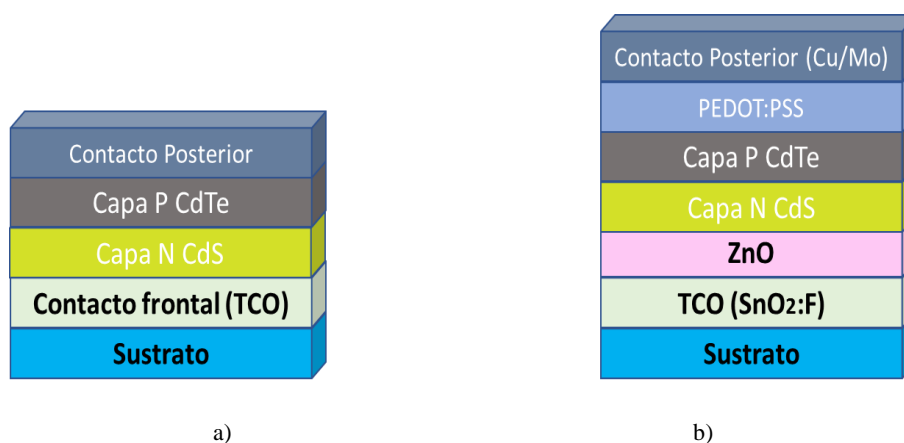


Figura 9. a) Arquitectura tradicional de celda de CdTe, b) arquitectura empleada por Reyes (Reyes, 2020) y la utilizada en este trabajo.

## 1.7 Interconexión eléctrica

La expresión 5 se conoce como la ley Ohm en honor de Georg Simon Ohm, con esta ley es posible determinar la relación entre tensión, corriente y resistencia en un circuito eléctrico. Debido a que esta ley muestra que la corriente que circula por un circuito eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial, e inversamente proporcional a la resistencia del circuito.

$$I = \frac{V}{R} \quad (5)$$

Ahora bien, se denomina circuito eléctrico al conjunto de cualquier número de componentes eléctricos que se encuentran conectados entre sí, con lo que se ofrece una ruta cerrada por la cual puede fluir la corriente; pueden tener una configuración de serie, paralelo o mixto, con lo que a partir de arreglos simples se puede llegar a arreglos más complejos. Gracias a estos circuitos es posible que la corriente que es generada, sea transportada y utilizada; por lo que

lo anterior aplica en celdas solares, que al poder ser interconectadas va a formar un módulo fotovoltaico que puede ofrecer un aumento en ciertos parámetros fotovoltaicos para el aprovechamiento de la corriente generada.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N \quad (6)$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_N \quad (7)$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_N \quad (8)$$

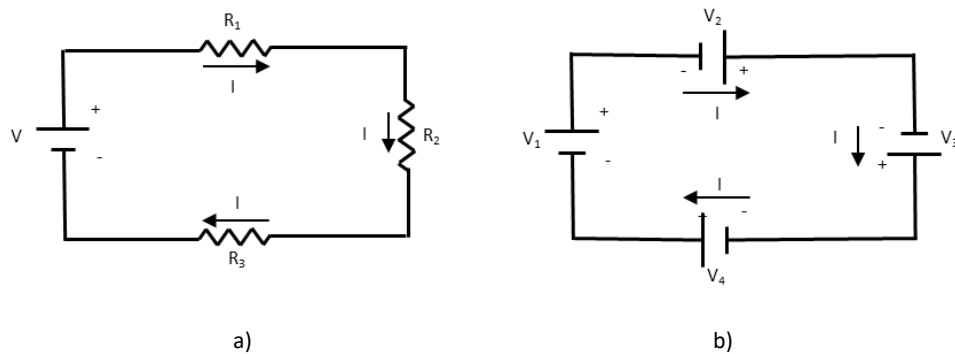


Figura 10. a) circuito básico en serie, b) circuito en serie de fuentes de voltaje.

Un circuito en serie es aquella configuración en la que los elementos tienen un solo punto en común, es decir una terminal de un elemento se encuentra conectada a una terminal del otro elemento, y a su vez cada terminal no se encuentra conectada a un tercer elemento portador de corriente (figura 10-a). En esta configuración la resistencia total del circuito será la suma de las resistencias individuales de los elementos conectados (ecuación 6), mientras que la corriente que circula por el circuito es la misma sin importar el orden en que se conectan los elementos (ecuación 7). Al conectar varias fuentes de voltaje (figura 10-b), el voltaje neto se determina sumando las fuentes con la misma polaridad y restando las polaridades opuestas (ecuación 8), debido a que la polaridad neta definirá el sentido en que se presiona a la corriente (Boylestad, 2004).

La interconexión en paralelo es aquella configuración en la que los elementos tienen dos puntos en común (figura 11-a). En este caso el voltaje de todo el circuito es el mismo (ecuación 9), pero la corriente debido a que toma diferentes caminos se divide en estos, así que se debe cumplir que la corriente neta sea igual a la suma de las corrientes en los elementos

presentes (ecuación 10). Para la resistencia total de los elementos colocados en paralelo se tiene que siempre es menor que el valor del resistor más pequeño; además al tener el mismo valor de voltaje se tiene que en cada elemento la corriente es inversamente proporcional al valor de la resistencia. Al conectar varias fuentes de voltaje (figura 11-b) en paralelo se aplican las mismas ecuaciones mencionadas (Boylestad, 2004).

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_N \quad (9)$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N \quad (10)$$

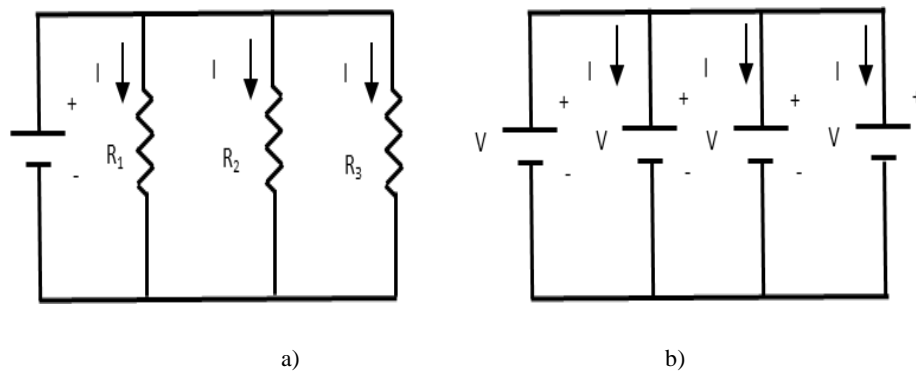


Figura 11. a) circuito básico en paralelo, b) circuito en paralelo de fuentes de voltaje.

Para el caso de los circuitos mixtos, se debe tener en cuenta el arreglo para poder hacer un análisis y aplicar las ecuaciones 6 a 10 de forma correcta y así realizar los cálculos de forma adecuada.

### 1.7.1 Interconexión eléctrica en celdas solares

Dentro de las tecnologías de interconexión más usadas en la industria fotovoltaica de silicio se encuentran la soldadura infrarroja, la soldadura puntual de láser, cintas conductoras o la pulverización de metal por arco térmico. Sin embargo, al tratar con película delgada como en las celdas de CdTe, las técnicas de interconexión cambian un poco pero finalmente el objetivo es el enlace de las películas conductoras.

Particularmente la compañía First Solar desarrolla su proceso de interconexión en serie de las celdas que componen cada módulo a través de la escritura láser. Dicho proceso resulta rentable para la empresa debido a que cuentan con la infraestructura necesaria, aunque no se

puede decir lo mismo para las universidades y centros de investigación en los que hay poca inversión para la investigación y desarrollo.

Una de las opciones que trae resultados consiste en usar cintas similares a las que se ocupan en las celdas de silicio, con la diferencia de que no es necesario llevar un proceso de soldadura, sino que se usan cintas adhesivas de cobre. Estas cintas se aplican en celdas que ya están aisladas, sin embargo, se debe tomar en cuenta que con el tiempo el adhesivo con el que se adhieren a los contactos posteriores o frontales se puede degradar y generar una capa aislante que afecta el contacto del cobre con los contactos de la celda.

El uso de la escritura láser permite llevar a cabo la interconexión monolítica de los módulos fotovoltaicos, con beneficios de disminuir la resistencia en serie y el aumento del voltaje del dispositivo final debido a la interconexión (Perrenoud, *et al*, 2011). Dicho proceso se realiza en tres etapas (P1, P2, y P3, como se observa en la figura 12) donde la primera etapa se usa para erosionar el TCO, la segunda etapa implica la erosión de la capa ventana y absorbente y finalmente la tercera etapa consiste en la erosión del contacto posterior, con lo que se obtiene la interconexión en serie de las celdas. Sin embargo, se deben hacer correctamente los trazos para evitar dañar las celdas, debido a que es posible introducir nuevos defectos como los provocados por los procesos térmicos, las microfisuras, la delaminación de las películas y la falta de una correcta limpieza después del proceso debido a los materiales residuales que puedan crear rutas de cortocircuito (Wang, *et al*, 2015).

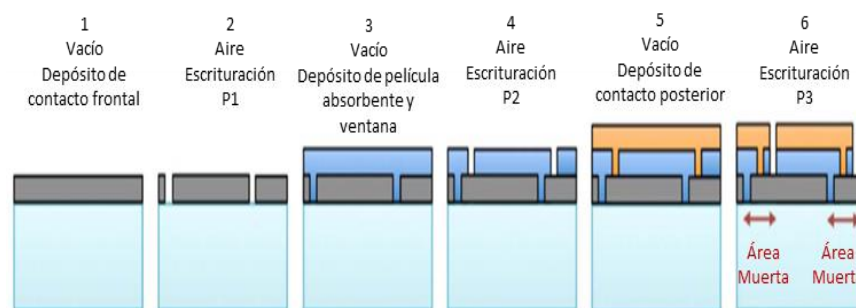


Figura 12. Proceso de interconexión en serie por medio de escritura láser con sus tres etapas (al aire libre) y el depósito de las películas de una celda de CdTe (en vacío), señalando el área muerta que no se puede aprovechar. Fuente: Field, et al., 2017.

Adicionalmente la investigación en este método aún continúa, ya que usualmente se utiliza más un láser infrarrojo y ultravioleta, pero se ha estudiado la alternativa de usar un solo láser en una longitud de onda de 532 nm para todo el proceso, lo que implica reducir costos (Jiménez, *et al*, 2015). También se propone la interconexión de los módulos a través de un proceso de impresión de una tinta conductiva y aislante (los mejores resultados se dan con tintas de nanopartículas de plata y el polímero polimetilmetacrilato (PMMA), respectivamente), en combinación con una escrituración de un solo paso en vez de tres (figura 13), debido a que se busca evitar la generación de centros de impurezas que puede generar cada paso de escrituración previo al depósito de la siguiente película de la celda solar. Asimismo se busca aumentar la superficie que contribuye con la generación fotovoltaica (Fields, *et al*, 2017).

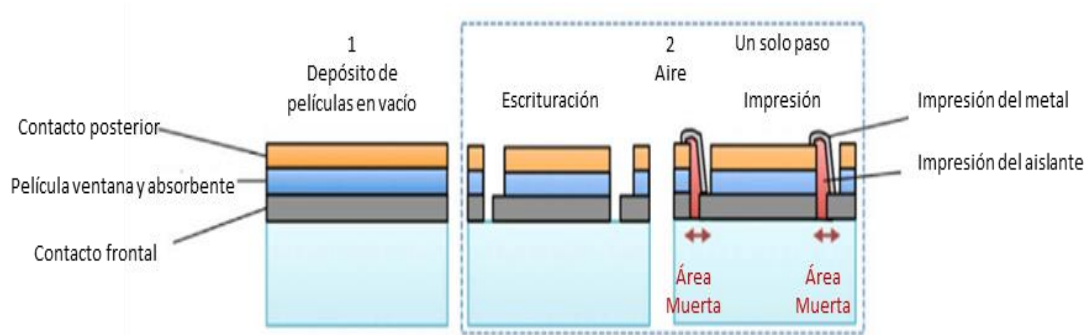


Figura 13. Proceso de interconexión en serie por medio de la impresión de una tinta conductiva y una aislante al aprovechar la escrituración láser de un paso (al aire libre), posterior al depósito de las películas de una celda de CdTe (en vacío), se señala el área muerta que no se puede aprovechar. Fuente: Fields, *et al.*, 2017.

## Capítulo 2 – METODOLOGÍA

En este capítulo se abordan los procesos para la elaboración de un módulo fotovoltaico híbrido de CdTe y PEDOT:PSS con base en la arquitectura de la figura 9-b, así como los pasos que conllevan a la obtención de un prototipo encapsulado (ver figura 14). Se realiza una breve descripción de los diferentes materiales involucrados en cada capa de la arquitectura del módulo, las técnicas con que se incorporaron al mismo, los parámetros y demás cuestiones experimentales que son esenciales para la realización de este trabajo.

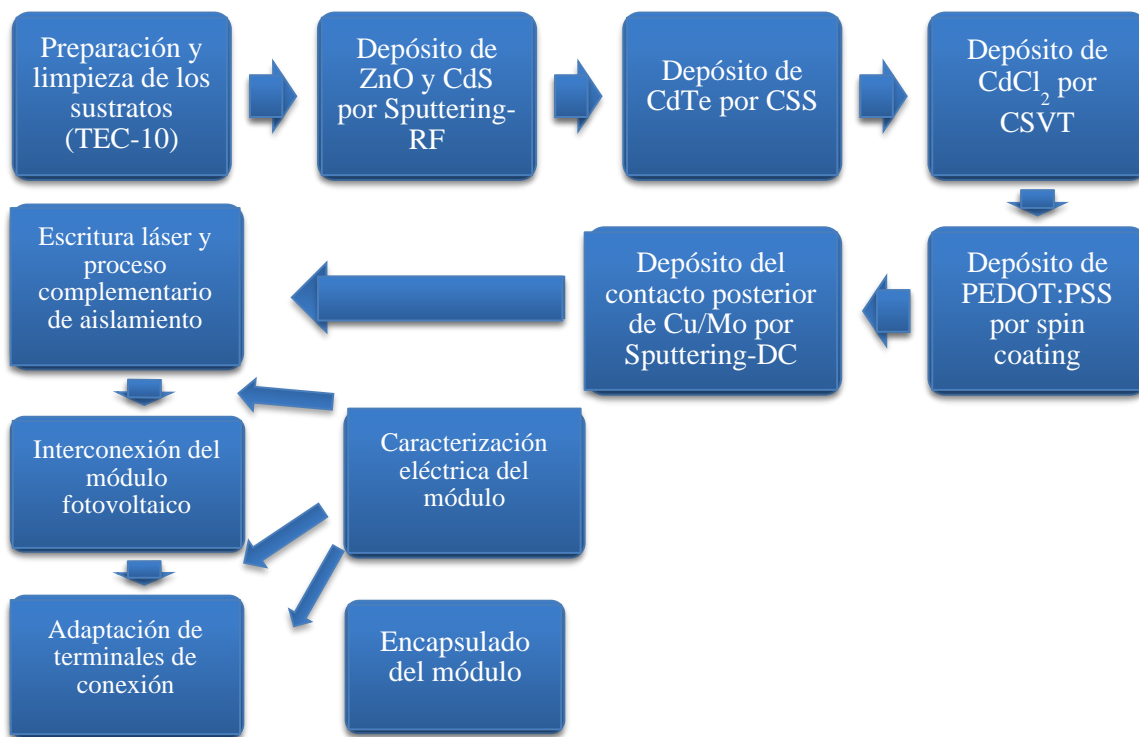


Figura 14. Procedimiento para la elaboración de prototipos de módulos fotovoltaicos híbridos de CdTe y PEDOT:PSS.

### 2.1 Preparación y limpieza de los sustratos

Para la elaboración de los módulos fotovoltaicos se emplearon como sustratos, vidrios que cuentan con una película de óxido de estaño dopado con flúor ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ), dicha capa es esencial ya que es el contacto frontal del dispositivo. Se usó vidrio TEC-10 de la marca Pilkington que cuenta con las propiedades físicas que se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones del sustrato TEC-10.

	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Transmitancia (%)</b>	<b>Resistividad laminar (Ohm/cuadrado)</b>
<b>NSG TEC™ C10</b>	3.2	83	10

### 2.1.1 Preparación de los sustratos

Se emplea una cortadora de vidrio semiautomática modelo CVRF 1.2 debido a que los vidrios se reciben en medidas de 1 pie<sup>2</sup> (30.48 x 30.48 cm) y se deben preparar para las especificaciones de este trabajo que son sustratos de 10 x 10 cm.

Posteriormente se usa una lijadora de banda con disco de lijado automático modelo Bosch GBS 75 AE para lijar las orillas y excesos que puedan presentar los vidrios, con la finalidad de que estos embonen correctamente en cada uno de los porta-sustratos de los equipos que se emplearon para el depósito de los diferentes materiales que componen a los módulos.

### 2.1.2 Limpieza de los sustratos

La limpieza de los sustratos es esencial para retirar cualquier residuo o impureza que pueda afectar el desempeño del dispositivo y se puedan depositar en él todas las películas de los materiales utilizados. El proceso de limpieza se describe con los siguientes pasos:

1. Se prepara una disolución de jabón alcalino de la marca HICLIN-PLUS con 10 ml de jabón y 15 ml de agua. A continuación, los vidrios se frotran con una gasa mojada en la disolución por ambas caras del vidrio.
2. Cada uno de los sustratos se enjuagan con abundante agua destilada para retirar el exceso de la disolución y se colocan en un porta-sustratos de teflón y acero inoxidable que mantiene separado a cada vidrio.
3. El porta-sustratos se introduce en un vaso de precipitados con agua destilada con la cantidad suficiente para cubrir los vidrios. A continuación, se colocan en una parrilla y se lleva hasta el punto de ebullición, donde permanecerán 10 minutos. Una vez pasado el tiempo se colocan en un baño ultrasónico (CPN-952-516 Branson) durante 10 minutos.

4. Después se repite el paso 3 usando acetona y finalmente alcohol isopropílico.
5. Finalmente se retiran los vidrios del alcohol isopropílico con el uso de pinzas limpias y se secan con Nitrógeno industrial de 99% de pureza, se guardan envueltos en papel aluminio y se almacenan hasta su uso.

## 2.2 Depósito de ZnO/CdS

El primer material que se deposita es el semiconductor tipo-n óxido de zinc (ZnO) el cual posee un ancho de banda prohibida de alrededor de 3.37 eV, a causa de este alto valor es un candidato perfecto como ventana óptica en celdas solares, en varistores y aplicaciones de dispositivos optoelectrónicos (Pérez, et al, 2008).

Dentro de la arquitectura del dispositivo, se usa como capa “buffer” debido a que se suelen usar materiales con un band gap superior a 2.4 eV, ya que se requiere que sea un material altamente resistivo, pero a la vez altamente transparente, lo que se puede conseguir con espesores de 50-150 nm para disminuir la absorción de la radiación incidente (Vallejo, 2011). Como resultado se consigue reducir los efectos de corto circuito que pueden surgir por los defectos en la película de CdS y adicionalmente dificulta la difusión de impurezas provenientes del sustrato (Bosio, *et al*, 2018).

El segundo material en depositarse es el semiconductor tipo-n sulfuro de cadmio (CdS), esta película se conoce como capa ventana, puesto que posee un band gap de 2.47 eV con lo que permite el paso de una parte importante del espectro solar que será absorbido por la capa absorbente. Este material logra una excelente heterounión con el CdTe, e incluso por sus propiedades tiene un uso difundido en las celdas de cobre indio selenio (CIS) (Vázquez, 2015). Se requiere que el espesor de esta capa no sea tan grande, porque un alto valor en este parámetro contribuye con la pérdida de la corriente generada.

El depósito de las películas de ZnO/CdS se realizó mediante un sistema de erosión catódica magnetoplanar de radiofrecuencia (sputtering-RF) (figura 15), que funciona con el fenómeno de erosión catódica magnetoplanar, la cual es una técnica de recubrimiento al vacío para depositar metales, aleaciones y compuestos. Su principio de funcionamiento requiere de administrar energía a un magnetrón, para aplicar al “blanco” un voltaje negativo usualmente de -300 V o más, con ese voltaje se atraen iones energéticos de un gas inerte (usualmente

argón o helio) a la superficie del blanco con lo que se expulsan los átomos o moléculas del mismo. Los átomos se depositan sobre un sustrato formando una película, cuyo espesor puede ser controlado con facilidad. Este proceso prácticamente no tiene restricción al tipo de material para erosionar y se usan fuentes de potencia RF para materiales semiconductores o aislantes (Tudose, *et al*, 2019).

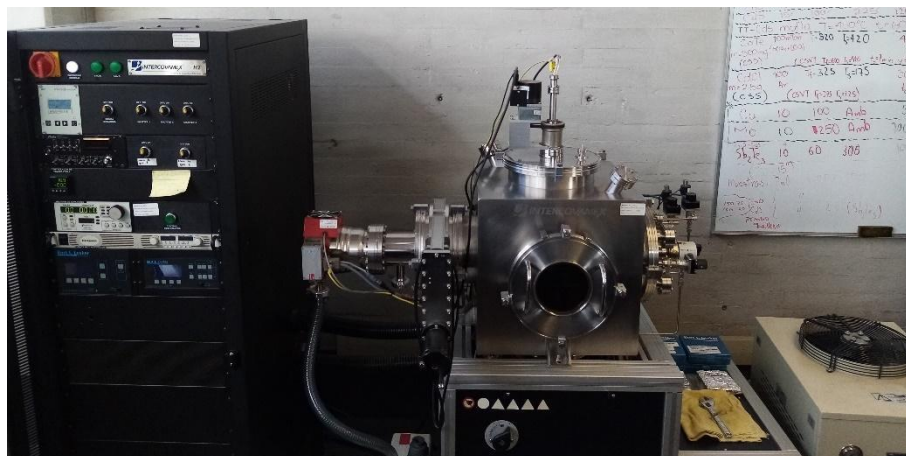


Figura 15. Sistema de erosión catódica magnetoplana de radiofrecuencia (Sputtering-RF).

Una vez que el sustrato está dentro del sistema en el porta-sustratos, se procede a realizar un vacío primario y un alto vacío, posterior a ese paso se deja ingresar un flujo de argón, que será el gas que se ionice y erosione a cada blanco. Para este trabajo se procesaron tres módulos fotovoltaicos, y los parámetros empleados en los depósitos de cada uno para la temperatura del sustrato, la presión interna de la cámara y la potencia suministrada se pueden observar en la tabla 2. Adicionalmente se pueden observar los tiempos de depósito y los espesores que registra el equipo.

Tabla 2. Parámetros del depósito de ZnO/CdS.

	Material	T <sub>s</sub> (°C)	P (W)	t <sub>d</sub> (min)	d (nm)
<b>RF52</b>	ZnO	250	140	60:00	91.4
	CdS	225	100	35:00	141
<b>RF53</b>	ZnO	250	140	51:30	90.6
	CdS	225	100	38:00	132

<b>RF54</b>	ZnO	250	140	51:30	90
	CdS	225	100	31:00	118.9

El depósito de estas películas se realiza en un proceso continuo, con lo que no hay necesidad de abrir el sistema y romper el vacío al interior de la cámara de crecimiento, debido a que el mismo cuenta con tres magnetrones que permiten el depósito de tres materiales diferentes sin tener que sacar el sustrato del equipo para realizar un cambio de blanco en el magnetrón.

Una vez depositados los semiconductores se procede a realizar un tratamiento térmico en una mufla a 480°C durante 60 minutos al aire, con la finalidad de mejorar la calidad cristalina de los materiales. En la figura 16, se puede observar la película de ZnO/CdS depositada sobre uno de los sustratos, aunque en realidad resalta la capa de CdS (de color amarillo), mientras la capa de ZnO solamente se puede apreciar en las orillas del CdS como una capa de un color azul a morado.



Figura 16. Muestra con depósito de ZnO/CdS.

### 2.3 Depósito de CdTe

Dentro de la arquitectura del dispositivo, el telurio de cadmio (CdTe) se conoce como capa absorbente, este material es un semiconductor tipo p que ha sido reconocido por su potencial para las celdas solares de película delgada, a causa de su ancho de banda prohibida de 1.44

eV y su alto coeficiente de absorción mayor a  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ . Debido a lo anterior puede absorber aproximadamente el 90% de la radiación que incide sobre él en una capa de  $1 \mu\text{m}$  de espesor, con lo que es posible obtener celdas solares con espesores de CdTe de 1 a  $3 \mu\text{m}$  (Chu y Chu, 1993).

A causa de que el CdTe es un material policristalino, existen problemas asociados a las fronteras de grano que afectan el desempeño de las celdas solares. Estas fronteras actúan como centros de recombinación eléctrica de los pares electrón-hueco generados, a su vez son barreras para los portadores de carga y puede causar fugas de corriente significativas. Una forma de disminuir los problemas asociados con estas fronteras de grano es al aumentar el tamaño de los granos, lo que se consigue con altas temperaturas durante el depósito de este material (Gómez, *et al*, 2013). Ya que los dispositivos con las mejores eficiencias se consiguen al depositar el CdTe con procesos de alta temperatura, mientras los procesos de baja temperatura se usan en celdas flexibles donde se evitan las altas temperaturas.

El depósito de la película de CdTe fue realizado en el sistema de sublimación de espacio cercano (CSS por sus siglas en inglés, Close Sublimation System). Este proceso de recubrimiento del sustrato es esencialmente una deposición de vapor químico que se realiza con el vapor generado localmente, es decir a partir de material sublimado, y una reacción inversa de deposición que no genera subproductos. Para llevar a cabo el depósito la fuente y sustrato deben estar separados por una distancia pequeña, y la fuente se ajusta con una mayor temperatura que el sustrato. El uso de gases es como gas de depósito, para crear una atmósfera apropiada para la deposición, para purgar y ventilar la cámara del sistema (Amin y Rahman, 2017). Un beneficio de procesar al CdTe con esta técnica es la obtención de un mayor tamaño del grano, con lo que se disminuyen las fronteras de grano transversales que disminuyen el camino libre medio y la vida media de los portadores de carga. Sin embargo, se empiezan a presentar pinholes en la película, puesto que el espacio que existe entre los huecos de los granos aumenta (Bosio, *et al*, 2018).

El sistema con el que cuenta el LACyTES (figura 17) consta de dos bloques de grafito de alta densidad y baja porosidad para la fuente y el sustrato, ambos bloques cuentan con 5 lámparas infrarrojas cada uno, la función de estas lámparas es la de calentar los bloques a través de la potencia suministrada por el equipo con el fin de alcanzar las temperaturas deseadas, el

control de la temperatura en los bloques se realiza mediante dos termopares que se encuentran unos milímetros dentro de cada bloque.

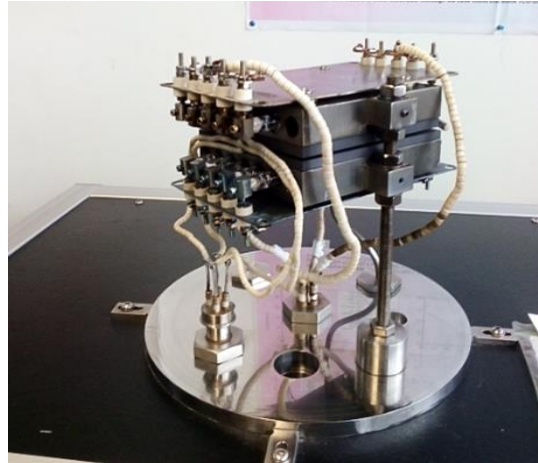


Figura 17. Sistema de sublimación de espacio cercano.

Aunque para los tres módulos se utilizaron parámetros experimentales con pequeñas variaciones, que se pueden apreciar en la tabla 3, esencialmente el proceso de depósito del CdTe es el mismo para los tres y se describe a continuación:

1. Se pesa en una balanza analítica el CdTe que se va a depositar, para el RF52 se usaron 300 mg, para el RF53 250 mg y en el RF54 se ocupó 200 mg. Posteriormente se coloca el material dentro del porta sustratos y se esparce uniformemente procurando que no queden espacios sin material. Después se coloca dentro del sistema entre la fuente y el sustrato.
2. Se cierra el sistema y se realiza un vacío primario y uno a alto vacío hasta alcanzar la presión de  $1.2 \times 10^{-4}$  hpa.
3. Se introduce en la cámara el gas argón y oxígeno, su acceso se regula por medio de un flujómetro, con lo que se introducen 15.2 sccm y 14.8 sccm, respectivamente. En este caso el oxígeno influye en el crecimiento del CdTe lo que ayuda a controlar los espesores del depósito.

4. Mediante los controladores del sistema se programan las temperaturas, y en función de la temperatura actual y la programada el sistema introduce potencia para alcanzar la temperatura asignada.

5. Se obtiene un depósito del material cuando se presenta aproximadamente un gradiente de temperatura de 70°C. Una vez pasado el tiempo de depósito planificado se suspende el flujo de potencia, el de los gases y se inicia el apagado del equipo.

Tabla 3. Parámetros de depósito para el procesamiento de películas delgadas de CdTe.

	<b>Ts (°C)</b>	<b>Tf (°C)</b>	<b>t<sub>a</sub> (min)</b>	<b>ΔT (°C)</b>	<b>d (μm)</b>
<b>RF52</b>	480	570	3:30	90	9.82
<b>RF53</b>	490	580	4:00	90	9.05
<b>RF54</b>	490	585	4:00	95	8.69

Una vez que se saca el sustrato del equipo se caracteriza en un perfilómetro KLA – Tenkor Modelo P-7, para conocer el espesor de la película de CdTe. Los valores obtenidos se pueden observar en la tabla 3. En la figura 18 se puede observar la película de CdTe depositada sobre uno de los sustratos.

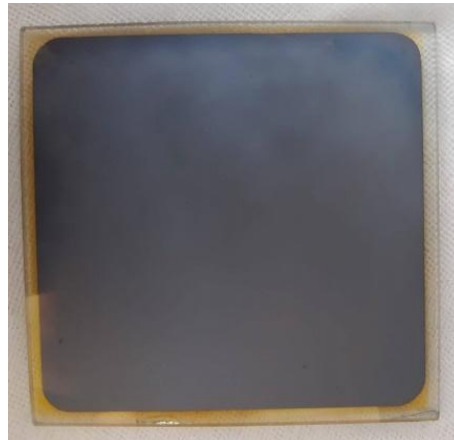


Figura 18. Muestra con depósito de una película delgada característica de CdTe.

## 2.4 Depósito de CdCl<sub>2</sub>

Al realizar un tratamiento térmico en una atmósfera que contenga cloro se logra una recristalización del CdTe y el mejor acomodo de los granos, así como una pasivación de las fronteras de estos. Con lo cual se puede obtener una mejor interdifusión de la heterounión del CdS y el CdTe, para obtener una disminución de la discontinuidad en la banda de conducción, lo que puede ayudar a mejorar el  $V_{oc}$  y la  $I_{sc}$ . (Vigil, *et al.*, 2004).

Para realizar el tratamiento térmico se deposita una película delgada de CdCl<sub>2</sub> sobre la película de CdTe, al realizar dicho depósito junto con el tratamiento térmico se pierde la superficie enriquecida en Te que se obtiene por usar el sistema CSS, porque el Cd que contiene CdCl<sub>2</sub> compensa el exceso de Te que existe. Así, la película de CdCl<sub>2</sub> fue depositada en el sistema de transporte de vapor en espacio cercano (CSV<sub>T</sub> por sus siglas en inglés, Close Spaced Vapor Transport). Esta técnica permite depositar un material que sublima a través de un gas inerte, con lo que se transporta el vapor desde la fuente hacia el sustrato donde se consigue una película del material. Para llevar a cabo el depósito; la fuente y el sustrato se colocan a una distancia muy pequeña, y la fuente se ajusta con una mayor temperatura que el sustrato, debido a que la diferencia de temperaturas es el mecanismo prevaleciente para el transporte del material (Zayas, 2011). Aunque prácticamente se presenta el mismo funcionamiento que en el CSS, la diferencia radica en que en el CSV<sub>T</sub> el papel de los gases como se ha mencionado es de transporte, mientras en el CSS el gas juega el papel de una atmósfera inerte.

El sistema utilizado (figura 19) consta de dos bloques de grafito de alta densidad y baja porosidad para la fuente y el sustrato, ambos bloques cuentan con 3 lámparas infrarrojas cada uno, el control de la temperatura en los bloques se realiza mediante dos termopares que se encuentran unos milímetros dentro de cada bloque, y en este caso el gas de arrastre que se usa es argón.



Figura 19. Sistema de transporte de vapor en espacio cercano.

Aunque para los tres módulos se utilizaron parámetros experimentales con pequeñas variaciones, que se pueden apreciar en la tabla 4, esencialmente el proceso de depósito del  $\text{CdCl}_2$  es el mismo para los módulos y se describe a continuación:

1. Se pesa en una balanza analítica el  $\text{CdCl}_2$  anhídrido que se va a depositar, en este caso para todos los módulos se usó 2.5 gr. Posteriormente se coloca el material dentro del porta sustratos y se esparce uniformemente procurando que no queden espacios sin material. Después se coloca dentro del sistema entre la fuente y el sustrato.
2. Se cierra el sistema y se realiza un vacío primario y un alto vacío hasta alcanzar la presión de  $3.9 \times 10^{-5}$  hpa.
3. Se introduce en la cámara el gas argón, su acceso se regula por medio de un flujómetro, con el que se introducen 13.5 sccm.
4. Mediante los controladores del sistema se programan las temperaturas, y en función de la temperatura actual y la programada el sistema introduce una potencia para alcanzar la temperatura asignada.
5. Se tiene depósito del material cuando se presenta aproximadamente un gradiente de temperatura de  $40^\circ\text{C}$  entre los bloques de grafito del sistema. Una vez pasado el tiempo de depósito planificado se suspende el flujo de potencia, el del gas y se inicia el apagado del equipo.

Tabla 4. Parámetros del depósito de CdCl<sub>2</sub>.

	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	t <sub>a</sub> (min)	ΔT (°C)
<b>RF52</b>	225	375	5:00	150
<b>RF53</b>	225	365	6:30	140
<b>RF54</b>	225	375	6:30	150

Después del depósito de CdCl<sub>2</sub> se realiza el tratamiento térmico a 400°C durante 35 minutos, con la finalidad de evaporar el Cl, oxidar la película de CdTe y obtener la recristalización del CdTe y el mejor acomodo de los granos como ya se ha mencionado.

Finalmente se realiza una limpieza superficial que consiste en rociar con agua desionizada la muestra y posteriormente secarla con nitrógeno, este proceso se repite dos veces y tiene como finalidad el retirar compuestos indeseados para los procesos posteriores como lo son Cl, CdCl<sub>2</sub> u óxidos. En la figura 20 se puede observar una de las muestras después de recibir el depósito de CdCl<sub>2</sub>.

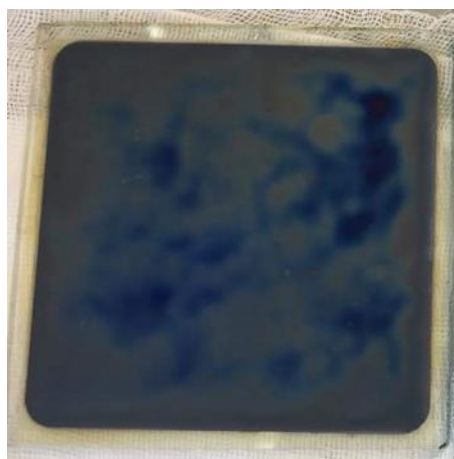


Figura 20. Muestra con depósito de película delgada de CdCl<sub>2</sub> sobre CdTe.

## 2.5 Depósito de PEDOT:PSS

El Poli(3,4-etilendioxitiofeno):poli(estirensulfonato) (PEDOT:PSS) consiste en una estructura conjugada PEDOT que es altamente conductiva, y el polímero PSS que ayuda a

mejorar la dispersión y estabilidad del PEDOT en agua y otros solventes, ha sido ampliamente investigado por su alta conductividad (1000 S/cm), su alta transparencia, su efecto de pasivación, su facilidad de depósito con diferentes técnicas y la posibilidad de ajustar ciertas propiedades que lo hacen ideal para su uso en dispositivos optoelectrónicos (Major, *et al*, 2017).

Además de los beneficios que se obtienen al mejorar la corriente extraída del dispositivo debido a su alta función de trabajo de 5 eV que lo hacen una buena opción para hacer un buen contacto óhmico con el CdTe (Khyapunov, *et al.*, 2010), es posible cubrir los pinholes del CdTe con lo que se evitan rutas de corto circuito, y al cubrir las fronteras de grano del CdTe se mejora la heterounión p-n (Reyes, 2020) así se mejora los valores de  $V_{oc}$  y de esta forma se reducen los centros de recombinación eléctrica de los pares electrón-hueco generados.

El depósito de la película de PEDOT:PSS se realizó a través de la técnica de deposición mediante centrifugado, por lo que se coloca el material en estado líquido sobre el sustrato y luego se hace girar a altas velocidades con lo que los disolventes orgánicos se evaporan dejando una película del material a depositar (figura 21). Lo anterior se realizó por medio de un equipo spin coating modelo WS-650. A través de este método se pueden obtener películas delgadas uniformes sobre diferentes sustratos que contengan otras películas delgadas obtenidas por otros métodos de depósito.

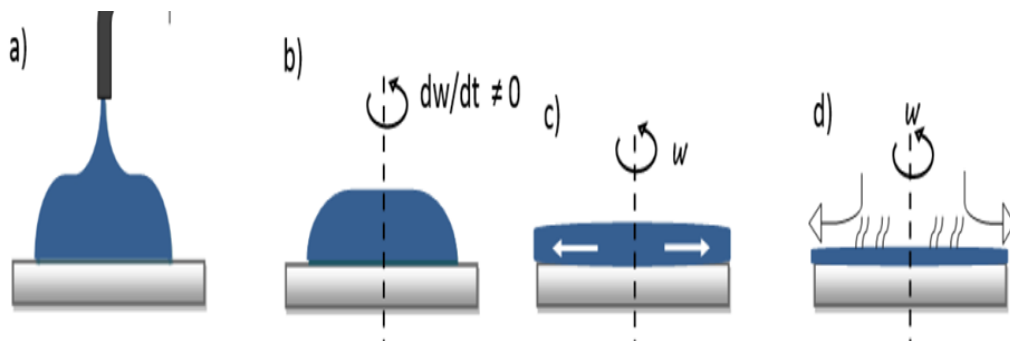


Figura 21. Deposición mediante centrifugado a) se coloca el material, b) la reacción a la aceleración centrípeta distribuye el material por el sustrato, c) la velocidad angular se mantiene constante y el material se dispersa, d) los disolventes orgánicos se evaporan dejando atrás una película del material a depositar. Fuente: Reyes, 2020.

En la tabla 5 se muestran los parámetros experimentales utilizados en cada uno de los depósitos del PEDOT:PSS, una vez depositada la película del polímero se somete a un tratamiento térmico durante 30 minutos para eliminar el agua que pudiera estar presente. Se buscó mantener una temperatura estable cercana a los 100°C durante el tratamiento térmico. En la figura 22 se observa uno de los módulos con la película de PEDOT:PSS y posterior al tratamiento térmico.

Tabla 5. Parámetros del depósito de PEDOT:PSS.

	Cantidad ( $\mu\text{l}$ )	Rpm	$t_d$ (min)	TT ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_{TT}$ (min)
<b>RF53</b>	3000	2000	1:00	99	30:00
<b>RF54</b>	3000	2000	1:00	98	30:00

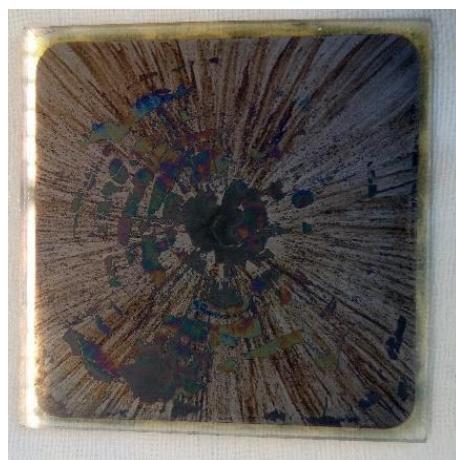


Figura 22. Muestra con depósito de PEDOT:PSS sobre sustrato de CdTe con TT.

## 2.6 Depósito de los contactos posteriores Cu/Mo

Para el contacto posterior se suelen usar metales, aleaciones o compuestos semimetálicos; con la finalidad de adquirir un contacto que permita el paso de los portadores de carga a través del material seleccionado. Usualmente se busca un contacto óhmico; es decir, aquel en que la corriente tenga una variación lineal con el voltaje aplicado, mientras que se evita contactos rectificantes que son aquellos en los que existe una barrera de potencial, lo que obstruye el paso de la corriente. En este sentido, el contacto frontal puede contribuir a la

resistencia en serie y afectar los parámetros fotovoltaicos del dispositivo, especialmente por el ancho de la banda prohibida del CdTe (Bätzner, *et al*, 2000).

Una manera con la que se logra encontrar un equilibrio entre la banda de valencia del CdTe y la función de trabajo del contacto posterior, es mediante la adición de una película muy delgada (unos pocos nm) de cobre debido a que se proporciona un dopaje tipo p a la superficie de CdTe con lo que se alcanza el equilibrio mencionado. Sin embargo, deben ser unos pocos nm debido a que el cobre se difunde con facilidad por las fronteras de grano de CdTe por lo que puede provocar rutas de corto circuito. Posteriormente sobre la interfase de cobre se deposita el contacto posterior, con lo que se espera reducir las pérdidas por resistencia laminar (Hall, *et al*, 2021).

En este trabajo se utiliza como contacto posterior el Cu/Mo, el depósito se realizó por medio de un sistema de erosión catódica magnetoplanar de corriente directa (Sputtering-DC), que al tratarse de la erosión de dos metales se usa una fuente de potencia de corriente directa (DC), en vez de la fuente de potencia RF que se usa en materiales altamente resistivos o aislantes (Tudose, *et al*, 2019).

Los parámetros experimentales que se usaron para el depósito de los contactos posteriores en los tres módulos se pueden ver en la tabla 6, incluyendo los espesores que registra el equipo, gracias a los sensores internos con los que cuenta. Aunque se aprecian pequeñas variaciones en la temperatura del sustrato y en los tiempos de depósito, esencialmente el proceso de depósito es el mismo para los tres módulos.

Tabla 6. Parámetros de procesamiento de los contactos de Cu/Mo.

	<b>Material</b>	<b>Ts (°C)</b>	<b>P (W)</b>	<b>ta (min)</b>	<b>d (nm)</b>
<b>RF52</b>	Cu	101	100	1:00	15
	Mo	100	250	18:00	300
<b>RF53</b>	Cu	110	100	1:00	16
	Mo	110	250	20:00	340
<b>RF54</b>	Cu	110	100	1:20	16
	Mo	110	250	24:30	300

El depósito de estas películas se realiza en un proceso continuo, con lo que no hay necesidad de abrir el sistema y romper el vacío, debido a que el mismo cuenta con dos magnetrones que permiten el depósito de dos materiales diferentes. Una vez depositado el contacto se realiza un tratamiento térmico dentro del mismo sistema a 200°C, durante 20 minutos y con una presión de 700 mTorr en una atmósfera de argón. En la figura 23, se pueden observar los 22 contactos depositados de Cu/Mo en uno de los módulos, cada uno de los contactos con un área de aproximadamente 2.54 cm<sup>2</sup>

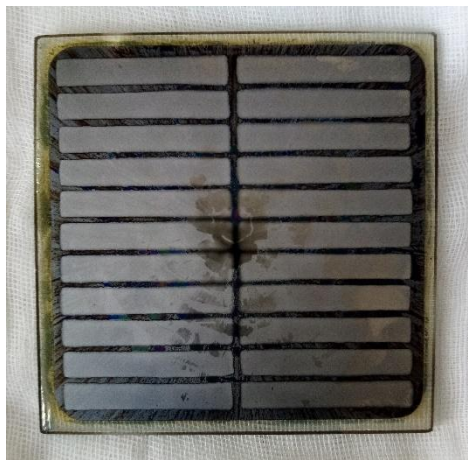


Figura 23. Muestra con depósito de los contactos de Cu/Mo sobre la heterounión CdS/CdTe.

## 2.7 Escritura láser del módulo

La resistencia en serie es uno de los principales problemas con los que se enfrenta el manufacturar celdas solares, debido a que implica pérdidas en el funcionamiento del dispositivo. Una causa de este problema se debe a la resistencia que existe entre el CdTe y el contacto posterior; otra causa es la resistencia entre el contacto frontal y el posterior con contactos metálicos. Por lo que una forma de reducir estas pérdidas, se consigue al reducir el área de contacto con elementos que propician resistencia eléctrica (Zarmai, et al, 2015).

Debido a lo anterior, se ocupa la técnica de escrituración láser que tiene como base de funcionamiento el incidir un rayo láser directamente sobre un material, el cual debido a la absorción de esa energía se calienta, llega a su punto de fusión y finalmente se erosiona; con

lo que se logra reducir el área de  $82 \text{ cm}^2$  que corresponde a la superficie de aprovechamiento del módulo, en 22 subceldas aisladas eléctricamente con una superficie efectiva de  $2.54 \text{ cm}^2$ .

Lo anterior se consigue con el sistema de escritura láser que se puede observar en la figura 24, y que se compone de un láser Explorer UV DPSS  $120 \mu\text{J}$  de un solo disparo de 1 kHz, una base de acrílico que se mueve en los ejes XY gracias al uso de un par de servomotores, y una computadora que cuenta con el software LabVIEW con el que se controla el láser, así como los servomotores. El proceso de escrituración láser utilizado durante este trabajo se describe con los siguientes pasos:

1. Se coloca el módulo en la cavidad de la base del acrílico móvil con los materiales depositados boca arriba para poder realizar una escritura directa, y se asegura en las esquinas con las tuercas mariposa para que el módulo no se mueva durante el proceso.
2. Mediante la interfaz del software que controla el sistema, se ajustan los parámetros de operación del láser en 4000 Hz y 4 A para poder realizar cada uno de los barridos.
3. Se utiliza la interfaz del software para que mover la base de acrílico de forma vertical y horizontal para realizar el proceso, para finalmente remover los materiales y aislar las 22 subceldas que componen cada módulo.

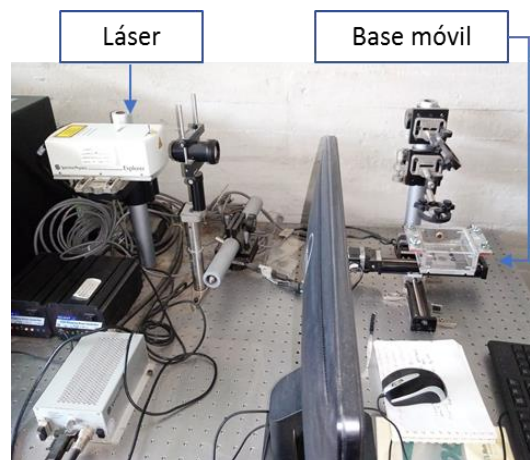


Figura 24. Estación de escrituración láser del LACyTES.

En la figura 25 se aprecia el trazo realizado por el sistema de escritura láser en uno de los módulos, con lo que se observa, además que todas las películas que habían sido depositadas sobre el sustrato han sido removidas. Sin embargo, para confirmar que se ha eliminado el  $\text{SnO}_2\text{:F}$  y por consiguiente se ha obtenido un aislamiento eléctrico local entre cada subcelda, se usa un multímetro y se realiza una prueba de continuidad, de esta forma se comprueba que no existe continuidad entre una subcelda y las subceldas contiguas.

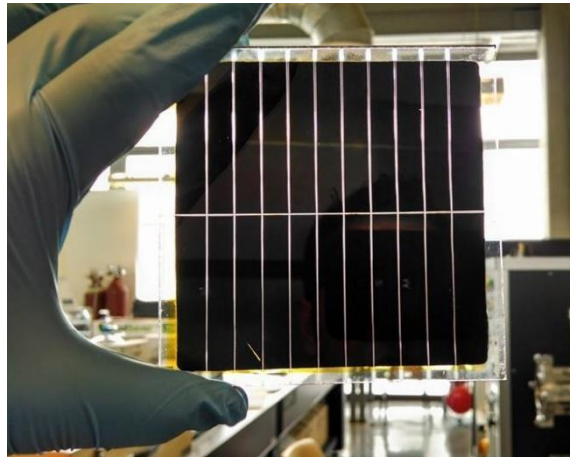


Figura 25. Trazado realizado por escritura láser para obtener el aislamiento de las subceldas de un módulo.

## 2.8 Proceso complementario de aislamiento

Para poder llevar a cabo la interconexión de las subceldas de los módulos es necesario proporcionar un puente de conexión entre los contactos posteriores de Cu-Mo (+) y los contactos frontales de  $\text{SnO}_2\text{:F}$  (-), este procedimiento se consiguió realizar con el uso de diferentes tintas conductoras. No obstante, al haber realizado la escritura láser se crearon diferentes rutas por las cuales la tinta puede difundirse, entrar en contacto con cualquiera de las películas que componen al módulo, y de esta forma provocar un corto circuito en el dispositivo que afectará su funcionamiento.

Para evitar crear rutas de corto circuito durante la interconexión, se realiza un proceso complementario de aislamiento para cubrir los trazos realizados durante la escritura láser. El proceso consiste en utilizar una tinta epóxica, este material ofrece una resistencia a agentes químicos corrosivos, evita cortocircuitos y protege de polvo y humedad la zona

donde se aplica. Adicionalmente, para poder realizar este proceso es necesario usar un catalizador, isoforona y acondicionador; que ayudan a que la tinta pase de un estado líquido a sólido y llegue a la composición y adherencia necesarias. El proceso de aislamiento mediante serigrafía se describe con los siguientes pasos:

1. Se prepara en un recipiente una mezcla homogénea con 4.5 g de resina epóxica, 1.5 g de catalizador, 0.45 g de acondicionador y dos gotas de isoforona
2. Se coloca la mezcla sobre la parte lateral de un abatelenguas de forma uniforme y se aplica de tal forma que coincida con el trazo realizado por el proceso de escrituración láser.
3. Se repite el paso 2 con cada uno de los trazos que aíslan a las 22 subceldas del módulo, además de cubrir las zonas en que puedan quedar expuestos los otros semiconductores, ya sea el CdS o el CdTe.
4. Se deja secar el módulo sobre una parrilla por 40 minutos a 60°C.

En la figura 26 se puede observar uno de los módulos en el que se ha completado el proceso de aislamiento de las subceldas con el uso de la tinta policat.



Figura 26. Aislamiento del módulo fotovoltaico mediante la utilización de tinta policat.

## **2.9 Interconexión eléctrica de los módulos fotovoltaicos**

Al estar aisladas eléctricamente las 22 subceldas, es necesario realizar la interconexión de estas para que la respuesta fotovoltaica desarrollada por cada una, pueda contribuir en una mejor respuesta del prototipo de módulo fotovoltaico. Este proceso tiene como base de funcionamiento la teoría de circuitos en serie, paralelo y mixto; debido a que se logró realizar interconexiones en serie, serie-serie y serie-paralelo con las subceldas de los módulos trabajados.

Así, la interconexión en serie de todas las subceldas que van a conformar el circuito se encuentran unidas una tras otra, por lo que el resultado esperado sería que se conserva el valor de la corriente generada y que el voltaje final sea la suma de los voltajes individuales, como se mencionó en las ecuaciones 7 y 8, respectivamente.

Para el caso de la interconexión en paralelo todas las subceldas están conectadas entre sí mientras comparten dos polos comunes, por lo que el resultado esperado sería que la salida de corriente generada sea la suma de las corrientes individuales, pero conserva el valor del voltaje como se mencionó en las ecuaciones 10 y 9, respectivamente.

Finalmente, las interconexiones mixtas se deben a que primero se interconectan 11 subceldas que corresponden a una mitad del módulo completo y posteriormente se realiza la interconexión de los medios módulos para obtener un módulo completo interconectado. Se determinó hacer la interconexión serie-serie y serie-paralelo en función de los valores obtenidos de los principales parámetros fotovoltaicos al interconectar los medios módulos. Así se podía determinar si aumentar el voltaje obtenido con la interconexión serie-serie o aumentar la corriente con la interconexión serie-paralelo.

### **2.9.1 Interconexión eléctrica del módulo fotovoltaico RF52**

La interconexión eléctrica consta de tres etapas: colocar la tinta conductiva sobre el contacto posterior, la interconexión en serie de las 11 subceldas que corresponden al medio módulo I y el medio módulo II, y la interconexión en serie de los dos medios módulos para obtener el módulo completo. Cada etapa se realizó mediante el uso de un plumón conductivo de níquel (Ni) de la marca Chemtronics, el cual tiene las características que se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de la tintura de níquel de la marca Chemtronics.

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
<b>Conductividad</b>	1.0-1.5 $\Omega$ /sq/mil
<b>Tiempo de secado completo</b>	24 horas (25°C)
<b>Buena resistencia química</b>	
<b>Buena flexibilidad</b>	
<b>Altamente adherente a la mayoría de los materiales</b>	

En la primera etapa de este módulo se estudió el comportamiento de la respuesta I-V, antes y después de usar Ni; el proceso consiste en colocar la tintura conductiva sobre las 22 subceldas mediante el trazo de líneas rectas de aproximadamente 5 cm de largo, mientras el ancho está dado por la punta de la pluma conductiva. El motivo para realizar este procedimiento es el de proponer un material de características eléctricas aceptables con el que se pueda llevar a cabo el proceso de interconexión. La tintura de Ni presenta ventajas debido a tener un bajo costo, ser fácil de manipular para las tres etapas que conforman el proceso de interconexión y debido a sus propiedades conductivas; precisamente por esta última característica se espera incrementar el flujo de corriente de cada subcelda, con lo que se hace conducir la energía generada de una forma eficiente debido a la resistencia que existe en el contacto posterior.

La segunda etapa consiste en realizar la interconexión en serie de las 11 subceldas que corresponden a cada mitad del módulo completo, con lo que se debe realizar un puente de conexión entre los contactos frontales de SnO<sub>2</sub>:F (-) y los contactos posteriores de Cu-Mo (+), en este caso la tinta conductiva también ayuda a incrementar el flujo de la corriente debido a la resistencia que presenta el SnO<sub>2</sub>:F.

Así, la interconexión del medio módulo I consiste en realizar un pequeño trazo con el plumón conductivo entre el contacto posterior de Cu-Mo (+) de la subcelda 1 y el contacto frontal de SnO<sub>2</sub>:F (-) de la subcelda 2, se continúa con esa secuencia hasta llegar a la interconexión del contacto posterior de Cu-Mo (+) de la subcelda 10 con el contacto frontal de SnO<sub>2</sub>:F (-) de la subcelda 11, dicha secuencia se puede observar en foto del medio módulo I (figura 27-a) y en el diagrama de la figura 27-b.

La interconexión del medio módulo II sigue la misma lógica, pero en este caso se debe empezar con un pequeño trazo del plumón conductivo entre el contacto posterior de Cu-Mo (+) de la subcelda 12 y el contacto frontal de SnO<sub>2</sub>:F (-) de la subcelda 13, se continúa con la secuencia hasta llegar a la interconexión del contacto posteriores de Cu-Mo (+) de la subcelda 21 con el contacto frontal de SnO<sub>2</sub>:F (-) de la subcelda 22, tal y como se puede en el diagrama de la figura 27-b.

Finalmente la tercera etapa consiste en realizar la interconexión en serie del medio módulo I y el medio módulo II, lo cual se lleva a cabo al realizar un pequeño trazo con el plumón conductivo entre el contacto posterior de Cu-Mo (+) de la subcelda 11 y el contacto frontal de SnO<sub>2</sub>:F (-) de la subcelda 12, con lo que se obtiene la interconexión del módulo completo, este último paso se puede apreciar en el diagrama de la figura 27-c.

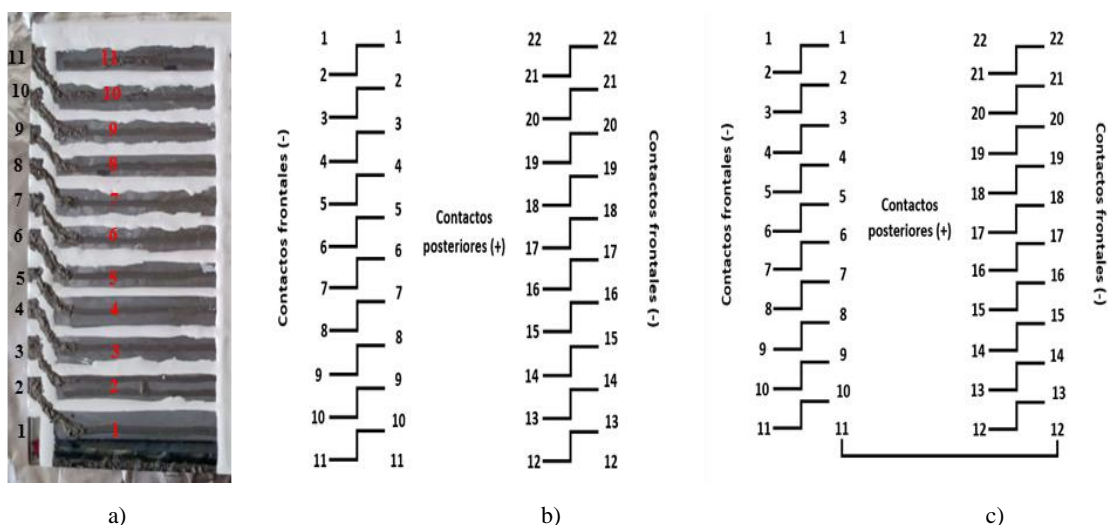


Figura 27. Interconexión del medio módulo RF52 a) foto del medio módulo I. Diagramas b) interconexión de las 11 subceldas del medio módulo I y II c) interconexión de los medios módulos.

## 2.9.2 Interconexión eléctrica del módulo fotovoltaico RF53

La interconexión eléctrica del módulo RF53 también consta de tres etapas: colocar la tintura conductiva sobre el contacto posterior, la interconexión en serie de las 11 subceldas que corresponden al medio módulo I y el medio módulo II, y la interconexión en paralelo de los dos medios módulos para obtener el módulo completo. A diferencia del módulo RF52, en este módulo se usó en una mitad un plumón conductivo de plata (Ag) de la marca

Chemtronics, el cual tiene las características que se presentan en la tabla 8, mientras que en la otra mitad se usó la tintura de Ni que se ocupó en el módulo RF52.

Tabla 8. Especificaciones técnicas de la tintura de plata de la marca Chemtronics.

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
<b>Conductividad</b>	0.02-0.05 $\Omega$ /sq/mil
	0.00005-0.000125
	$\Omega$ *cm
<b>Tiempo de secado completo</b>	20 a 30 minutos (25°C)
<b>Buena resistencia química</b>	
<b>Buena flexibilidad</b>	
<b>Altamente adherente a la mayoría de los materiales</b>	

En la primera etapa de este módulo se estudió el comportamiento de la respuesta I-V, antes y después de usar tintura de níquel (Ni) y de plata (Ag), así como la comparación entre ambos materiales, por lo que se asignó una mitad del medio módulo a cada tintura. Si bien el costo promedio de la tintura de Ag es mayor que la de Ni, debido a que el primero tiene un precio de \$1350 pesos M.N. y el segundo de \$350 pesos M.N., en este caso presenta un menor tiempo de secado con lo que se acelera el proceso de interconexión y presenta mejores propiedades conductivas en comparación al Ni; con lo que se espera incrementar el flujo de corriente de cada subcelda en que se aplique.

La segunda etapa consiste en realizar la interconexión en serie de las 11 subceldas que corresponden a cada mitad del módulo completo. Debido a que se realizó la interconexión en serie de cada medio módulo, el proceso descrito para la interconexión de los medios módulos del RF53 es muy parecido al que se realizó con los medios módulos del RF52. Aunque, con la diferencia de que en el medio módulo I las uniones entre los polos de las subceldas se realiza con la tintura de Ag, y se empieza con el contacto posterior de Cu-Mo (+) de la subcelda 2 y termina con el contacto frontal de SnO<sub>2</sub>:F (-) de la subcelda 11. Lo anterior se debe a la mala respuesta en los parámetros fotovoltaicos de la subcelda 1, por lo que esta subcelda no se tomó en cuenta para el proceso debido a que terminaría afectando la eficiencia

si se interconecta con las demás subceldas de la mitad I. La secuencia que se siguió se puede observar en el diagrama de la figura 28-a.

La interconexión del medio módulo II se hace exactamente igual que la realizada en el medio módulo II del RF52, incluso con el uso de la tintura de Ni. La secuencia se aprecia en el diagrama de la figura 28-a.

Finalmente la tercera etapa consiste en realizar la interconexión en paralelo del medio módulo I y el medio módulo II, lo cual se lleva a cabo al realizar un pequeño trazo con el plumón conductivo de Ag a un punto en común donde compartirán polo los dos medios módulos, primero se unen los dos contactos posteriores de Cu-Mo (+) de las subceldas 2 y 22 en un extremo del módulo, mientras en el otro extremo se hace un trazo para unir en un solo punto los dos contactos frontales de SnO<sub>2</sub>:F (-) de la subcelda 11 y 12, con lo que se obtiene la interconexión del módulo completo. Estos últimos pasos se pueden apreciar en el diagrama de la figura 28-b.

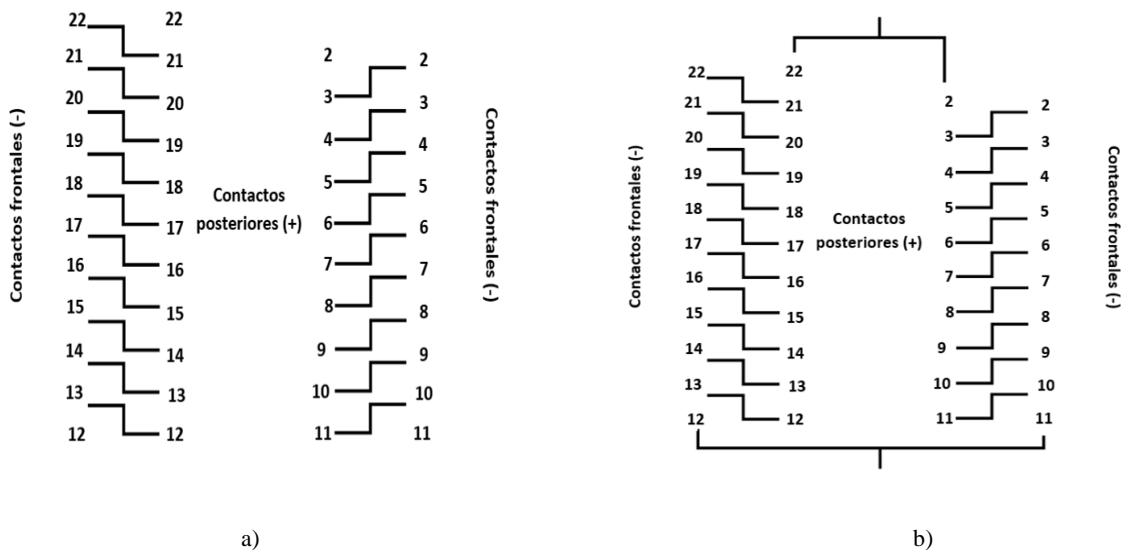


Figura 28. Diagramas de interconexión del módulo RF53 a) interconexión de las subceldas del medio módulo I y II b) interconexión de los medios módulos.

### 2.9.3 Uso de tinta conductiva de plata para la interconexión eléctrica de dos tipos diferentes para su comparación en el módulo fotovoltaico RF54

En el módulo RF54 se estudió el comportamiento de la respuesta I-V, antes y después de usar tintura de plata (Ag) de la marca Chemtronics y la marca BioFractal, las características de esta última se presentan en la tabla 9. Aunque en ambos casos se trata de Ag, estos productos presentan particularidades diferentes como lo es el tiempo de secado, una diferencia de precios con lo que resulta más barata la tintura de la marca BioFractal, además viene en una presentación de jeringa con aplicadores cónicos lo que facilita su uso, con lo que se obtiene un mayor rendimiento del material y se consiguen trazos más definidos y delgados en comparación con las plumas conductoras.

Tabla 9. Especificaciones técnicas de la tintura de plata de la marca BioFractal.

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
<b>Conductividad</b>	0.01 ohm/cuadrado
<b>Tiempo de secado completo</b>	1 hora (25°C)
<b>Buena resistencia química</b>	
<b>Buena flexibilidad</b>	
<b>Altamente adherente a la mayoría de los materiales</b>	

Para realizar una comparación entre las diferentes tinturas se utilizaron las especificaciones técnicas de los valores de resistividad y resistencia laminar, como se muestran en la tabla 8. Debido a que la pluma de Ag de la marca Chemtronics es la única que reporta ambos datos; de esta forma con los datos anteriormente mencionados y mediante el uso de la ecuación 11 que relaciona la resistencia laminar ( $\rho_s$ ), con la resistividad ( $\rho$ ) y el espesor del material ( $t$ ), se calcula que la mencionada marca obtiene sus resultados al considerar un espesor de 25 micras. Al suponer que se utiliza este valor del espesor para las otras tinturas utilizadas se puede llevar a cabo una comparación entre ellas, por lo que al ocupar nuevamente la ecuación 11 con el uso de los valores de resistencia laminar ( $\rho_s$ ) máximo y mínimo reportado por cada empresa, como se muestran en las tablas 7, 8 y 9, se obtiene un valor para la resistividad ( $\rho$ ). Una vez obtenido este valor es posible obtener mediante la ecuación 12 la conductividad eléctrica de un material ( $\sigma$ ) como el inverso de su resistividad ( $\rho$ ), ver tabla 10.

$$\rho_s = \frac{\rho}{t} \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (12)$$

Tabla 10. Comparación de resistencia laminar, resistividad y conductividad partiendo de los valores máximos y mínimos reportados por cada empresa.

		Resistencia laminar ( $\rho_s$ )	Resistividad ( $\rho$ ) ( $\Omega/\text{cm}$ ) $\times 10^{-4}$	Conductividad ( $\sigma$ ) ( $\text{S}/\text{cm}$ ) $\times 10^3$
Chemtronics	Níquel	1.5 $\Omega/\text{sq}/\text{mil}$	37.5	0.27
	Níquel	1.0 $\Omega/\text{sq}/\text{mil}$	25.0	0.40
	Plata	0.05 $\Omega/\text{sq}/\text{mil}$	1.25	8.0
	Plata	0.02 $\Omega/\text{sq}/\text{mil}$	0.5	20.0
BioFractal	Plata	0.01 $\Omega/\text{sq}$	0.25	40.0

## 2.10 Terminales de conexión

Este proceso consiste en la adaptación de dos bornes de polaridad negativa y positiva, que tienen el papel de conectores eléctricos, por lo que permiten realizar conexiones de cables para transmitir la energía generada por el módulo o incluso para efectuar otros arreglos de interconexión entre más módulos. Este proceso se realizó con base en lo reportado por Fierro (Fierro, 2020), debido a que resulta ser controlable y reproducible; la propuesta consiste en realizar este paso mediante la soldadura de cada bornera al contacto posterior y contacto frontal del módulo con el uso de cautín y soldadura de estaño-plomo, sin embargo, con la finalidad de lograr una mejor unión entre la bornera (cobre-estaño-latón) y los contactos del módulo, se utiliza cinta adhesiva de cobre (Cu) con la que se obtiene un mejor resultado una vez realizada la soldadura. El proceso de adaptación de los bornes se describe a continuación:

1. La ubicación de donde estarán las borneras se toma con base al arreglo de interconexión del módulo completo serie-serie o serie paralelo, por lo que se coloca

la cinta adhesiva de cobre sobre el contacto posterior de Cu-Mo (+) y sobre el contacto frontal de SnO<sub>2</sub>:F (-).

2. Se realiza la soldadura de la bornera de color rojo con la cinta de cobre que se encuentra sobre el contacto posterior de Cu-Mo, el proceso se realiza con el uso de caudín y la soldadura de estaño-plomo a una temperatura de 80°C.

3. Con el mismo método y temperatura del segundo paso, se realiza la soldadura de la bornera de color negro con la cinta de cobre que se encuentra sobre el contacto frontal de SnO<sub>2</sub>:F.

En la figura 29 se puede observar uno de los módulos con la adaptación de los dos bornes con los que se puede identificar la polaridad una vez realizado el proceso de encapsulado.

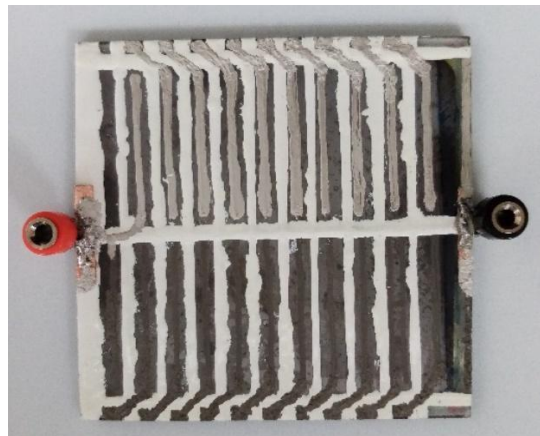


Figura 29. Módulo fotovoltaico con la adaptación de terminales de conexión eléctrica.

## 2.11 Encapsulado

El objetivo de realizar el proceso de encapsulado para los módulos fotovoltaicos procesados es el de evitar la degradación de todas las películas de los materiales utilizados, y preservar el proceso de interconexión y adaptación de las terminales. Por este motivo, se utilizó una resina epóxica desarrollada para el encapsulado de eléctricos y electrónicos de la marca Epolyglas, que cuenta con las características que se pueden observar en la tabla 10. Debido a estas propiedades, se aprecian varias ventajas para proteger los prototipos de módulos tanto de fenómenos físicos, naturales, así como de la manipulación de cualquier usuario: la

resistencia térmica supera el rango de operación en campo de un módulo, este polímero ofrece una resistencia a agentes químicos corrosivos, no encoge porque apenas presenta contracción, presenta una fácil aplicación, evita cortocircuitos y protege de polvo y humedad al dispositivo debido a que es prácticamente impermeable.

Tabla 11. Especificaciones de la resina epóxica utilizadas en el proceso de encapsulado.

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
<b>Tiempo de secado</b>	2–4 horas
<b>Rigidez dieléctrica</b>	100 kV/cm
<b>Temperatura de operación máxima</b>	120–130°C
<b>Resistencia a la tensión</b>	400 kgf/cm <sup>2</sup>
<b>Contracción</b>	0.05%
<b>Absorción humedad de sumergido</b>	24 hrs 0.06%

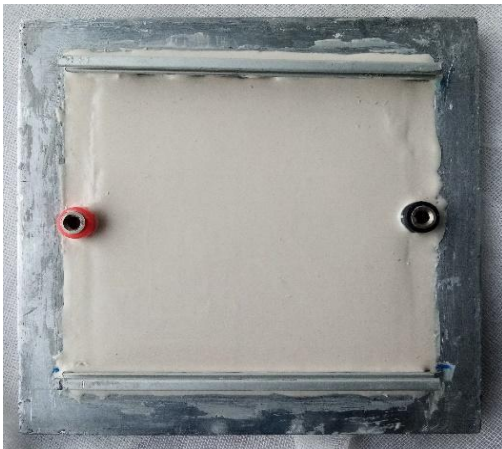
Adicionalmente, para poder realizar este proceso es necesario usar un endurecedor que ayudará a que la resina pase de un estado líquido a sólido debido a que tiene una función de catalizador; cera desmoldante que facilitará el proceso de desmoldar, un molde de aluminio y perfiles de aluminio. El proceso de encapsulado se describe a continuación:

1. Se aplica la cera desmoldante de forma uniforme sobre el lado no conductor del módulo mediante una gasa, del mismo modo se aplica sobre el molde de aluminio con el cuidado de cubrir todas las superficies internas.
2. Se agrega en un recipiente 100 gr de resina epóxica y 3.5 ml de endurecedor, a continuación, se mezclan ambos materiales hasta obtener una consistencia homogénea.
3. Se vierte sobre el molde la mezcla hasta cubrir el módulo por completo.
4. Después de 15 minutos de haber agregado la mezcla se colocan los perfiles de aluminio a los costados del módulo.

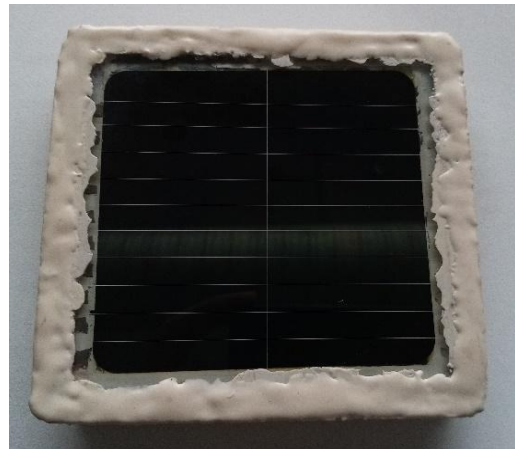
5. Se deja secar por 8 horas y después de ese tiempo se procede a desmoldar el módulo.

6. Finalmente es necesario limpiar con alcohol isopropílico en una gasa el residuo de la cera desmoldante que se encuentra sobre el lado no conductor del módulo.

En la figura 30-a se muestra el proceso mencionado en el molde de aluminio para obtener un prototipo de módulo fotovoltaico de  $100 \text{ cm}^2$  como se muestra en la figura 30-b.



a)



b)

Figura 30. Proceso de encapsulado de un módulo fotovoltaico, a) módulo dentro del molde de aluminio, b) módulo una vez desmoldado.

## 2. 12 Caracterización I-V

La caracterización de los módulos fotovoltaicos para obtener los parámetros característicos puede realizarse mediante simuladores solares; en este trabajo se realizaron las mediciones de corriente contra voltaje (I-V) con el simulador solar Oriel certificado clase AAA (figura 31), la primera letra corresponde al rendimiento espectral, la segunda letra a la uniformidad de la irradiación para el área de trabajo y la tercera letra la estabilidad temporal de la luz de salida evitando fluctuaciones; donde la clasificación contempla como valor máximo A y el mínimo C. El equipo cuenta con una lámpara de Xenón que es alimentada por una fuente de atenuación variable para la salida de 0.1 a 1.0 SUN ( $100$  a  $1000 \text{ W/m}^2$ ) y un filtro de corrección espectral AM 1.5.



Figura 31. Simulador solar Oriel certificado clase AAA.

Se realizó la caracterización I-V después de obtener el aislamiento local de las subceldas que componen el módulo fotovoltaico a través de la escritura láser, una vez que se les colocó la tinta conductiva a las subceldas, al realizar la interconexión de las 11 subceldas de cada medio módulo, al hacer la interconexión de los medios módulos I y II, al efectuar la adaptación de las terminales de conexión eléctrica y finalmente cuando se encapsularon los módulos fotovoltaicos procesados. Lo anterior con la finalidad de obtener los parámetros fotovoltaicos de salida del dispositivo en cada uno de los procesos realizados y a su vez con la intención de conocer su reproducibilidad y estabilidad.

## Capítulo 3 –ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 Medición de Transmitancia y absorbancia del ZnO-CdS

Las películas delgadas de los materiales usados en la fabricación de dispositivos fotovoltaicos deben tener propiedades ópticas que permitan obtener una buena eficiencia de conversión que se ve reflejada en la obtención de buenos parámetros fotovoltaicos eléctricos de salida, debido a que una vez que la radiación electromagnética incide en un material una fracción de esta puede ser transmitida, otra parte puede ser reflejada y una última parte puede ser absorbida; por lo que se hace necesario caracterizar la transmitancia y absorbancia del depósito de las películas de ZnO-CdS en cada uno de los módulos elaborados en el trabajo. La caracterización de la transmitancia/absorbancia se realizó con kit de caracterización QE/IPCE Oriel.

La transmitancia (T) es la fracción de la luz que es transmitida al incidir sobre un material, es decir, la cantidad de luz que logra atravesar el material. Se suele expresar en forma de porcentaje (T%), debido a que se puede entender como la razón de las intensidades de la luz incidente y de la luz transmitida.

La película de ZnO debe tener una gran resistividad, pero a su vez debe ser transparente para permitir el paso de la luz, mientras que la capa de CdS que se conoce como capa ventana, debe permitir pasar la mayor cantidad de fotones a través de ella; con lo que se espera obtener la mayor transmitancia posible con ambas películas. En la figura 32 se puede observar dos caracterizaciones realizadas a cada muestra en diferentes zonas, para mostrar la homogeneidad de las películas en esta propiedad óptica; de esta manera se observa que cada par de mediciones muestra un comportamiento similar con su respectivo módulo.

A su vez, en la tabla 12 se muestra el promedio de los valores de transmitancia entre las longitudes de onda de 500 a 850 nm, debido a que es precisamente en esta zona donde hay interacción con el CdTe que es la capa ventana. Nuevamente se observa homogeneidad en los valores obtenidos de esta caracterización en cada módulo; aunque se obtienen valores menores en el módulo RF54, también se puede observar en la figura 32 que los valores de transmitancia entre las longitudes de onda de 350 a 500 nm es mayor, lo que cobra importancia debido a que se pueden aprovechar fotones con mayor energía.

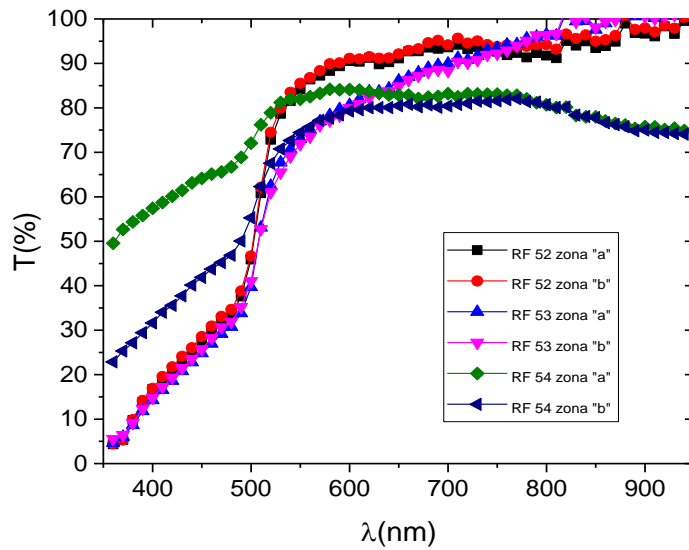


Figura 32. Espectro de transmitancia de dos zonas diferentes de la bicapa ZnO/CdS de los módulos RF52, RF53 y RF54.

Mientras que la absorbancia ( $A$ ) es el inverso de la transmitancia, en este caso se trata de la cantidad de luz que logra absorber el material; y se calcula mediante el negativo del logaritmo de la transmitancia.

En este caso, es significativo que nuestras películas absorban la menor cantidad de energía en las longitudes de onda del espectro solar en las que funcionarán como dispositivo fotovoltaico. En la figura 33 se puede observar las mediciones promedio realizadas a cada muestra, con lo que se aprecia y se confirma en la tabla 12 que nuestras películas están absorbiendo una pequeña porción de la radiación incidente entre las longitudes de onda de 350 a 500 nm.

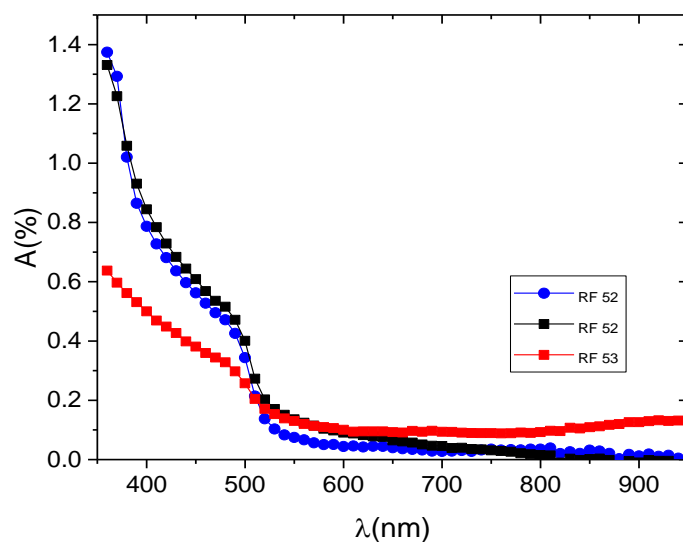


Figura 33. Espectro de absorción de la bicapa ZnO/CdS de los módulos RF52, RF53 y RF54.

Tabla 12. Parámetros del depósito de ZnO/CdS con los valores promedio de transmitancia y absorción de los módulos RF52, RF53 y RF54.

	Material	$t_d$ (min)	$d$ (nm)	T(%)	A(%)
RF52	ZnO	60:00	91.4	88.3	0.06
	CdS	35:00	141	89.6	
RF53	ZnO	51:30	90.6	84.8	0.08
	CdS	38:00	132	84.1	
RF54	ZnO	51:30	90	81.7	0.11
	CdS	31:00	118.9	77.8	

### 3.2 Perfilometría del CdTe

Existe un efecto en el crecimiento de los granos de CdTe a altas temperaturas con el que se puede alcanzar mejores valores de  $V_{oc}$  debido a una mejor formación de dichos granos, aunque se provoca un decrecimiento del FF, debido a que se reduce la corriente producida por la disminución del tiempo de vida de los portadores de carga (Wojtowicz, 2017). Con lo que los espesores y la respuesta fotovoltaica que se espera del dispositivo están relacionados con los parámetros de depósito del material, para este trabajo dichos parámetros se pueden

observar en la tabla 13. Se puntualiza que las temperaturas y tiempos utilizados para el módulo RF52 aseguraron que el depósito de la película de CdTe se consiguiera en un solo proceso, debido a que puede existir la posibilidad de que se necesiten dos depósitos para poder hacer crecer dicha película, en el caso de los dobles depósitos existe la repercusión de obtener mayores espesores a los contemplados y una mala heterounión entre el CdS y el CdTe, con lo que se consiguen valores de  $V_{oc}$  no tan deseables. En el caso del módulo RF52 se mostrará posteriormente que se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.43 y 0.57 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 1.3 y 4.8 mA.

Tabla 13. Parámetros del depósito de CdTe.

	$T_s$ (°C)	$T_f$ (°C)	$t_d$ (min)	$\Delta T$ (°C)	$d$ (μm)
<b>RF52</b>	480	570	3:30	90	9.82
<b>RF53</b>	490	580	4:00	90	9.05
<b>RF54</b>	490	585	4:00	95	8.69

Para el módulo RF53 hubo un aumento de 10°C en la temperatura de sustrato y de la fuente con respecto al RF52, con el objetivo de tener una mejor formación de granos durante el depósito, mientras que hubo un aumento de 30 segundos en el tiempo de depósito. Con lo anterior se logró reducir el espesor de la película en un 7.8% con respecto al RF52, y se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.57 y 0.67 V, mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 4.5 y 8.7 mA. Aunque en el caso de la subcelda 1 se tienen valores de 0.35 V y  $I_{sc}$  de 2.5 mA, lo que se podría explicar con una mala distribución del material en precisamente esa orilla que corresponde a la subcelda.

Para el módulo RF54 hubo un aumento de 5°C en la temperatura de la fuente con respecto al RF53, nuevamente con el objetivo de tener una mejor formación de granos durante el depósito, con lo que se aumenta el gradiente de temperatura y con lo mismo la razón de depósito del material. Con lo anterior y la disminución del material en la chalupa se logró reducir el espesor de la película en un 11.5% con respecto al RF52, se mostrará posteriormente que se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.20 y 0.62 V, mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 0.8 y 5.8 mA. Los resultados obtenidos se pueden atribuir a una mala distribución del material en las orillas de las subceldas como se puede ver

en la figura 36. Con lo anterior se aprecia la necesidad de tener una película homogénea de CdTe en su espesor y dentro del orden deseado, debido a que tiene una repercusión directa sobre la respuesta fotovoltaica del dispositivo final.

La caracterización de los espesores del CdTe se obtienen por perfilometría; para ello, se empleó un perfilómetro KLA – Tenkor Modelo P-7 y los barridos muestran cierta similitud que se puede observar en las figuras 34, 35 y 36, que corresponde a la caracterización del módulo RF52, RF53 y RF54, respectivamente. Si bien se ha logrado controlar el proceso para obtener depósitos con valores de espesor cercano a los 8  $\mu\text{m}$ , en las figuras mencionadas se puede apreciar la rugosidad superficial de las películas de CdTe que corresponde a las pequeñas ondulaciones que se encuentran en todo el barrido debido a la estructura cristalina del CdTe, sin embargo, aquellas crestas de mayor prolongación que se encuentran en la figura 34, 35 y 36 se deben a la forma en que se dispersa el CdTe sobre la chalupa antes del depósito, lo que también explica que en la figura 36 y en menor medida en la figura 35, se encuentre un menor espesor en las orillas, debido a que muy posiblemente hubo que esparcir el material de forma más homogénea en esta zona y con una menor concentración en el centro; además de a su vez tienen que ver los perfiles de temperatura en los bloques del sistema durante el depósito.

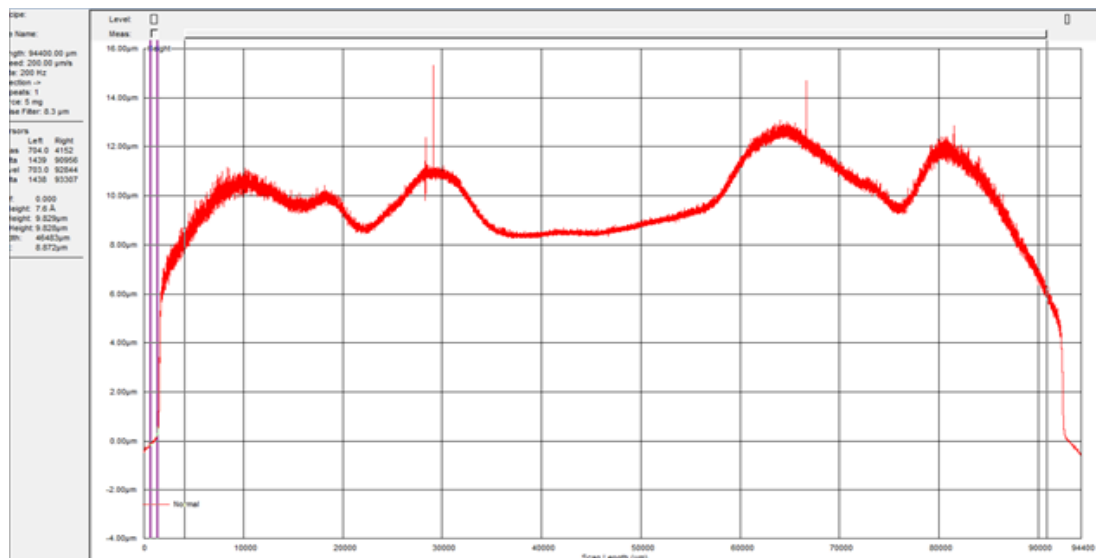


Figura 34. Medición del espesor del de la película delgada de CdTe en el módulo RF52.

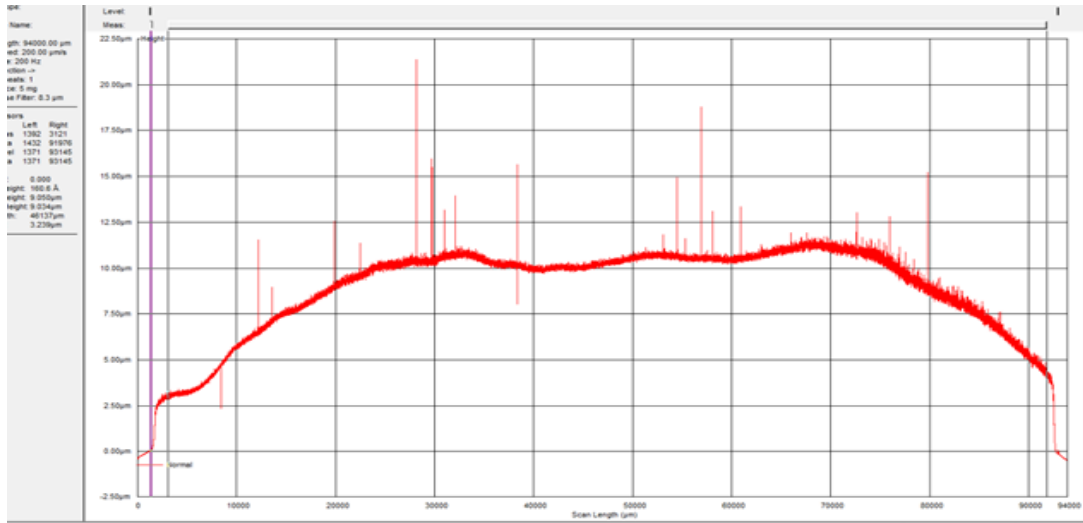


Figura 35. Medición del espesor de la película delgada de CdTe en el módulo RF53.

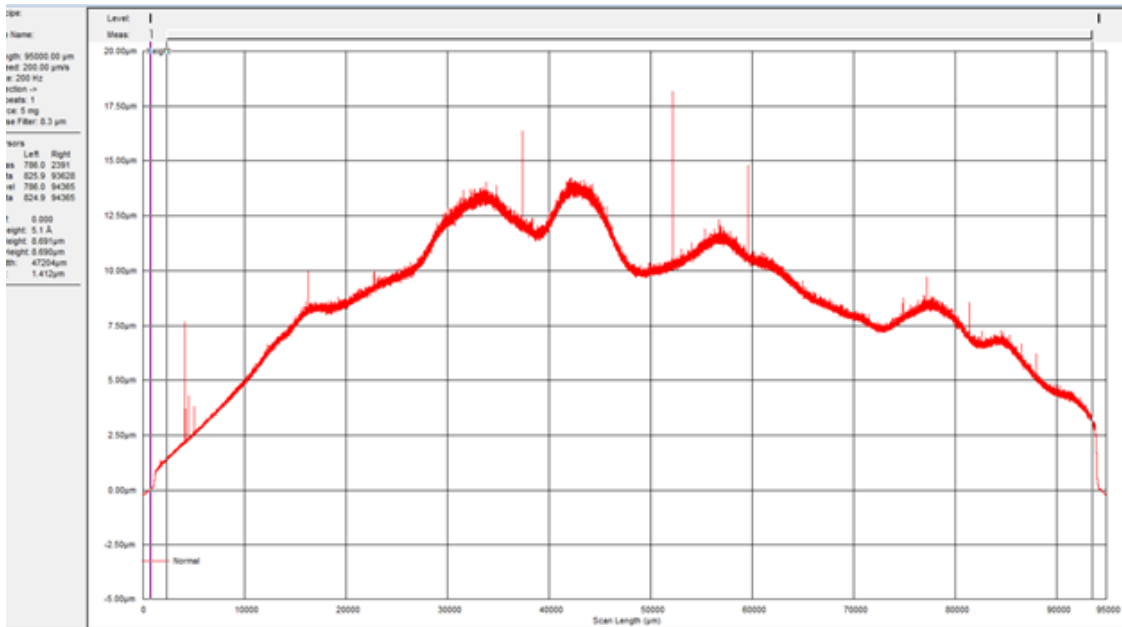


Figura 36. Medición del espesor de la película delgada de CdTe en el módulo RF54.

En la figura 37 se puede apreciar el rango en el que se encuentran los valores de espesores obtenidos de la película de CdTe para cada módulo, el objetivo que se busca alcanzar es obtener películas con un espesor entre 4 a 6  $\mu\text{m}$  debido a que esto permite una mejor difusión de los portadores de carga entre la heterounión del CdS y el CdTe, al tener espesores mayores a los 6  $\mu\text{m}$  los portadores de carga vuelven a recombinarse lo que se traduce en pérdidas en

la corriente producida. Con el fin de evitar espesores muy grandes en la película de CdTe, se realizó una variación en el material que se coloca en la chalupa previo a su depósito; como se mencionó el módulo RF52 se realizó con 300 mg de material, para el RF53 se usó 250 mg (16.67% menos material con respecto al RF52) y en el RF54 se ocupó 200 mg (33.33% menos material con respecto al RF52); como se puede observar la reducción de material se ve reflejada a su vez en una disminución del espesor final, a su vez se comenzó a observar la posibilidad de optimizar el uso del material, ya que en principio se podría evitar usar entre un 16.67% a un 33.33%.

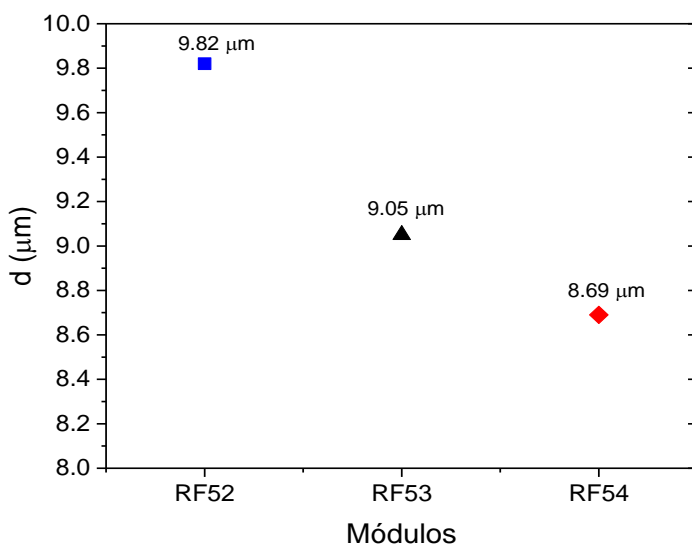


Figura 37. Valores de los espesores de la película de CdTe en los módulos RF52, RF53 y RF54.

### 3.3 Caracterización I-V

La caracterización se realizó con el simulador solar Oriel certificado clase AAA (figura 31) con una potencia de  $1000 \text{ W/m}^2$  y un filtro de corrección espectral AM 1.5. Dicha caracterización se realizó a través de mediciones de corriente contra voltaje (I-V) para obtener los parámetros fotovoltaicos de salida de los tres módulos fotovoltaicos procesados, a fin de observar la reproducibilidad y estabilidad de los procesos realizados que llevaron a la obtención del prototipo encapsulado de módulo fotovoltaico.

### 3.3.1 Caracterización I-V de las subceldas del módulo RF52

La respuesta I-V de las 22 subceldas del módulo RF52 se puede ver en la figura 38, se tienen dos grupos de curvas debido a que se estudió en este módulo el comportamiento de la respuesta I-V, antes y después de usar tintura de Níquel, por lo que un grupo corresponde a las subceldas sin Ni mientras el segundo grupo corresponde a la caracterización después de usar Ni. De modo que se puede observar en la figura 38 que antes de usar Ni se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.44 y 0.57 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 1.3 y 4.8 mA, con el uso del Ni la  $I_{sc}$ , se encontraron valores entre 9.7 y 14 mA, en el caso del  $V_{oc}$  hay valores entre los 0.44 y 0.58 V, con lo que prácticamente el  $V_{oc}$  presentó muy pequeñas variaciones. Se puede observar que las curvas que componen cada grupo no se presentan tan dispersas, y por el contrario se encuentran relativamente en un grupo definido, lo que nos da una señal de la homogeneidad en la respuesta fotovoltaica del módulo, posiblemente a que las subceldas que lo componen presentan características similares.

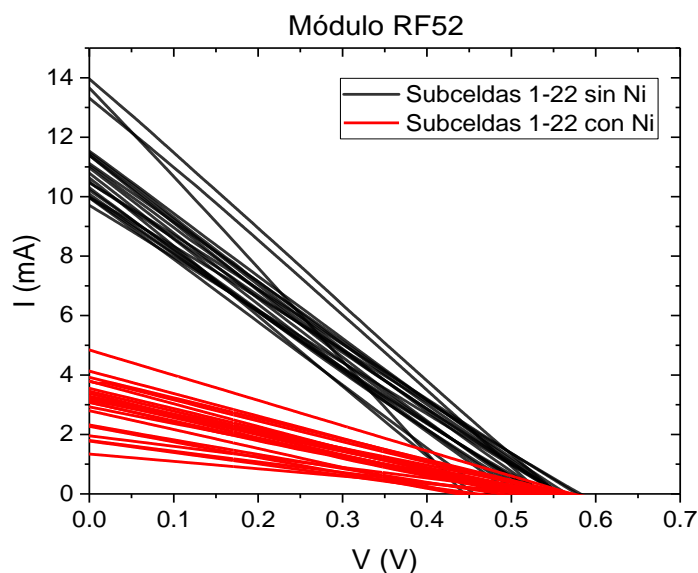


Figura 38. Caracterización I-V de las subceldas 1-22 sin y con Ni del módulo RF52.

Lo anterior se puede apreciar con más claridad con la figura 39 donde se compara la variación que existe en la  $I_{sc}$ , ya que esta variable presentó un aumento en promedio del 309.5% sobre los valores originales, con lo que se observa que en la primera caja hay una distribución asimétrica negativa, es decir con pocos valores bajos de  $I_{sc}$ , pero con una mayor dispersión.

Mientras que una vez que se utilizó la tintura de Ni se aprecia en la segunda caja que se acerca a la distribución simétrica, por lo que la mayoría de las subceldas tienen un valor cercano al promedio de 11.07 mA, salvo por los valores atípicos. Ahora bien, el hecho de que la mayoría de las subceldas se acerquen a ese valor de  $I_{sc}$  se puede entender como el valor máximo de  $I_{sc}$  que se puede generar en cada subcelda del módulo; entre tanto los casos atípicos son zonas donde el conjunto de películas utilizadas logra alcanzar las características necesarias para superar ese promedio. Por lo que se puede esperar buenos resultados al realizar la interconexión en serie de los medios módulos para posteriormente realizar la interconexión y obtener el módulo completo debido al comportamiento más homogéneo una vez que tienen el Ni.

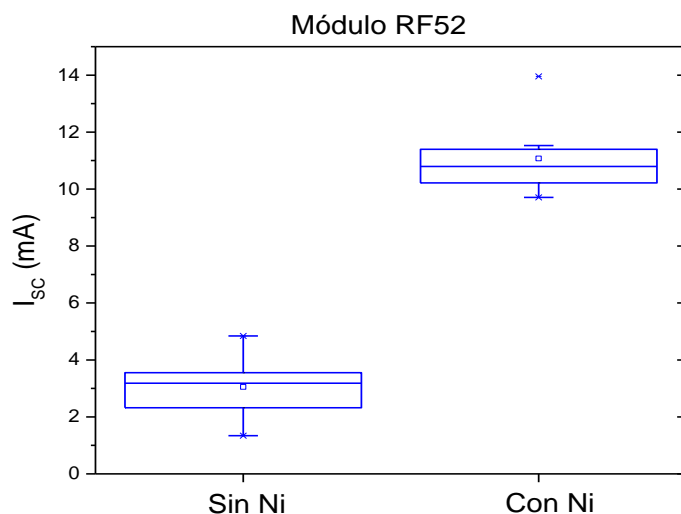


Figura 39. Comparación de la variación de la  $I_{sc}$  antes y después de colocar tintura de Ni en el módulo RF52. Los diagramas de caja muestran la mediana (línea que divide la caja), la media (pequeños cuadrados), los percentiles 25% y 75% (caja inferior y superior, respectivamente), 1.5 rangos intercuartílicos (bigotes) y los valores atípicos (cruces).

### 3.3.2 Caracterización I-V de la interconexión serie-serie del módulo RF52

Las curvas I-V de la interconexión del medio módulo I, medio módulo II y el módulo completo se pueden ver en la figura 40. La curva del medio módulo I corresponde a la interconexión en serie de las subceldas 1 a 11, por lo que la curva del medio módulo II involucra la interconexión en serie de las subceldas 12 a 22, mientras que la curva del módulo completo es producto de la interconexión en serie del medio módulo I y el medio módulo II.

En la tabla 14 se presentan los parámetros fotovoltaicos obtenidos durante la caracterización de los medios módulos y el módulo completo.

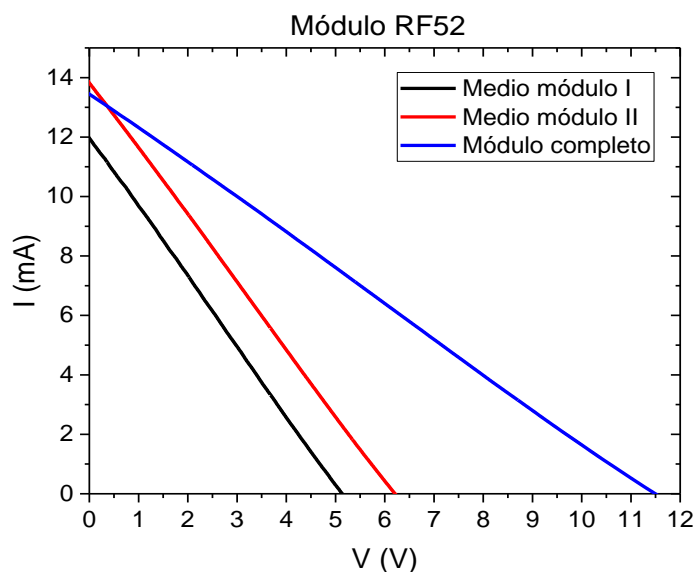


Figura 40. Caracterización I-V del medio módulo I, medio módulo II y el módulo completo RF52.

Tabla 14. Parámetros eléctricos de salida obtenidos posterior a la interconexión de medios módulos y módulo completo del módulo RF52.

	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (mA)	V <sub>max</sub> (V)	I <sub>max</sub> (mA)	P <sub>max</sub> (mW)	FF	Eficiencia
Medio módulo I	5.14	11.96	2.54	6.05	15.36	25.0	0.55%
Medio módulo II	6.21	13.82	3.06	7.00	21.40	24.9	0.76%
Módulo completo	11.51	13.45	5.65	6.82	38.56	24.8	0.70%

Al partir de los valores de las subceldas se esperaba que la interconexión en serie en el medio módulo I diera como resultado valores de V<sub>oc</sub> de 5.41 V y tomará el valor promedio de I<sub>sc</sub> de 10.57 mA, al comparar con los datos de la tabla 14 se observa una pérdida de 0.27 V y una ganancia de 1.39 mA lo que representa una disminución del 5.0% en el V<sub>oc</sub> y un aumento del 11.62% en la I<sub>sc</sub>. Para el caso del medio módulo II se esperaban valores de V<sub>oc</sub> de 5.78 V y que tomará el valor promedio de I<sub>sc</sub> de 11.52 mA, al comparar se observa una ganancia de 0.43 V y 2.3 mA lo que representa un aumento del 7.4% en el V<sub>oc</sub> y un 19.10% en la I<sub>sc</sub>.

En este punto el aumento del  $V_{oc}$  se puede deber al proceso de aislamiento de las celdas con lo que se redujo el área de las mismas y por lo tanto la resistencia en serie. Entretanto el aumento de la  $I_{sc}$  podría deberse al uso de la tintura conductiva sobre el  $SnO_2:F$ , lo que facilita el flujo de la corriente generada.

Al interconectar el módulo completo se esperaban valores de  $V_{oc}$  de 11.35 V y que tomará el valor promedio de  $I_{sc}$  de 12.89 mA, al comparar se observa una ganancia de 0.16 V y 0.56 mA lo que representa un aumento del 1.41% en el  $V_{oc}$  y un 4.34% en la  $I_{sc}$ .

### 3.3.3 Caracterización I-V del prototipo del módulo RF52

Las curvas I-V obtenidas después del proceso de adaptación de las terminales de conexión y de encapsulado se pueden ver en la figura 41, donde se incluye la curva del módulo antes de realizar los procesos mencionados, con el fin de evaluar los cambios que pudieran generarse durante los últimos pasos en la elaboración del prototipo de módulo. En la tabla 15 se presentan los parámetros fotovoltaicos del módulo completo y los obtenidos posterior al proceso de adaptación de las terminales y el encapsulado del módulo.

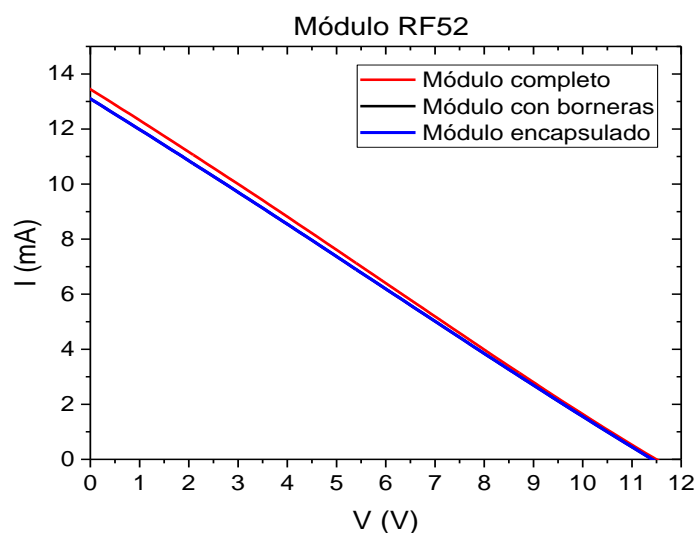


Figura 41. Caracterización I-V del módulo completo, adaptación de terminales de conexión y encapsulado del módulo RF52. No es posible observar la curva que corresponde al módulo con borneras debido a que se superpone la curva del módulo encapsulado.

Tabla 15. Parámetros eléctricos de salida obtenidos posterior a la interconexión del módulo completo, adaptación de terminales de conexión y encapsulado del módulo RF52.

	Voc (V)	Isc (mA)	Vmax (V)	Imax (mA)	Pmax(mW)	FF	Eficiencia
Módulo completo	11.51	13.45	5.65	6.82	38.56	24.8	0.70%
Módulo con terminales	11.47	13.16	5.64	6.67	37.63	24.9	0.68%
Módulo encapsulado	11.42	13.10	5.63	6.62	37.31	24.9	0.68%

Al realizar la adaptación de las terminales, después de haber obtenido el módulo completo, se puede observar que con base a los datos de la tabla 15, se observa una pérdida de 0.04 V y 0.29 mA lo que representa una disminución del 0.35% en el  $V_{oc}$  y un 2.16% en la  $I_{sc}$ . Durante este se esperaba encontrar una disminución del  $V_{oc}$  debido a todos los elementos metálicos que están presentes: la cinta de cobre, la soldadura y las borneras; que generan resistencia al paso de la corriente fotogenerada.

Finalmente, al realizar el proceso de encapsulado, se observa una pérdida de 0.05 V y 0.06 mA con respecto al proceso de la adaptación de las terminales, lo que representa una disminución del 0.44% en el  $V_{oc}$  y un 0.46% en la  $I_{sc}$ . Con lo que en realidad no se presentaron grandes pérdidas al obtener el prototipo final del módulo, lo que se puede observar en la figura 40 debido a que las curvas I-V de los 3 últimos procesos prácticamente no muestran tantas variaciones.

### 3.3.4 Caracterización I-V de las subceldas del módulo RF53

En el módulo RF53 se estudió el comportamiento de la respuesta I-V, antes y después de usar tintura de níquel (Ni) y de plata (Ag), por esta razón se asignaron dos grupos de subceldas para usar cada una de las tinturas. Las curvas I-V de las subceldas 1-11 antes y después de usar Ag se pueden ver en la figura 42, donde se puede apreciar que antes de colocar la Ag se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.60 y 0.66 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 4.5 y 7.8 mA, destacando el caso de la subcelda 1 que arroja valores por debajo del promedio con un  $V_{oc}$  de 0.35 V y  $I_{sc}$  de 2.5 mA, razón por la que se aisló del resto de grupo para evitar afectar los resultados después del proceso de interconexión. De modo que en el grupo de las subceldas 2-11 se utilizó Ag con lo que se obtuvieron valores  $V_{oc}$  entre los

0.60 y 0.66 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 17 y 42 mA; aunque la subcelda 11 presentó la mejor respuesta en el grupo con un  $V_{oc}$  de 0.65 V, una  $I_{sc}$  de 42 mA y una eficiencia de 2.92%.

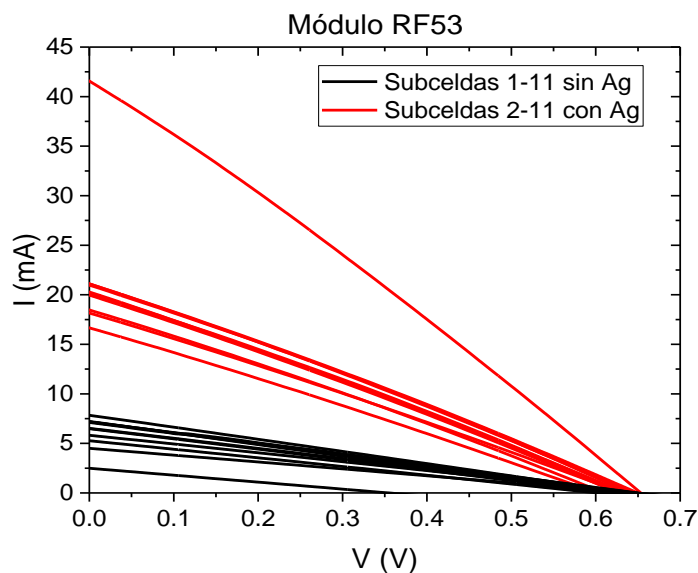


Figura 42. Caracterización I-V de las subceldas 1-11 sin Ag y subceldas 2-11 con Ag del módulo RF53.

Las curvas I-V de las subceldas 12-22 antes y después de usar Ni se pueden ver en la figura 43, donde se puede apreciar que antes de colocar el Ni se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.57 y 0.67 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 4.8 y 8.7 mA. Posteriormente al usar Ni se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.56 y 0.67 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 7 y 21 mA; en este grupo la subcelda 12 presentó la mejor respuesta en el grupo con un  $V_{oc}$  de 0.66 V, una  $I_{sc}$  de 21 mA y una eficiencia de 1.44%.

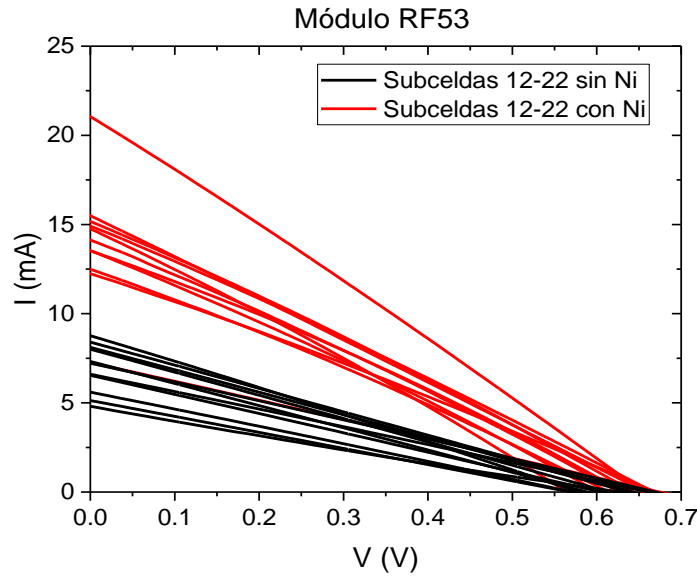


Figura 43. Caracterización I-V de las subceldas 12-22 sin y con Ni del módulo RF53

En la figura 44 se compara la variación que existe en la  $I_{sc}$ , antes y después de usar tintura de níquel (Ni) y de plata (Ag). Debido a que los valores de  $V_{oc}$  permanecen prácticamente constantes se puede observar en las dos primeras cajas sin el uso de tinturas que tenemos una distribución asimétrica negativa, es decir con pocos valores bajos de  $I_{sc}$ , pero con una mayor dispersión en el medio módulo I que en el II; a su vez se puede apreciar que en conjunto muestran una respuesta fotovoltaica casi homogénea antes del uso de las tinturas ya que el medio módulo II muestra un mejor desempeño en este parámetro.

Al usar la tintura de Ag y de Ni se presentó un aumento en promedio del 256.5% y 101.8%, respectivamente sobre los valores originales, con lo que se observa que en la tercera caja hay una distribución asimétrica negativa y la cuarta caja se acerca a la distribución simétrica, frente a esta situación es factible realizar la interconexión en serie de las subceldas que componen cada medio módulo. Por otra parte, cabe destacar que los valores atípicos del medio módulo II apenas están dentro del rango de datos del medio módulo I, lo cual muestra que los mejores valores de conductividad de la Ag ayudan a obtener una mejor respuesta en el parámetro que se está comparando, lo anterior se remarca con los valores atípicos superiores en la tercera caja que guardan una gran diferencia con los valores del módulo II, incluso si se toma en cuenta que antes de usar las tinturas, este presentaba mejores valores.

Con lo que la Ag, ayuda a maximizar el valor obtenido de  $I_{sc}$  que se puede generar en cada subcelda del módulo donde se aplica.

Al comparar los valores de  $I_{sc}$  de las subceldas donde se ocupó la tintura de Ni en los módulos RF52 y el RF53, se tiene que el promedio de este valor para el RF52 fue de 11.07 mA, mientras que en el RF53 fue 14.05 mA. Lo que se puede inferir es que, en otros módulos con características similares y con nuestro proceso, se puede obtener estos valores promedio y con una cota superior cercana. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el módulo RF52 y el RF53 difieren en que el último cuenta con una película de PEDOT:PSS, que debido a su papel en la estructura utilizada posiblemente, ayuda a aumentar la corriente obtenida, lo que se puede apreciar en los valores ya mencionados.

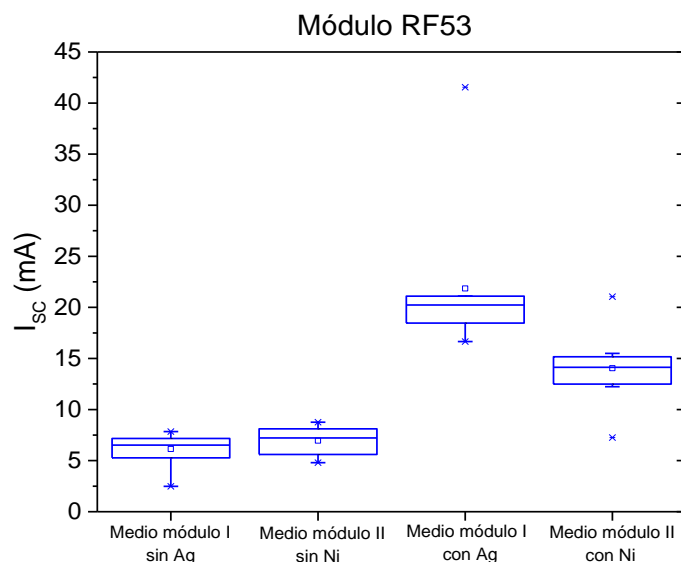


Figura 44. Comparación de la variación de la  $I_{sc}$  antes y después de colocar la tintura de Ni y Ag en el módulo RF53. Los diagramas de caja muestran la mediana (línea que divide la caja), la media (pequeños cuadrados), los percentiles 25% y 75% (caja inferior y superior, respectivamente), 1.5 rangos intercuartílicos (bigotes) y los valores atípicos (cruces).

### 3.3.5 Caracterización I-V de la interconexión en serie-paralelo del módulo RF53

Las curvas I-V de la interconexión del medio módulo I, medio módulo II y el módulo completo se pueden ver en la figura 45. La curva del medio módulo I corresponde a la interconexión en serie de las subceldas 2 a 11, por lo que la curva del medio módulo II involucra la interconexión en serie de las subceldas 12 a 22, mientras que la curva del módulo

completo es producto de la interconexión en paralelo del medio módulo I y el medio módulo II. En la tabla 16 se presentan los parámetros fotovoltaicos obtenidos durante la caracterización de los medios módulos y el módulo completo.

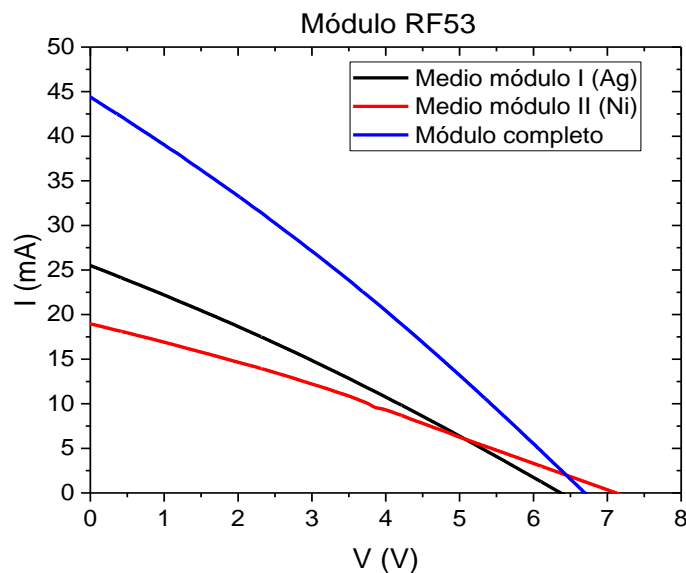


Figura 45. Caracterización I-V del medio módulo I, medio módulo II y el módulo completo RF53

Tabla 16. Parámetros eléctricos de salida posterior a la interconexión de medios módulos y módulo completo del módulo RF53.

	Voc (V)	Isc (mA)	Vmax (V)	Imax (mA)	Pmax(mW)	FF	Eficiencia
Medio módulo I	6.37	25.51	3.33	13.54	45.06	27.7	1.82%
Medio módulo II	7.11	18.96	3.52	10.77	37.90	28.1	1.42%
Módulo completo	6.70	44.39	3.53	23.66	83.47	28.1	1.60%

Al partir de los valores de las subceldas se esperaría que la interconexión en serie en el medio módulo I diera como resultado valores de  $V_{oc}$  de 6.32 V y tomará el valor promedio de  $I_{sc}$  de 21.84 mA, al comparar con los datos de la tabla 16 se observa una ganancia de 0.05 V y 3.67 mA lo que representa un aumento del 0.79% en el  $V_{oc}$  y un 16.80% en la  $I_{sc}$ . Para el caso del medio módulo II se esperaban valores de  $V_{oc}$  de 7.01 V y que tomará el valor promedio de

$I_{sc}$  de 14.05 mA, al comparar se observa una ganancia de 0.10 V y 4.91 mA lo que representa un aumento del 1.43% en el  $V_{oc}$  y un 34.95% en la  $I_{sc}$ .

En este punto el aumento del  $V_{oc}$  se debe al proceso de aislamiento de las celdas con lo que se redujo el área de las mismas y por lo tanto la resistencia en serie, cabe recordar que la diferencia en los  $V_{oc}$  de los medios módulos se debe a que la subcelda 1 no está interconectada con las demás subceldas. Entre tanto el aumento de la  $I_{sc}$  se debe al uso de las tinturas conductivas sobre el  $SnO_2:F$ ; aunque en el medió módulo II hubo un mayor porcentaje en el aumento de la  $I_{sc}$  con respecto al medio módulo I, se puede observar que en principio está última mitad ya trabajaba con valores mayores de  $I_{sc}$ , por lo que el aumento que pueda tener en realidad será tan grande, dado que se tiende converger hacia el valor máximo de  $I_{sc}$  que puede proporcionar cada subcelda que ahora forma parte del circuito formado con la interconexión.

Al interconectar el módulo completo se esperaba que tomara el valor promedio de un  $V_{oc}$  de 6.74 V y que diera como resultado el valor para la  $I_{sc}$  de 44.47, al comparar se observa una pérdida de 0.04 V y 0.08 mA lo que representa una disminución del 0.59% en el  $V_{oc}$  y un 0.18% en la  $I_{sc}$ .

### **3.3.6 Caracterización I-V de prototipo del módulo RF53**

Las curvas I-V obtenidas después del proceso de adaptación de las terminales de conexión y de encapsulado se pueden ver en la figura 46, donde se incluye la curva del módulo antes de realizar los procesos mencionados, con el fin de evaluar los cambios que pudieran generarse durante los últimos pasos en la elaboración del prototipo de módulo. En la tabla 17 se presentan los parámetros fotovoltaicos del módulo completo y los obtenidos posterior al proceso de adaptación de las terminales y el encapsulado del módulo.

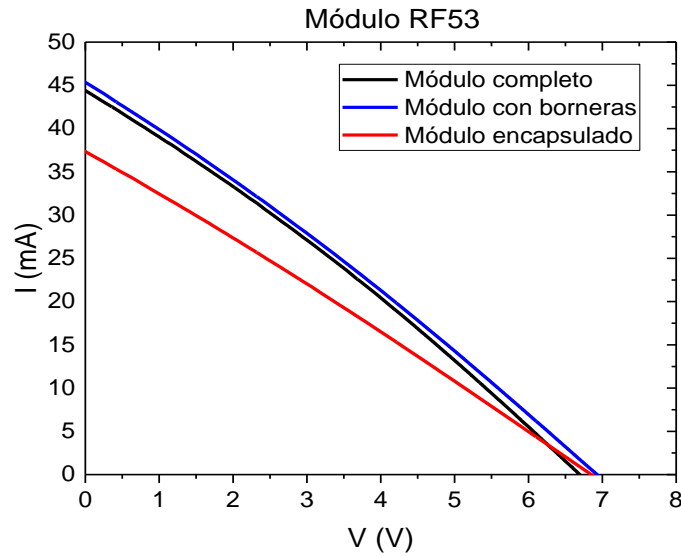


Figura 46. Caracterización I-V del módulo completo, adaptación de terminales de conexión y encapsulado del módulo RF53.

Tabla 17. Parámetros eléctricos de salida posterior a la interconexión del módulo completo, adaptación de terminales de conexión y encapsulado del módulo RF53.

	Voc (V)	Isc (mA)	Vmax (V)	I <sub>max</sub> (mA)	Pmax(mW)	FF	Eficiencia
Módulo completo	6.70	44.39	3.53	23.66	83.47	28.1	1.60%
Módulo con terminales	6.93	45.37	3.61	23.94	86.35	27.5	1.53%
Módulo encapsulado	6.85	37.35	3.50	19.33	67.64	24.4	1.20%

Al realizar la adaptación de las terminales después de haber obtenido el módulo completo, se puede observar que con base a los datos de la tabla 17, un aumento de 0.23 V y 0.98 mA lo que representa una ganancia del 3.43% en el  $V_{oc}$  y un 2.21% en la  $I_{sc}$ . Durante este proceso, se esperaba encontrar una disminución del  $V_{oc}$  debido a todos los elementos metálicos que están presentes: la cinta de cobre, la soldadura y las borneras; que generan resistencia al paso de la corriente generada.

Finalmente, al realizar el proceso de encapsulado se observa una pérdida de 0.08 V y 8.02 mA con respecto al proceso de la adaptación de las terminales, lo que representa una

disminución del 1.15% en el  $V_{oc}$  y un 17.67% en la  $I_{sc}$ . La disminución en el valor de la  $I_{sc}$  obtenida puede estar relacionada con la posibilidad de que la resina epóxica se pudiera haber difundido cerca de la soldadura de las terminales y que debido a las propiedades aislantes de este polímero no permita el flujo de la corriente generada.

### 3.3.7 Caracterización I-V de las subceldas del módulo RF54

En el módulo RF54 se estudió el comportamiento de la respuesta I-V, antes y después de usar tintura de plata (Ag) de dos tipos de proveedores diferentes, por esta razón se asignaron dos grupos de subceldas para usar cada una de las tinturas lo que se determinó al realizar la caracterización sin Ag donde las subceldas 1-11 (medio módulo I) mostraron una marcada diferencia con respecto a las subceldas 12-22 (medio módulo II). Las curvas I-V de las subceldas 1-11 antes y después de usar Ag de la marca Chemtronics se pueden ver en la figura 47 donde se puede apreciar que antes de colocar la Ag se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.43 y 0.62 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 2.97 y 5.82 mA. Posteriormente al usar Ag se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.42 y 0.58 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 19 y 34 mA; aunque la subcelda 1 presentó la mejor respuesta en el grupo con un  $V_{oc}$  de 0.43 V, una  $I_{sc}$  de 34 mA y una eficiencia de 1.56%.

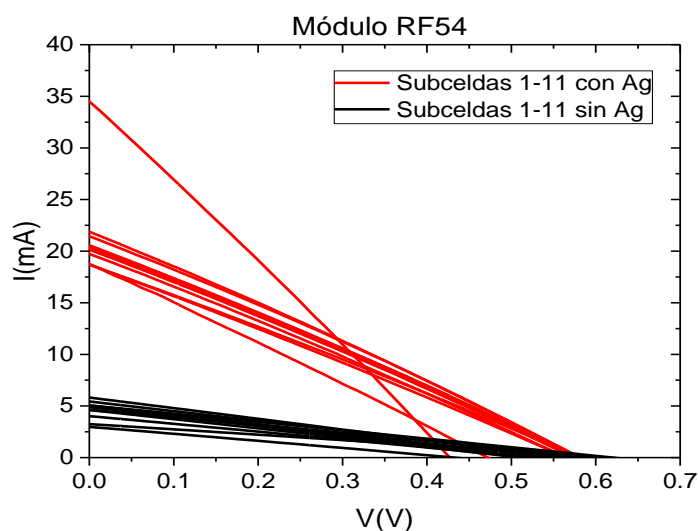


Figura 47. Caracterización I-V de las subceldas 1-11 sin y con Ag del módulo RF54.

Las curvas I-V de las subceldas 12-22 antes y después de usar la tintura de Ag de la marca BioFractal se pueden ver en la figura 48, donde se puede apreciar que antes de colocar la Ag se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.20 y 0.35 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 0.87 y 4.57 mA, destacando el caso de la subcelda 12 que arroja valores muy por debajo del promedio con un  $V_{oc}$  de 0.008 V y  $I_{sc}$  de 0.0001 mA. Posteriormente al usar Ag se obtuvieron valores de  $V_{oc}$  entre los 0.16 y 0.31 V mientras para el caso de la  $I_{sc}$  se obtienen valores entre 8 y 16 mA; en este grupo la subcelda 17 presentó la mejor respuesta en el grupo con un  $V_{oc}$  de 0.30 V, una  $I_{sc}$  de 15.4 mA y una eficiencia de 0.50% e incluso la subcelda 12 se acercó a los valores promedio del grupo.

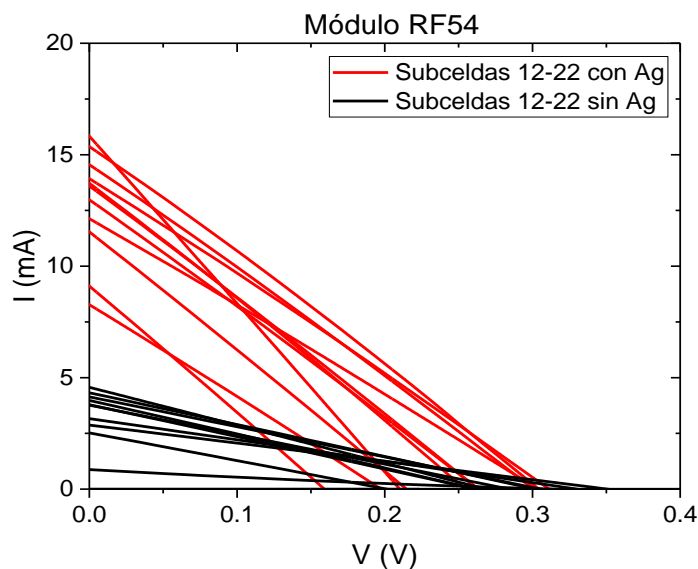


Figura 48. Caracterización I-V de las subceldas 12-22 sin y con Ag del módulo RF54.

En esta ocasión los valores de  $V_{oc}$  no permanecieron constantes en las 22 subceldas que conforman al módulo completo, puesto que en el módulo I, 3 subceldas presentaron disminuciones en sus valores iniciales, aunque 7 tuvieron un aumento en este parámetro. En el medio módulo II, 6 subceldas presentaron disminuciones, mientras 4 subceldas tuvieron un aumento en este parámetro. A pesar de esta situación, en todos los casos hubo un aumento en el valor de la  $I_{sc}$ , donde el promedio fue de 391.88% y 374.82%, para el uso de la marca Chemtronics y BioFractal, respectivamente.

Los bajos valores de  $V_{oc}$  que se aprecian en el medio módulo I y el II se deben atribuir al problema en la mala distribución del material previo al depósito del CdTe, lo que tuvo como consecuencia el no obtener una capa homogénea del semiconductor, puesto que el valor del  $V_{oc}$  se asocia a la unión p-n, y debido a esto, el módulo puede presentar zonas donde dicha unión presenta defectos. Mientras que una vez que se colocan las tinturas, la pérdida en ese parámetro se puede deber al aumento en resistencia en serie, con lo que se ve afectado el  $V_{oc}$ , más no la  $I_{sc}$ .

Al enfocarse en los valores obtenidos de la  $I_{sc}$  se puede observar en la figura 49, un mejor rendimiento en el medio módulo I sobre el II antes de usar las tintas conductivas, aunque ambos medios módulos se aprecia una distribución asimétrica negativa, pero con una mayor dispersión en el medio módulo II. Al usar la tintura de Ag se observa que en la tercera caja se acerca a la distribución simétrica y continua la mayor dispersión en el medio módulo II que tiene una distribución asimétrica negativa.

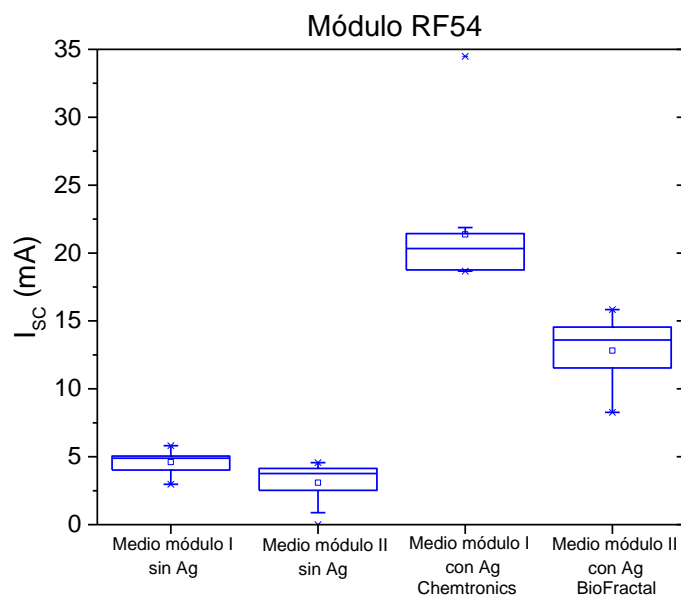


Figura 49. Comparación de la variación de la  $I_{sc}$  antes y después de colocar la tintura de Ag de la marca de Chemtronics y BioFractal en el módulo RF54. Los diagramas de caja muestran la mediana (línea que divide la caja), la media (pequeños cuadrados), los percentiles 25% y 75% (caja inferior y superior, respectivamente), 1.5 rangos intercuartílicos (bigotes) y los valores atípicos (cruces).

Al comparar los valores de  $I_{sc}$  de las subceldas de los módulos RF53 y el RF54 donde se ocupó la tintura de Ag (Chemtronics), se tiene que el promedio de este valor para el RF53 fue de 21.84 mA, mientras que en el RF54 fue 21.38 mA, lo que da un promedio de 21.61 mA para el valor de la  $I_{sc}$ . Esto significa que, nuestro proceso de usar tintura de Ag marca Chemtronics en un módulo con espesor relativamente homogéneo en la capa de CdTe, dará estos valores promedio de de  $I_{sc}$ .

El uso de la tintura de la marca BioFractal dio como resultado un aumento sobre los valores originales de la  $I_{sc}$ , lo que fue bastante parecido al aumento promedio que generó la marca Chemtronics. Aunque el valor promedio de la  $I_{sc}$  en el medio módulo II fue de 12.82 mA, lo cual fue un poco menor al promedio de las subceldas en las que se usó Ni en el RF53. De esta manera, no se debe descartar su uso para más pruebas, puesto que en un módulo con una buena homogeneidad en el espesor de CdTe podría entregar mejores resultados. En especial si se toma en cuenta la comparación realizada en la tabla 10, se pueden obtener buenos resultados de conductividad al comparar con los productos de Chemtronics, adicionalmente al tener un mayor control del material por la forma en que se aplica, se puede obtener una capa con un menor espesor en comparación con las plumas conductoras.

Finalmente, partiendo de que prácticamente todos los módulos son muy parecidos en todos sus procesos y que la única diferencia importante es la adición del polímero, se puede observar en la figura 50, que el módulo RF53 muestran una mejora en el  $V_{oc}$  y la  $I_{sc}$  con respecto al RF52, tales mejoras se puede atribuir a la película de PEDOT:PSS y sus propiedades. Aunque también se aprecia en la figura 50 que la mejor subcelda del módulo RF52 tiene un mejor desempeño que la peor del módulo RF53, se debe recordar que dicha subcelda se aisló del resto porque el conjunto de subceldas de ese módulo en realidad presentó pocos valores bajos en la  $I_{sc}$ . como se observa en las figuras 42 y 44.

En cuanto los valores del FF, presentan un valor promedio de 24.51, 25.22 y 25.06 para los módulos RF52, RF53 Y RF54, respectivamente; se puede decir que son prácticamente iguales. Lo que nos indica que, en nuestro proceso base de procesamiento de estos prototipos se mantienen una alta resistencia en serie, una baja resistencia en paralelo y posibles problemas con la heterounión p-n, que reflejan un bajo valor del FF. Mismo que el polímero PEDOT:PSS no mejoró sustancialmente, aunque al agregar tinturas de Ag y Ni hay un efecto

combinado que proporcionó valores promedio de 26.9 y 26.7, respectivamente en las subceldas. Mientras que en los medios módulos se obtuvieron valores de 28.1 y 27.5 al usar Ag y Ni en el módulo RF53, respectivamente.

En cuanto a la forma aplanada de la curva I-V que se observa en las figuras 40 y 46 que corresponden a los módulos RF52 Y RF53, respectivamente, se debe a la alta resistencia en serie debido a la mayor área de los módulos elaborados.

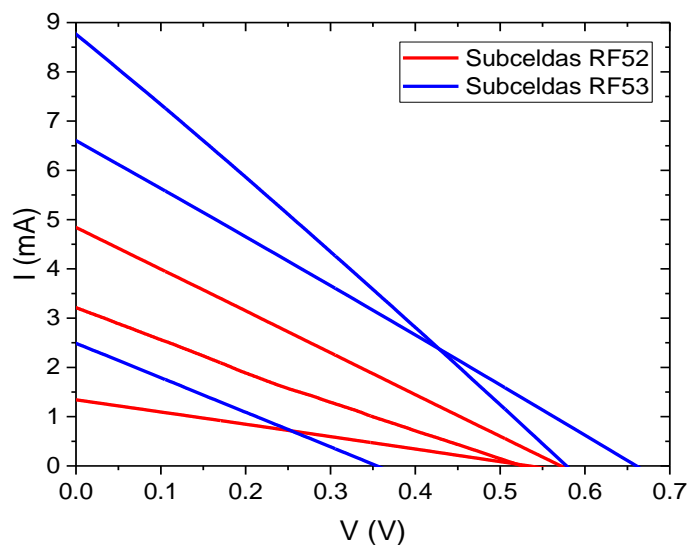


Figura 50. Caracterización I-V de la mejor, de valor medio y peor subcelda del módulo RF52 y RF53.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con la literatura consultada no se ha reportado hasta la fecha actual, un prototipo de módulo fotovoltaico interconectado y encapsulado de 10x10cm híbrido de CdTe y PEDOT:PSS realizado por completo en el país, además de haber hecho todo el proceso en las instalaciones del LACyTES.

Se encontró que en cuanto a la cantidad de material que se coloca en la chalupa para el procesamiento de la película de CdTe, se debe colocar entre los 200 y 250 mg, con lo que se tiene un mejor control del espesor de la película durante la sublimación del mismo. Aunque debe estar dentro de este rango para que, al realizarse la manipulación del material, se pueda dispersar de forma homogénea por toda la chalupa.

Al usar una película tipo  $p^+$  de PEDOT:PSS hubo un aumento tanto en el  $V_{oc}$  y la  $I_{sc}$ , en comparación con la el módulo RF52 que no cuenta con la película del polímero, con lo que se lograron obtener subceldas con un  $V_{oc}$  de 0.67 V que muestra una diferencia de 0.10 V con el valor más alto en el RF52 de 0.57 V, mientras en la  $I_{sc}$  en se lograron obtener subceldas con una  $I_{sc}$  de 8.7 mA que muestra una diferencia de 3.9 mA con el valor más alto en el RF52 de 4.8 mA.

Se obtuvieron resultados experimentales que sugieren que en nuestro proceso de usar tintura de Ni en un módulo con espesor relativamente homogéneo en la capa de CdTe, se pueden obtener valores promedios de  $I_{sc}$  entre 11.07 mA y 14.05 mA. Por otra parte, al usar tintura de Ag se obtienen valores promedio de 21.84 a 21.38 mA, con lo que se homogeniza este parámetro y se puede realizar el proceso de interconexión en serie de los medios módulos.

Se obtuvieron prototipos de módulos fotovoltaicos donde al usar las tintas conductoras en los respectivos medios módulos, se consiguió un aumento en la  $I_{sc}$  y con disminuciones prácticamente despreciables en el  $V_{oc}$  cómo se observaron en las figuras 38, 42, 43, 47 y 48. En cuanto a la adaptación de las borneras en los módulos RF52 Y RF53 se tiene un proceso estable y reproducible, debido a que se observa en las figuras 41 y 46 que existen pequeñas variaciones en los valores de  $V_{oc}$  y  $I_{sc}$  al comparar con la caracterización antes de la adaptación de las borneras. Finalmente, se logró realizar el encapsulado del módulo RF52 de una forma estable ya que la caracterización una vez encapsulado se sobrepone a la curva de

caracterización con las borneras como se ve en la figura 41; mientras que en el caso del módulo RF53 hubo una disminución en el valor de la  $I_{sc}$  como se ve en la figura 46, que puede estar relacionada con la posibilidad de que la resina epóxica se pudiera haber difundido cerca de la soldadura de las terminales y que debido a las propiedades aislantes de este polímero no permita el flujo de la corriente generada.

## **PERSPECTIVAS Y TRABAJOS A FUTURO**

La experiencia y resultados de este trabajo muestran los puntos en los que es necesario dedicar atención para lograr el desarrollo de un buen dispositivo final, desde los parámetros en el depósito de las películas que conforman al módulo, hasta la manera y el tipo de materiales con que se realizan los procesos finales.

Es necesario realizar la caracterización de eficiencia cuántica externa (EQE por sus siglas en inglés, External Quantum Efficiency) de las subceldas que conforman los módulos para conocer el comportamiento de cada material en estos prototipos.

Realizar Microscopía Electrónica de Barrido de Alta Resolución (HR-SEM por sus siglas en inglés, High-resolution scanning electron microscopy) para conocer la morfología del CdTe y el PEDOT:PSS procesado en estas dimensiones.

El proceso de aislamiento se puede realizar con la técnica de escritura láser monolítica, al desarrollar este proceso en el LACyTES se podría realizar no solo el aislamiento de cada subcelda, sino que se podría hacer interconexión en serie de las mismas sin el uso de tintas conductoras. Con lo que se puede disminuir la resistencia en serie y aumentar los parámetros fotovoltaicos del dispositivo.

Mientras el proceso de aislamiento complementario se realizaba anteriormente por serigrafía, sin embargo, al momento de realizar la impresión de la tinta epóxica a través de la pantalla esta no lograba adherirse de forma eficiente y con un espesor que pueda proporcionar un correcto aislamiento. Por lo que es necesario desarrollar un proceso en el que la impresión se lleve a cabo sin afectar los contactos posteriores con derrames y así obtener líneas de un

ancho y espesor uniformes, con el fin de suplir el uso del abatelenguas que se usó en este trabajo.

Pese a que no se pudieron apreciar los beneficios para mejorar la  $I_{sc}$  con el uso de la tinta conductiva de la marca Biofractal, no se debe descartar su uso, porque su presentación en jeringa con aplicadores cónicos facilita su uso, con lo que se obtiene un mayor rendimiento del material y se consiguen trazos más definidos y delgados en comparación con las plumas conductivas, donde los trazos son de mayor grosor e implican una mayor resistencia en serie dentro del dispositivo

Al seguir la lógica para realizar interconexiones, es posible interconectar más de un módulo ya sea en serie o en paralelo. Por lo que, al diseñar moldes del tamaño apropiado se puede realizar la interconexión y el proceso de encapsulado; en esta aplicación es necesario pensar en las configuraciones necesarias evitar realizar largos puentes de interconexión que se puedan traducir en pérdidas para el dispositivo final.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución en sectores de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial en 2017. Fuente: Statista, 2021.....	6
Figura 2. Potencial eléctrico fotovoltaico, se destaca con las líneas moradas el cinturón solar. Fuente: World Bank Group, 2019. ....	8
Figura 3. Evolución de las celdas récord por año (1993-2021) en diferentes tecnologías. Fuente: Fraunhofer, 2021. ....	10
Figura 4. Estructura de bandas de un dieléctrico, un semiconductor y un metal. Se señalan los niveles de energía presentes como permitidos y prohibidos. Fuente: Shur, 2005. ....	12
Figura 5. Representación esquemática del efecto fotovoltaico en una celda solar. Fuente: Simya, <i>et al.</i> , 2018.....	14
Figura 6. Circuito equivalente de una celda solar. Fuente: Carta, et al, 2009.....	15
Figura 7. Curva I-V de una celda solar con sus principales parámetros. Carta, et al, 2009.	16
Figura 8. Esquema de la generación del excitón y su separación en portadores de carga a) absorción del fotón, b) transporte del excitón hasta la interface donador-aceptor, c) Transporte de los portadores de carga a su respectivo electrodo. Fuente: Alcázar y Ramírez, 2014. ....	19
Figura 9. a) Arquitectura tradicional de celda de CdTe, b) arquitectura empleada por Reyes (Reyes, 2020) y la utilizada en este trabajo. ....	21
Figura 10. a) circuito básico en serie, b) circuito en serie de fuentes de voltaje.....	22
Figura 11. a) circuito básico en paralelo, b) circuito en paralelo de fuentes de voltaje. ....	23
Figura 12. Proceso de interconexión en serie por medio de escrituración láser con sus tres etapas (al aire libre) y el depósito de las películas de una celda de CdTe (en vacío), señalando el área muerta que no se puede aprovechar. Fuente: Field, et al., 2017. ....	24
Figura 13. Proceso de interconexión en serie por medio de la impresión de una tinta conductiva y una aislante al aprovechar la escrituración láser de un paso (al aire libre), posterior al depósito de las películas de una celda de CdTe (en vacío), se señala el área muerta que no se puede aprovechar. Fuente: Fields, <i>et al.</i> , 2017.....	25
Figura 14. Procedimiento para la elaboración de prototipos de módulos fotovoltaicos híbridos de CdTe y PEDOT:PSS.....	26
Figura 15. Sistema de erosión catódica magnetoplanar de radiofrecuencia (Sputtering-RF). ....	29
Figura 16. Muestra con depósito de ZnO/CdS .....	30
Figura 17. Sistema de sublimación de espacio cercano.....	32
Figura 18. Muestra con depósito de una película delgada característica de CdTe. ....	33

Figura 19. Sistema de transporte de vapor en espacio cercano. ....	35
Figura 20. Muestra con depósito de película delgada de CdCl <sub>2</sub> sobre CdTe. ....	36
Figura 21. Deposición mediante centrifugado a) se coloca el material, b) la reacción a la aceleración centrípeta distribuye el material por el sustrato, c) la velocidad angular se mantiene constante y el material se dispersa, d) los disolventes orgánicos se evaporan dejando atrás una película del material a depositar. Fuente: Reyes, 2020. ....	37
Figura 22. Muestra con depósito de PEDOT:PSS sobre sustrato de CdTe con TT. ....	38
Figura 23. Muestra con depósito de los contactos de Cu/Mo sobre la heterounión CdS/CdTe. ....	40
Figura 24. Estación de escrituración láser del LACyTES. ....	41
Figura 25. Trazado realizado por escrituración láser para obtener el aislamiento de las subceldas de un módulo. ....	42
Figura 26. Aislamiento del módulo fotovoltaico mediante la utilización de tinta policat... 43	43
Figura 27. Interconexión del medio módulo RF52 a) foto del medio módulo I. Diagramas b) interconexión de las 11 subceldas del medio módulo I y II c) interconexión de los medios módulos. ....	46
Figura 28. Diagramas de interconexión del módulo RF53 a) interconexión de las subceldas del medio módulo I y II b) interconexión de los medios módulos. ....	48
Figura 29. Módulo fotovoltaico con la adaptación de terminales de conexión eléctrica. ....	51
Figura 30. Proceso de encapsulado de un módulo fotovoltaico, a) módulo dentro del molde de aluminio, b) módulo una vez desmoldado. ....	53
Figura 31. Simulador solar Oriel certificado clase AAA. ....	54
Figura 32. Espectro de transmitancia de dos zonas diferentes de la bicapa ZnO/CdS de los módulos RF52, RF53 y RF54. ....	56
Figura 33. Espectro de absorbancia de la bicapa ZnO/CdS de los módulos RF52, RF53 y RF54. ....	57
Figura 34. Medición del espesor de la película delgada de CdTe en el módulo RF52. .	59
Figura 35. Medición del espesor de la película delgada de CdTe en el módulo RF53. ....	60
Figura 36. Medición del espesor de la película delgada de CdTe en el módulo RF54. ....	60
Figura 37. Valores de los espesores de la película de CdTe en los módulos RF52, RF53 y RF54. ....	61
Figura 38. Caracterización I-V de las subceldas 1-22 sin y con Ni del módulo RF52. ....	62
Figura 39. Comparación de la variación de la I <sub>sc</sub> antes y después de colocar tintura de Ni en el módulo RF52. Los diagramas de caja muestran la mediana (línea que divide la caja), la media (pequeños cuadrados), los percentiles 25% y 75% (caja inferior y superior, respectivamente), 1.5 rangos intercuartílicos (bigotes) y los valores atípicos (cruces). ....	63

Figura 40. Caracterización I-V del medio módulo I, medio módulo II y el módulo completo RF52. ....	64
Figura 41. Caracterización I-V del módulo completo, adaptación de terminales de conexión y encapsulado del módulo RF52. No es posible observar la curva que corresponde al módulo con borneras debido a que se superpone la curva del módulo encapsulado. ....	65
Figura 42. Caracterización I-V de las subceldas 1-11 sin Ag y subceldas 2-11 con Ag del módulo RF53. ....	67
Figura 43. Caracterización I-V de las subceldas 12-22 sin y con Ni del módulo RF53. ....	68
Figura 44. Comparación de la variación de la $I_{sc}$ antes y después de colocar la tintura de Ni y Ag en el módulo RF53. Los diagramas de caja muestran la mediana (línea que divide la caja), la media (pequeños cuadrados), los percentiles 25% y 75% (caja inferior y superior, respectivamente), 1.5 rangos intercuartílicos (bigotes) y los valores atípicos (cruces). ....	69
Figura 45. Caracterización I-V del medio módulo I, medio módulo II y el módulo completo RF53. ....	70
Figura 46. Caracterización I-V del módulo completo, adaptación de terminales de conexión y encapsulado del módulo RF53. ....	72
Figura 47. Caracterización I-V de las subceldas 1-11 sin y con Ag del módulo RF54. ....	73
Figura 48. Caracterización I-V de las subceldas 12-22 sin y con Ag del módulo RF54. ....	74
Figura 49. Comparación de la variación de la $I_{sc}$ antes y después de colocar la tintura de Ag de la marca de Chemtronics y BioFractal en el módulo RF54. Los diagramas de caja muestran la mediana (línea que divide la caja), la media (pequeños cuadrados), los percentiles 25% y 75% (caja inferior y superior, respectivamente), 1.5 rangos intercuartílicos (bigotes) y los valores atípicos (cruces). ....	75
Figura 50. Caracterización I-V de la mejor, de valor medio y peor subcelda del módulo RF52 y RF53. ....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del sustrato TEC-10.....	27
Tabla 2. Parámetros del depósito de ZnO/CdS. ....	29
Tabla 3. Parámetros de depósito para el procesamiento de películas delgadas de CdTe. ....	33
Tabla 4. Parámetros del depósito de CdCl <sub>2</sub> . ....	36
Tabla 5. Parámetros del depósito de PEDOT:PSS. ....	38
Tabla 6. Parámetros de procesamiento de los contactos de Cu/Mo. ....	39
Tabla 7. Especificaciones técnicas de la tintura de níquel de la marca Chemtronics.....	45
Tabla 8. Especificaciones técnicas de la tintura de plata de la marca Chemtronics.....	47
Tabla 9. Especificaciones técnicas de la tintura de plata de la marca BioFractal. ....	49
Tabla 10. Comparación de resistencia laminar, resistividad y conductividad partiendo de los valores máximos y mínimos reportados por cada empresa. ....	50
Tabla 11. Especificaciones de la resina epóxica utilizadas en el proceso de encapsulado...	52
Tabla 12. Parámetros del depósito de ZnO/CdS con los valores promedio de transmitancia y absorbancia de los módulos RF52, RF53 y RF54. ....	57
Tabla 13. Parámetros del depósito de CdTe. ....	58
Tabla 14. Parámetros eléctricos de salida obtenidos posterior a la interconexión de medios módulos y módulo completo del módulo RF52. ....	64
Tabla 15. Parámetros eléctricos de salida obtenidos posterior a la interconexión del módulo completo, adaptación de terminales de conexión y encapsulado del módulo RF52. ....	66
Tabla 16. Parámetros eléctricos de salida posterior a la interconexión de medios módulos y módulo completo del módulo RF53. ....	70
Tabla 17. Parámetros eléctricos de salida posterior a la interconexión del módulo completo, adaptación de terminales de conexión y encapsulado del módulo RF53. ....	72

## REFERENCIAS

- Alcazar M., V. y Ramírez G., J. (2014). Polímeros para aplicaciones fotovoltaicas. *Revista de plásticos modernos*, 109 (692), 25-30.
- Amin, N., y Rahman, K. S. (2017). Close-Spaced Sublimation (CSS): A low-cost, high-yield deposition system for cadmium telluride (CdTe) thin film solar cells. En Nikitenkov (Ed.), *Modern Technologies for creating the thin-film systems and coatings*, 361-379, INTECH.
- Bakhiyi, B., Labrèche, F., y Zayed, J. (2014). The photovoltaic industry on the path to a sustainable future—Environmental and occupational health issues, *Environment international*, 73, 224-234
- Bancomext. (2018). *Energías renovables. Construyendo un México sustentable*.
- Barbosa G., O., Maldonado, J., L., Ramos O., G., Rodríguez, M., Pérez G., E., Meneses N., M. A., Pichardo. J. L., Omelas, N. y López de A., P. L. (2012). Celdas solares orgánicas como fuente de energía sustentable. *Acta universitaria*, 22(5), 36-48.
- Bätzner, D. L., Romero, A., Zogg, H., Wendt, R. y Tiwiei, A. N. (2000). Development of eficiente and stable back contacts on CdTe/CdS solar cells. *Thin solid films*, 387 (1-2), 151-154.
- Bereznev, S., Koeppe, R., Konovalov, I., Kois, J., Günes, S., Opikm A., Mellikov, E., y Sariciftci, N. S. (2007). Hybrid solar cells based on CuInS<sub>2</sub> and organic buffer-sensitizer layers. *Thin solid films*, 515 (15), 5759-5762
- Boylestad, R. L. (2004). *Introducción del análisis de circuitos*, México: Pearson Educación.
- Carta G., J. A., Calero P., R., Colmenar S., A., Castro G. M. A. y Collado F., E. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*, España: Pearson Educación.
- Chu, T. L., Chu, S. S. (1993). Recent progress in thin film cadmium telluride solar cells. *Progress in photovoltaics: Research and applications*, 1(1), 31-42.

Du, X., Chen, Z., Liu, F., Zeng, Q., Jin, G., Li, F., Yao, D. y Yang B. (2015). Improvement in open-circuit voltage of thin film solar cells aqueous nanocrystal by interface engineering. *ACS applied materials and interfaces*, 8(1), 900-907

Fields, J. D., Pach, G., Horowitz, K. A. W., Stockert, T. R., Woodhouse, M. y van Hest, M. F. A. M. (2017). Printed interconnects for photovoltaic module. *Solar energy materials and solar cells*, 159, 536-545.

Fierro. L., J. A. (2020). *Procesamiento, interconexión y encapsulado de prototipos de módulos fotovoltaicos nacionales de CdTe*. Tesis de Maestría. Universidad politécnica de Sinaloa

Fraunhofer. (2021). Photovoltaics report. Recuperado de: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

Gómez, O., Herrera S. M., Chay, A. y Castro R., R. (2013). Sistema de crecimiento de películas delgadas para celdas solares CdS/CdTe, con la técnica CSS combinando rotación simultánea de la fuente de evaporación y del sustrato, *XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Hidalgo, México.

Hall, R. S., Lamb, D. y Irvine, S. J. C. (2021) Back contacts materials used in thin films CdTe solar cells. *Energy science and engineering*, 9(5), 606-632.

Jimenez O., D., Vigil G., O., De la Rosa, J., Sauret J., D. y Contreras P., G. (2015). Laser scribing of fluorine doped tin oxide for serial interconnection of CdS/CdTe solar cells. *Revista mexicana de física*, 61 (3), 160-165.

Major, J. D., Phillips, L. J., Al Turkestani, M., Bowen, L., Whittles, T. J., Dhanak, V. R. y Durose, K. (2017). P3HT as a pinole blocking back contact for CdTe thin film solar cells. *Solar energy materials and solar cells*, 172, 1-10.

Nayak, P. K., Mahesh, S., Snaith, H. J. y Cahen, D. (2019). Photovoltaic solar cell technologies: analyzing the state of the art. *Nature Reviews Materials*, 4(4), 269, 2019.

Ogbomo, O. O., Amalu, E. H., Ekere, N. N. y Olagbegi, P. O. (2017). A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. *Renewable and sustainable energy reviews*, 75, 1225-1238.

Pérez T., J. A., Gallego, J. L., Roman. W. S. y Landázuri, H. R. (2008). Películas nanoestructuras de óxido de zinc (ZnO). *Scientia et technica*, 2(39), 416-421.

Perrenoud, J., Schaffner, B., Buecheler, S. y Tiwari, A. N. (2011). Fabrication of a flexible CdTe solar module with monolithic cell interconnection. *Solar energy materials and solar cells*, 95, 8-12.

Reyes G., B. P. (2020), *Efecto en la respuesta fotovoltaica del semiconductor orgánico PEDOT:PSS como reparador de los pinholes presentes en celdas solares de CdTe*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Roshan, R., Yadav, Y., Umashankar, S., Vijayakumar, D. y Kothari, D. (2013). Incremental conductance MPPT algorithm based solar Photovoltaic system using CUK converter. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2 (7), 681-685.

Sánchez J., A., Martínez E., D., Santos M., R. L., Ortega C., J. y Sánchez P., P. A. (2017). *Aplicaciones Fotovoltaicas de la Energía Solar en los Sectores Residencial, Servicio e Industrial*, México: Instituto de Energías Renovables (IER).

Shur, M. (2005). Semiconductors. En Chen, W. K. (Ed.), *The electrical engineering handbook*, 153-165, Elsevier.

Simya, O. K., Radhakrishnan, P. y Ashok, A. (2018). Engineered nanomaterials for energy applications. En Hussaion, C. M. (Ed.), *Handbook of nanomaterial for industrial applications*, 751-, 757, Elsevier.

Tudose, I. V., Comanescu, F., Pascariu, P., Bucur, S., Rusen, L., Iacomí, F., Koudoumas, E y Sucheá, M. P. (2019). Chemical and physical methods for multifunctional nanostructured interface fabrication. En Dinca, V. y Sucheá, M. P. (Eds.), *Functional nanostructured interfaces for environmental and biomedical applications*, 15-26, Elsevier.

Vallejo L., W. A. (2011). *Desarrollo de materiales fotovoltaicos usados como ventana óptica en celdas solares*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia.

Varadharajaperumal, S., Ilango, M. S., Hegde, G., y Satyanarayan, M. N. (2019). Effect of CuPc and PEDOT:PSS as hole transport layer in planar heterojunction CdS/CdTe solar cell. *Material Research Express*, 6(9), 1-10.

Vázquez M., F., García B., A. Hoyo M., J. A., Valencia P., G., Gómez P., H. y Bernal, J. L. (2016). Fabrication and characterization of CdS thin films synthesized by CBD deposited from pH-controlled growth solutions for solar cells applications. *Metallography, microstructure and analysis*, 5 (1), 62-68.

Vigil G., O., Santana R., G., Vidal L., J., Contreras P., G. (2004). Influencia del tratamiento térmico con CdCl<sub>2</sub> sobre las características finales de las celdas solares CdS/CdTe procesadas por transporte de vapor en espacio cercano. *Revista mexicana de física*, 50(4), 353-357.

Wang, H., Lawrence Y., Y., y Chen, H. (2015). Removal mechanism and defect characterization for glass-side laser scribing of CdTe/CdS multilayer in solar cells. *Journal of manufacturing science and engineering*, 137(6)

Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters A y Yang, C. (2018). Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*, 75,450-458

Zarmai, M. T., Ekere, N. N., O duoza, C. F. y Amalu, E. H. (2015). A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic module assembly. *Applied energy*, 154, 173-182.

Zayas B., P. G., Contreras P., G., Santana R., G., Hernández E., Calzadilla O., Gutiérrez, K. Z. B., Sastre H., J y De Melo, O. (2011). CdTe depositado por sublimación isotérmica a corta distancia en celdas solares de CdS/CdTe. *Revista cubana de física*, 28(1), 39-44