



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACION

**“ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE PÉRDIDA  
EN MINI-MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE  
PELÍCULA DELGADA (CdTe)”**

**TESIS**

PRESENTADA POR:

**I.E. MARCO ANTONIO KOH VALLE**

EN OPCIÓN AL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
OPCIÓN ENERGÍAS RENOVABLES

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2016

“Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.”

## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida. Quienes, junto con mi hermano, me brindaron su incondicional apoyo, perfectamente mantenido a través del tiempo.*

*Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.*

*A mis Asesores y Sinodales:*

*Dra. Inés Margarita Riech Méndez por su gran apoyo y motivación para la culminación de mis estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis. Igualmente al Dr. Víctor Rejón Moo por su gran apoyo y por su tiempo compartido e impulsar el desarrollo de mi formación profesional.*

*Finalmente pero no menos importantes:*

*L.D.M. Natalia Victoria Hernández Zapata y L.C.P. Laura Patricia Arredondo Acosta, quienes a través de su valiosa amistad marcaron esta etapa de mi vida, tanto personal como profesional, y que siempre me otorgaron su apoyo incondicional al creer en mí. Así como también sus palabras de aliento que me han sido de gran inspiración y motivación para la conclusión de este trabajo y obtener el grado de Maestro en Ingeniería.*

*Este trabajo fue financiado por el Programa de Posgrados de Calidad del CONACYT. Por todo el apoyo económico y técnico-científico para el desarrollo de esta investigación, se extiende el más sincero agradecimiento al CONACYT, a la Unidad de Posgrado e Investigación de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), así como también al Proyecto CONACYT-Sener Fondo de Sustentabilidad Energética CeMIE-Sol 207450/P25 (Proyecto P25).*

## Abstract

In the present investigation, it was proposed to study the mechanisms of resistive, optical and associated with non-homogeneity of the mini-modules thin film CdS / CdTe with monolithic interconnection loss, as well as to study the influence of the interconnections between their cells. The results were the product of the characterizations made through techniques I-V Curve, Electroluminescence and LBIC into Cadmium Tellurium photovoltaic mini-modules manufactured at the Applied Physics Laboratory of CINVESTAV Merida Unit.

This research was divided into four chapters. Chapter one focuses on the importance of using renewable energies compared to fossil fuels, as well as a brief review of the renewable energy types highlights to make way for a brief introduction to solar PV which is pillar to this investigation. In chapter two the theoretical framework related to manufacturing and operation characteristics of photovoltaic cells and modules, and then focus on performance and defects present in the mini-thin-film modules is presented. In the third chapter it provides experimental development used to study parameters optoelectronic mini-modules thin-film CdTe, detailing the striped films for interconnection and characterization processes carried out in the mini-modules. In the fourth and final chapter, were reported the results obtained during the conduct of this research to provide findings and recommendations to optimize the efficiency of mini-modules in future research.

## Resumen

En la presente investigación, se propuso estudiar los mecanismos de pérdida resistivos, ópticos y asociados a la no-homogeneidad de los mini-módulos de película delgada de CdS/CdTe con interconexión monolítica, así como estudiar la influencia de las interconexiones entre sus celdas. Los resultados obtenidos fueron producto de las caracterizaciones realizadas a través de las técnicas de Curva I-V, Electroluminiscencia y LBIC a mini-módulos fotovoltaicos de Telurio de Cadmio fabricados en el Laboratorio de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida.

Esta investigación fue dividida en cuatro capítulos. En el capítulo uno se enfoca en la importancia de utilizar las energías renovables con respecto a los combustibles fósiles, así como también un breve repaso por los tipos energías renovables más destacadas para dar paso a una breve introducción a la energía solar fotovoltaica que es pilar de esta investigación. En el capítulo dos se presenta el marco teórico relacionado con las características de fabricación y operación de las celdas y módulos fotovoltaicos, para después enfocarse en el funcionamiento y defectos presentes en los mini-módulos de película delgada. En el tercer capítulo se proporciona el desarrollo experimental empleado para el estudio de los parámetros opto-electrónicos de los mini-módulos de película delgada de CdTe, detallando el rayado de las películas para su interconexión y los procesos de caracterización efectuados en los mini-módulos. En el cuarto y último capítulo, fueron reportados los resultados obtenidos durante la realización de esta investigación para ofrecer conclusiones y recomendaciones que permitan optimizar la eficiencia de los mini-módulos en futuras investigaciones.

# ÍNDICE

Responsiva del Trabajo.....	i
Agradecimientos.....	ii
Abstract.....	iii
Resumen.....	iv
Índice.....	v
Lista de Tablas.....	vii
Lista de Figuras.....	vii
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Alcances.....	4
1.5. Las Energías Renovables.....	5
1.5.1. Tipos de Energías Renovables.....	6
1.5.2. Ventajas y Desventajas de las Energías Renovables.....	7
1.6. La Energía Solar.....	8
1.6.1. Energía Solar Fotovoltaica.....	8
<b>Capítulo 2. Módulos Fotovoltaicos.....</b>	<b>10</b>
2.1. La Conversión Fotovoltaica.....	10
2.1.1. Teoría de los Semiconductores.....	11
2.2. Fundamentos de las Celdas Solares.....	13
2.2.1. Construcción de las Celdas Solares.....	14
2.2.2. Características Opto-eléctricas de la Celda Solar.....	19
2.3. Celdas Solares de Telurio de Cadmio.....	24
2.4. Efectos de la No-Homogeneidad en las Interconexiones.....	26
2.5. Funcionamiento de los Módulos Fotovoltaicos.....	26
2.5.1. Interconexión Monolítica de los Módulos.....	27
2.5.2. Defectos en los Módulos.....	28

<b>Capítulo 3. Desarrollo Experimental</b> .....	31
3.1. Manufactura de Mini-módulos con Rayado Híbrido .....	31
3.1.1. Rayado de Películas Delgadas .....	32
3.2. Técnicas de Caracterización .....	36
3.2.1. Corriente-Voltaje .....	36
3.2.2. Electroluminiscencia (EL).....	37
3.2.3. Corriente Foto-inducida por Láser (LBIC).....	38
<b>Capítulo 4. Resultados y Discusión</b> .....	40
4.1. Pruebas de Referencia con Mini-módulo Comercial de Silicio .....	41
4.1.1. Corriente-Voltaje .....	41
4.1.2. Electroluminiscencia (EL).....	42
4.1.3. Corriente Foto-inducida por Láser (LBIC).....	43
4.2. Mini-módulo de CdTe con Rayado Mecánico .....	44
4.2.1. Corriente-Voltaje .....	44
4.2.2. Electroluminiscencia (EL).....	46
4.2.3. Corriente Foto-inducida por Láser (LBIC).....	47
4.3. Mini-módulos de CdTe con Rayado Híbrido .....	48
4.3.1. Corriente-Voltaje .....	49
4.3.2. Electroluminiscencia (EL).....	56
4.3.3. Corriente Foto-inducida por Láser (LBIC).....	58
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	64
Conclusiones.....	64
Recomendaciones.....	65
<b>Bibliografía</b> .....	66

## Lista de Tablas

<b>Tabla 3.1.</b> Tiempos de Activación de los Mini-módulos por Recocido a 400°C.....	35
<b>Tabla 4.1.</b> Parámetros Fotovoltaicos.....	42
<b>Tabla 4.2.</b> Parámetros Fotovoltaicos.....	46
<b>Tabla 4.3.</b> Eficiencias de los Mini-módulos de CdTe y de las Celdas de Área Pequeña/Grande.....	50
<b>Tabla 4.4.</b> Parámetros Fotovoltaicos del Mini-módulo MCAG04.....	52
<b>Tabla 4.5.</b> Parámetros fotovoltaicos de la Celda 5 del Mini-módulo MCAG04 de Área: a) Pequeña y b) Grande.....	53
<b>Tabla 4.6.</b> Parámetros Fotovoltaicos del Mini-módulo MCAG05.....	54
<b>Tabla 4.7.</b> Parámetros fotovoltaicos de la Celda 2 del Mini-módulo MCAG05 de Área: a) Pequeña y b) Grande.....	55

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1.</b> Proceso de Absorción y Creación de Pares Electrón-Hueco.....	12
<b>Figura 2.2.</b> Celda solar: a) Sección Transversal, b) Vista Superior.....	15
<b>Figura 2.3.</b> $I_{sc}$ y $V_{oc}$ contra Intensidad Luminosa.....	15
<b>Figura 2.4.</b> $V_{oc}$ e $I_{sc}$ contra Iluminación en Celda Solar.....	16
<b>Figura 2.5.</b> Circuito de una Celda Solar con Resistencias en Serie y Paralelo.....	17
<b>Figura 2.6.</b> Respuesta Espectral del Silicio, Selenio y el Intervalo Visible.....	18
<b>Figura 2.7.</b> Curva I-V de la Juntura p-n en Oscuro e Iluminada.....	20
<b>Figura 2.8.</b> Circuito Eléctrico de una Celda Solar Ideal.....	21
<b>Figura 2.9.</b> Efecto de la $R_s$ de la Celda Solar en su Curva I-V.....	22
<b>Figura 2.10.</b> Efecto de la $R_{sh}$ de la Celda Solar en su Curva I-V.....	22
<b>Figura 2.11.</b> Circuito Eléctrico de una Celda Solar con Resistencias.....	23
<b>Figura 2.12.</b> Características Opto-eléctricas de la Celda Solar.....	24
<b>Figura 2.13.</b> Configuración de Superestrato de la Celda Solar.....	25
<b>Figura 2.14.</b> Diagrama de: a) Panel Fotovoltaico, b) Celda Solar de CdTe.....	27
<b>Figura 2.15.</b> Pasos de la Escritura por Láser para Interconexión Monolítica.....	28
<b>Figura 2.16.</b> Esquema de un Módulo de CdTe Interconectado Monolíticamente.....	29
<b>Figura 2.17.</b> Módulo de CdTe con Defecto en el Rayado entre Celdas.....	30
<b>Figura 2.18.</b> Módulo de CdTe con Defecto Dentro de las Celdas.....	30
<b>Figura 3.1.</b> Configuración Típica de Superestrato de una Celda Solar de CdTe.....	32
<b>Figura 3.2.</b> Pasos P1, P2 y P3 para el Rayado de Películas Delgadas.....	33
<b>Figura 3.3.</b> Interconexión P1, P2 y P3 de las Películas Delgadas.....	34
<b>Figura 3.4.</b> Mini-módulo Monolítico de CdTe con Rayado Híbrido.....	35
<b>Figura 3.5.</b> Simulador Solar de la FIUADY.....	36
<b>Figura 3.6.</b> Diagrama del Sistema de Electroluminiscencia.....	37
<b>Figura 3.7.</b> Cámara Digital Infrarroja de la FIUADY.....	38
<b>Figura 3.8.</b> Equipo LBIC de la FIUADY.....	39
<b>Figura 4.1.</b> Mini-módulo de Silicio.....	41

<b>Figura 4.2.</b> Curva J-V del Mini-módulo de Silicio.....	41
<b>Figura 4.3.</b> Electroluminiscencia del Mini-módulo de Silicio. ....	42
<b>Figura 4.4.</b> LBIC del Mini-módulo de Silicio. ....	43
<b>Figura 4.5.</b> Mini-módulo de CdTe Fabricado en el CINVESTAV. ....	44
<b>Figura 4.6.</b> Curva J-V del Mini-módulo de CdTe con Rayado Mecánico.....	45
<b>Figura 4.7.</b> Electroluminiscencia del Mini-módulo de CdTe con Rayado Mecánico. ....	46
<b>Figura 4.8.</b> LBIC del Mini-módulo de CdTe con Rayado Mecánico. ....	48
<b>Figura 4.9.</b> Celdas de área: a) Pequeña y b) Grande.....	49
<b>Figura 4.10.</b> Curvas I-V de los Mini-Módulos MCAG04 vs. MCAG05.....	50
<b>Figura 4.11.</b> Curva J-V del Mini-Módulo MCAG04.....	51
<b>Figura 4.12.</b> Curva I-V de Celda 5 del Mini-módulo MCAG04 de Área: a) Pequeña y b) Grande.....	53
<b>Figura 4.13.</b> Curva J-V del Mini-Módulo MCAG05.....	54
<b>Figura 4.14.</b> Curva J-V la Celda 2 del Mini-módulo MCAG05 de Área: a) Pequeña b) Grande. .....	55
<b>Figura 4.15.</b> Electroluminiscencia de: a) MCAG04, b) MCAG05, c) Celda 5 de MCAG05.....	57
<b>Figura 4.16.</b> LBIC del Mini-módulo MCAG04 y Área de Interconexión.....	59
<b>Figura 4.17.</b> LBIC del Mini-módulo MCAG05 y Área de Interconexión.....	59
<b>Figura 4.18.</b> LBIC de MCAG04 con Voltaje Aplicado de: a) -0.2 V, b) 0 V, c) 0.4 V, d) 0.6 V y e) 0.8 V.....	61
<b>Figura 4.19.</b> LBIC de MCAG05 con Voltaje Aplicado de: a) -0.2 V, b) 0 V, C) 0.6 V, d) 1.2 V, e) 1.6 V y f) 2.2 V.....	62

# Capítulo 1

## Introducción

Actualmente, la energía solar está siendo explotada de maneras muy variadas, una de ellas es a través de las celdas solares, que realizan la transformación directa de la luz del sol en electricidad. Cuyo fenómeno es debido al efecto fotovoltaico.

Existen actualmente tres tipos de celdas solares: las de primera generación que operan con silicio, las de segunda generación que son de película delgada y por último, las de tercera generación, las cuales utilizan tecnología orgánica.

En retrospectiva, las celdas solares de película delgada constituyen una excelente alternativa debido a sus virtudes como son su alta tolerancia a defectos, impurezas y posibles daños a causa de la radiación solar. Dentro de este rubro, el Telurio de Cadmio ha sido ampliamente reconocido como el material más promisorio debido a su eficiente conversión fotovoltaica, un mayor ancho de banda para el espectro solar, un alto coeficiente de absorción así como también grandes ventajas en su fabricación al ser económico y de fácil producción en masa al sólo requerir de capas de algunas micras de espesor para la absorción de la luz solar. Sin embargo, hay desafíos para obtener mayores índices de eficiencia. Hoy en día se investigan nuevas estrategias para poder mejorar su eficiencia (Sites J. , 2012).

A través de este trabajo se examinarán los aspectos más importantes de los mini-módulos monolíticos de película delgada, como son su eficiencia y homogeneidad, al igual que algunas de las cuestiones que surgen como resultado de sus interconexiones.

## 1.1. Antecedentes

Las celdas solares basadas en la tecnología del Telurio de Cadmio (CdTe) son dispositivos fotovoltaicos de película delgada con récord mundial establecido por celda de más del 22.1 % (NREL, 2016), y eficiencia por módulo por encima del 17.5 %. Además, el módulo produce el 90 % de su potencia nominal durante los primeros diez años y el 80 % hasta por veinticinco años (Green, Emery, Hishikawa, Warta, & Dunlop, 2014).

La producción a gran escala de celdas solares durante el 2014 superó el límite de 10 GW. Por ende, el sector fotovoltaico ha tenido un crecimiento anual de alrededor del 40 % en los últimos años (First Solar, 2015).

Hoy en día, la tecnología de celdas solares está basada en su mayoría en el Silicio cristalino (Si). Hasta el 2013, el 89.9 % de la producción total se basaba en dicha tecnología, mientras que el porcentaje restante se enfoca en las celdas de película delgada que son creadas mediante un proceso de crecimiento a través de una condensación/reacción atómica/iónica/molecular sobre un sustrato, componiéndose generalmente de hetero-uniones que pueden poseer desplazamientos de banda cuyas propiedades estructurales, químicas, metalúrgicas y físicas dependen de los parámetros del depósito (Arkhipov & Poortmans, 2008; Fraunhofer ISE, 2014).

## **1.2. Justificación**

Las celdas solares de Telurio de Cadmio poseen una eficiencia del 22.1 % (NREL, 2016). Su simplicidad, bajo costo en su procesamiento y buenos resultados, hacen de las celdas solares de película delgada una excelente opción para la conversión fotovoltaica y producción a gran escala de módulos basados en esta tecnología.

La vida media de los paneles fotovoltaicos de película delgada oscila desde veinte hasta treinta años en dependencia de los materiales involucrados, la técnica de depósito, el tipo de encapsulado, la cantidad de radiación solar captada, la temperatura a la que se encuentren, entre otros.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Estudio de los parámetros opto-electrónicos de mini-módulos de película delgada de CdTe para la optimización de su eficiencia.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Identificar los mecanismos de pérdida por recombinación, ópticos y resistencias en los mini-módulos de Telurio de Cadmio.
- Estudiar la influencia de las interconexiones en los mini-módulos.

## **1.4. Alcances**

Desde la perspectiva temporal, no existen limitantes debido a que las mediciones han sido realizadas anteriormente, por lo cual es posible iniciar inmediatamente con el tratamiento y análisis de datos. Permittedose obtener mini-módulos estables, homogéneos y con buena eficiencia.

Adicionalmente, los resultados obtenidos en este trabajo servirán para mejorar los procesos de creación de los mini-módulos, así como contribuir a profundizar el conocimiento de los mecanismos de pérdidas que intervienen y repercuten en el funcionamiento y tecnología de estos dispositivos fotovoltaicos.

Por otra parte, se cuenta con el apoyo del departamento de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida, quienes han logrado crear celdas solares basadas en Telurio de Cadmio con una eficiencia de hasta el 14 %, además de contar con el equipo que permitirá realizar las interconexiones para la creación de los mini-módulos requeridos por esta investigación.

Finalmente, a través de este trabajo se expondrán y analizarán los resultados de las investigaciones, así como los antecedentes que se consideren válidos para el correcto encuadre del presente estudio.

## 1.5. Las Energías Renovables

A medida que la población humana sigue creciendo, también se incrementa la demanda de energía. Lamentablemente, los recursos con los que cuenta la sociedad (carbón, petróleo, entre otros) están agotándose y por ende su costo de producción se ha incrementado notablemente. Lo que significa que no sólo estamos destruyendo el medio ambiente, sino que además destruimos nuestra propia economía, arrastrándonos cada vez más hacia el colapso económico que puede desencadenar en terribles guerras para obtener un poco de recursos para poder subsistir.

Afortunadamente, aún nos encontramos lejos de aquel futuro Orwelliano que tanto nos preocupa. Las energías renovables son la esperanza para la sociedad (erenovable.com, 2015).

Buscando la solución a dicha problemática, se consideran las ventajas del uso de las fuentes de energías renovables. Porque el calentamiento global, la contaminación del aire y de otros recursos, repercuten gravemente en nuestra civilización.

Debido a tales efectos (negativos), las fuentes de energía alternativas se presentan como recursos renovables en el medio ambiente, como son: la energía solar, la energía eólica, la energía hidroeléctrica y la biomasa. Además, las energías renovables son fundamentales para los países menos desarrollados donde los combustibles fósiles empiezan a escasear y/o son de difícil acceso.

Hoy en día se depende principalmente de la extracción del petróleo y sus derivados como principal fuente de combustible fósil. Sin embargo, es preciso hallar fuentes alternas ya que los costos han orillado a las empresas y gobiernos a invertir en el desarrollo de tecnologías renovables y así tener una segunda oportunidad. Las energías renovables no se agotan ni emiten contaminantes como el CO<sub>2</sub> y los gases de invernadero. Pueden ser obtenidas de las fuentes continuas o repetitivas en el medio ambiente que se reponen al mismo tiempo que son utilizadas. De esta manera, a través de las fuentes renovables de energía, pueden ser eliminados los efectos adversos causados por el uso de los combustibles fósiles.

## **1.5.1. Tipos de Energías Renovables**

Existen diversas fuentes de energías renovables conocidas y ampliamente estudiadas, en primer lugar tenemos la energía obtenida directamente del sol y que se renueva continuamente.

### *1.5.1.1. Energía Solar*

La energía solar puede ser aprovechada de manera intensa o moderada en lugares soleados. Ya que la luz solar directa puede ser usada para calentar espacio o agua. Tomemos como ejemplo al país asiático con mayor desarrollo de los tiempos modernos, China, debido a que dos tercios de su territorio disfrutan más de dos mil horas de rayos del sol cada año, estas regiones tienen condiciones favorables para el desarrollo de energía solar, especialmente al oeste de China. Por consiguiente, mediante el uso de sistemas fotovoltaicos se puede producir energía eléctrica.

La energía solar es una excelente alternativa para proveer las necesidades energéticas, además de ser limpia y eficiente. En países como el nuestro, que cuentan con una ubicación excelente para el aprovechamiento de la energía solar, esta es una opción que debe ser aprovechada al máximo.

### *1.5.1.2. Energía Eólica*

La generación de electricidad mediante turbinas de viento no resulta en contaminación para el aire, así que puede que sea el método más eficaz de reducir las emisiones de dióxido de carbón. A pesar de sus ventajas medioambientales incuestionables y de que existe un amplio consenso en nuestra sociedad sobre el alto grado de compatibilidad entre las instalaciones eólicas y el respeto por el medio ambiente, es preciso reconocer que la instalación concreta de un parque eólico puede producir impactos ambientales negativos en el emplazamiento elegido.

### *1.5.1.3. Energía Hidroeléctrica*

La energía hidroeléctrica es una fuente de energía renovable ampliamente utilizada. Contribuye al 6 % de la producción primaria de energía mundial y al 20 % de la energía eléctrica del mundo. La hidroeléctrica tiene sus desventajas, ya que los sistemas hidroeléctricos necesitan un gran capital de costo inicial.

#### *1.5.1.4. Energía por Biomasa*

La biomasa es una fuente energética muy importante para los países en desarrollo al representar un tercio de su consumo total de energía. Además que su comercialización contribuye a la generación de empleos para los pobladores locales (Xintao & Junzi, 2010).

### **1.5.2. Ventajas y Desventajas de las Energías Renovables**

Las fuentes de energías renovables solares, eólicas y de movimiento, tienen una salida altamente variable. Dichas fuentes, la mayoría del tiempo, no cumplen las demandas de carga. Produciendo gran cantidad de energía cuando no se necesita y baja cantidad de energía cuando se necesita. Debido a esto, las energías renovables tienen una contribución limitada y difícil de controlar. Para sobrellevar estos problemas, el almacenamiento de energía debe ser usado como solución.

Muchos beneficios pueden ser alcanzados usando almacenamientos de energía eficientes en las empresas eléctricas. Algunos de estos beneficios son: maximizar la contribución de las energías renovables, hacer más eficiente el uso de energías, mejor relación de generación y demanda, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, abaratar costos de conexión de red de distribución y de control de los sistemas de energía (Alamri, 2009).

Para reducir el consumo de energías basadas en combustibles fósiles y su impacto en el ambiente, es preciso fortalecer políticas para el desarrollo de energías renovables, así como leyes regulatorias para los mayores consumidores de energía. Dando como resultado, un mayor aprovechamiento de los recursos que se poseen.

Cada sistema de energías renovables tiene sus ventajas y desventajas, las cuales pueden contemplarse en el plan de desarrollo para un país, para así acoplar las necesidades y facultades al desarrollo sustentable de la región. Actualmente se llevan a cabo el desarrollo de tecnologías para lograr una mayor eficiencia en los sistemas de energías renovables. Se han precisado los puntos débiles de las desventajas de estos sistemas para aplicar el desarrollo científico y así lograr un mayor aprovechamiento de los recursos naturales renovables.

## **1.6. La Energía Solar**

La energía solar es la energía radiante producida en el Sol como resultado de sus reacciones nucleares de fusión. Llega a la Tierra a través del espacio en “cuantos” o paquetes de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres. Se trata de una energía limpia, inagotable y económica. Sin embargo, el problema en relación a esta forma de energía radica en cómo poder aprovecharla de forma eficiente.

Dos son las direcciones actualmente aplicadas: la conversión eléctrica y la térmica. Ambas dan lugar a los dos tipos de aprovechamiento hoy existentes:

- a) Energía solar fotovoltaica.
- b) Energía solar térmica.

La energía solar como fuente de energía presenta ciertas ventajas e inconvenientes. Entre las ventajas destacamos la elevada calidad energética, el nulo impacto ecológico y su carácter inagotable a escala humana. Por otra parte, la forma semi-aleatoria en la que la tenemos disponible (sometida a ciclos de día/noche y estacionales), su forma dispersa de llegar a la Tierra y el no poderse almacenar de forma directa al requerir de su transformación energética, restringen moderadamente su uso.

### **1.6.1. Energía Solar Fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía solar renovable basada en la aplicación del llamado efecto fotovoltaico. Producido al incidir luz sobre unos materiales denominados semiconductores de modo que se genera un flujo de electrones en el interior del material y una diferencia de potencial que puede ser aprovechada.

Debido a su sencillez, fiabilidad y operatividad, la energía solar fotovoltaica se emplea comercialmente para la generación eléctrica en el mismo lugar de la demanda y así satisfacer el consumo energético.

Atendiendo a sus aplicaciones actuales, podemos dividir este tipo de energía en tres grandes grupos:

1. Aplicaciones tradicionales como el suministro eléctrico en emplazamientos de difícil acceso para la red eléctrica convencional o con áreas de difícil abastecimiento eléctrico, electrificación de viviendas o explotaciones rurales y suministro de diferentes sistemas de telecomunicaciones, señalización, etc.
2. Aplicaciones conectadas a la red: centrales de potencia o centrales fotovoltaicas y pequeñas instalaciones asociadas a consumidores domésticos o industrias.
3. Aplicaciones singulares dedicadas a la alimentación energética de objetos particulares, que abarcarían desde satélites artificiales a aplicaciones en objetos de bolsillo.

#### *1.6.1.1. Celdas Solares*

Son dispositivos formados por semiconductores sensibles a la luz que desprenden electrones cuando los fotones inciden sobre ellos, convirtiendo la energía luminosa en energía eléctrica. Las celdas se elaboran a partir de una base de silicio puro con adición de impurezas de ciertos elementos químicos, son capaces de generar corriente de entre 2 A a 4 A con un voltaje de 0.46 V a 0.48 V, utilizando como materia prima la radiación solar.

#### *1.6.1.2. Paneles Solares*

Las celdas se conectan en serie sobre paneles o módulos para conseguir un voltaje adecuado a las aplicaciones eléctricas. Los paneles captan la energía solar transformándola directamente en eléctrica en forma de corriente continua que se almacena en acumuladores, para que pueda ser utilizada fuera de las horas de luz de día. Los módulos fotovoltaicos, admiten tanto radiación directa como difusa, pudiendo generar energía eléctrica incluso en días nublados (Miliarium.com, 2008).

## Capítulo 2

### Módulos Fotovoltaicos

El nacimiento y desarrollo de las tecnologías fotovoltaicas estuvieron inicialmente ligados a la historia de la radio, las telecomunicaciones, la electrónica y los viajes espaciales. Es a partir de la década de los 70's, coincidiendo con la primera gran crisis energética internacional, cuando la energía fotovoltaica empieza a investigarse y a desarrollarse como una fuente de energía con gran atractivo por sus características y aplicaciones potenciales (Balenzategui Manzanares, 2008).

#### 2.1. La Conversión Fotovoltaica

El proceso de conversión de la radiación solar en electricidad es diferente entre las tecnologías fotovoltaica y térmica. Aunque la energía fotovoltaica comparte con la energía térmica algunos de los conceptos teóricos y técnicas empleadas (materiales, dispositivos ópticos, sistemas de seguimiento, etc.), las tecnologías térmicas utilizan el calor como fuente primaria de energía mientras que las fotovoltaicas requieren de la luz como materia prima. Esta distinción entre luz y calor es evidente por cuanto ambos conceptos conforman de forma inseparable la propia esencia de la radiación solar y de la energía que transporta.

Mientras los sistemas térmicos utilizan un fluido como material absorbente intermedio en un proceso de al menos tres etapas (captación, absorción, transformación), los sistemas fotovoltaicos emplean como medio material un compuesto semiconductor que transforma la radiación en electricidad en un proceso de una sola etapa (absorción-conversión). Existen muchas otras diferencias en cuanto a sus características de funcionamiento. Por ejemplo, el incremento de temperatura en un sistema fotovoltaico afecta negativamente al rendimiento de conversión al contrario de los sistemas térmicos (Balenzategui Manzanares, 2008).

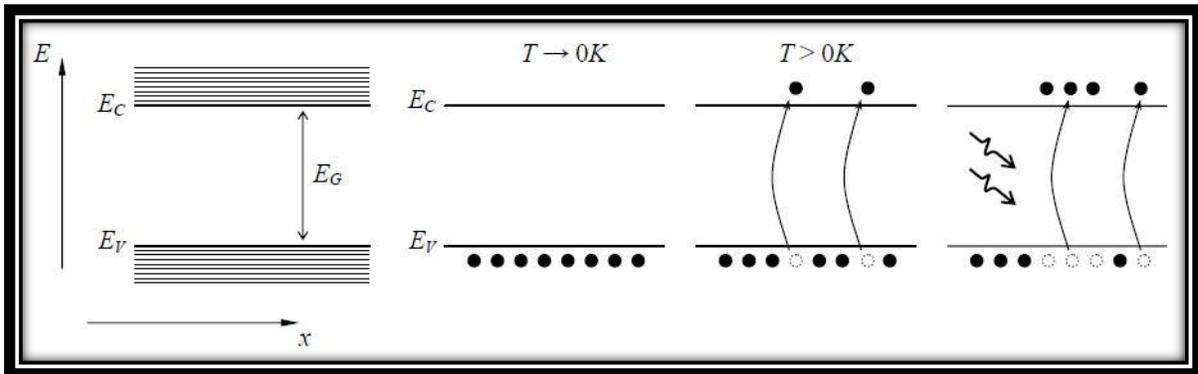
### **2.1.1. Teoría de los Semiconductores**

La celda solar fotovoltaica es un dispositivo electrónico de estado sólido capaz de convertir (en forma directa) la radiación solar en energía eléctrica. Aunque su funcionamiento es muy distinto, una celda solar se comporta al recibir la radiación solar de forma similar a una pequeña batería, la cual es capaz de suministrar una cierta cantidad de corriente mientras mantiene entre sus bornes una diferencia de potencial determinada. La energía eléctrica producida se suministra en forma de una corriente eléctrica continua (DC) a una carga externa conectada mediante un circuito a uno o varios grupos de celdas que se ensamblan en unidades compactas denominadas módulos fotovoltaicos.

El efecto fotovoltaico está basado en la propiedad que poseen los materiales semiconductores de aumentar la densidad de electrones libres bajo ciertos estímulos externos como la elevación de su temperatura o incidencia de luz. En este último caso, la energía de los fotones incidentes sobre el semiconductor es absorbida por los electrones de valencia que pueden romper el enlace con sus átomos y quedar libres para desplazarse en el seno del material. La densidad de electrones libres creados por la absorción de la luz incidente representa una población en exceso respecto a la concentración existente en equilibrio térmico, siendo ésta última estable y característica a una temperatura dada.

La ausencia de un electrón en el enlace atómico roto se denomina hueco y su comportamiento se asimila al de una partícula de carga positiva que puede desplazarse de un átomo a otro en el seno de la red cristalina. Las propiedades de conducción eléctrica de un material semiconductor son debidas a la contribución de ambos tipos de cargas (electrones y huecos), aspecto que los diferencia respecto al comportamiento de los materiales conductores y aislantes. A electrones y huecos se les engloba normalmente con la denominación más genérica de portadores de carga. Es importante observar que la concentración de electrones y de huecos en un material puro o intrínseco será la misma, puesto que ambos tipos de portadores se crean simultáneamente en el mismo instante.

En la Figura 2.1 se ilustran los procesos antes mencionados a través de un modelo de bandas de energía. En dicho modelo los niveles de energía permitidos para los electrones más alejados del núcleo atómico de los átomos que conforman la red cristalina se agrupan en dos rangos o bandas de energía. El rango o banda inferior de estados permitidos se denomina Banda de Valencia ( $E_V$ ) y representa el conjunto de valores energéticos posibles para los electrones de valencia que aún permanecen ligados a los átomos de la red. La banda superior se denomina Banda de Conducción ( $E_C$ ) y engloba los valores de energía posibles para electrones que han roto su enlace y pueden moverse libremente en el material. Ambas bandas aparecen separadas entre sí por un intervalo que representa la cantidad de energía necesaria para que un electrón de valencia pueda romper el enlace. Este salto energético se llama Banda Prohibida o Gap de Energía ( $E_G$ ), y su ancho es característico de cada material semiconductor ( $E_G = 1.12$  eV para el Si,  $E_G = 1.47$  eV para el CdTe,  $E_G = 0.66$  eV para el Ge y  $E_G = 1.42$  eV para el GaAs).



**Figura 2.1.** Proceso de Absorción y Creación de Pares Electrón-Hueco.

A su vez, cerca del cero absoluto de temperatura, los electrones de valencia están atrapados en sus átomos. Al incrementarse la temperatura, algunos electrones adquieren suficiente energía para romper los enlaces y saltar a la Banda de Conducción. Los electrones de valencia pueden liberarse si el dispositivo es iluminado con fotones con una energía  $E > E_G$  (Balenzategui Manzanares, 2008).

## 2.2. Fundamentos de las Celdas Solares

Durante las últimas décadas las celdas solares de silicio han sido el pilar de la industria fotovoltaica, representando actualmente más del 80 % de la producción energética mundial (Lynn, Electricity from Sunlight, 2010). Los paneles fotovoltaicos basados en esta tecnología poseen gran fiabilidad y cuentan con una duración que oscila entre 20 a 25 años.

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos estáticos, ya que carecen de partes móviles. La conversión directa de la energía solar en electricidad depende del efecto fotoeléctrico que ya había sido descubierto en diversas formas en el siglo XIX. El efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones de una superficie sólida o líquida cuando se irradia con emanaciones electromagnéticas. Existen dos tipos de efectos fotoeléctricos en las celdas solares. El primero es el interno, donde ciertos portadores de carga se ven liberados dentro del seno de un material mediante la absorción de fotones energéticos. En el caso del efecto fotoeléctrico externo, se emiten electrones libres mediante la absorción de fotones energéticos (Ramírez, 2003).

Partiendo de una oblea de silicio, se produce una celda solar una vez creado el campo eléctrico interno y después de preparar los contactos eléctricos adecuados. Los contactos eléctricos en ambas caras de la oblea son de geometría y características especiales. La cara que no recibe la radiación se recubre totalmente mientras que la cara expuesta a los rayos solares sólo se cubre parcialmente mediante un electrodo metálico en forma de red. Permitiendo que el electrodo recoja en forma eficiente los portadores de carga eléctrica generados en el interior de la oblea (Ramírez, 2003).

Existen dos tipos principales de celdas solares de silicio cristalino de alta corriente en producción a escala comercial:

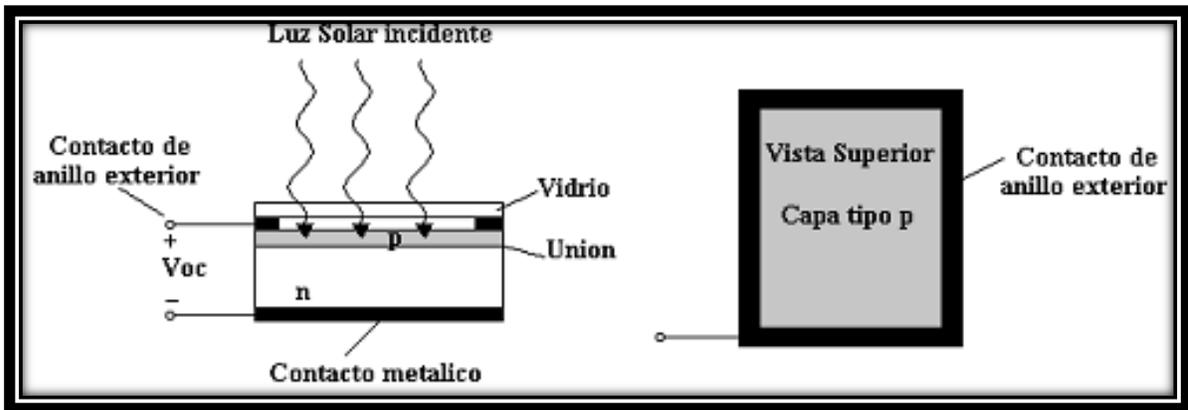
- **Monocristalino.** Hechos en largos cilindros y rebanadas en círculos, cuadrados u obleas octagonales, estas celdas son las más eficientes y las más caras. El silicio cristalino cuenta con alrededor de la mitad del mercado fotovoltaico. Requieren una fabricación muy costosa, incluyendo el dopaje de otros elementos en pequeñas cantidades para producir las características

eléctricas necesarias. La eficiencia del módulo comercial cae en el rango del 12-16 %. El módulo requiere un área de aproximadamente  $7 \text{ m}^2/\text{kWp}$  (Lynn, Electricity from Sunlight, 2010).

- **Policristalino.** Hecho de silicio fundido en forma de lingotes o trazado en láminas y cortados en obleas cuadradas, estas celdas son más baratas pero menos eficientes. Las celdas y módulos policristalinos son de color azul con una escamosa y brillante apariencia. Los módulos policristalinos presentan eficiencias típicas en el rango del 11 % al 15 % y han superado a sus pares monocristalinos en volumen de producción en los últimos años. El módulo requiere un área de  $8 \text{ m}^2/\text{kWp}$  (Lynn, Electricity from Sunlight, 2010).

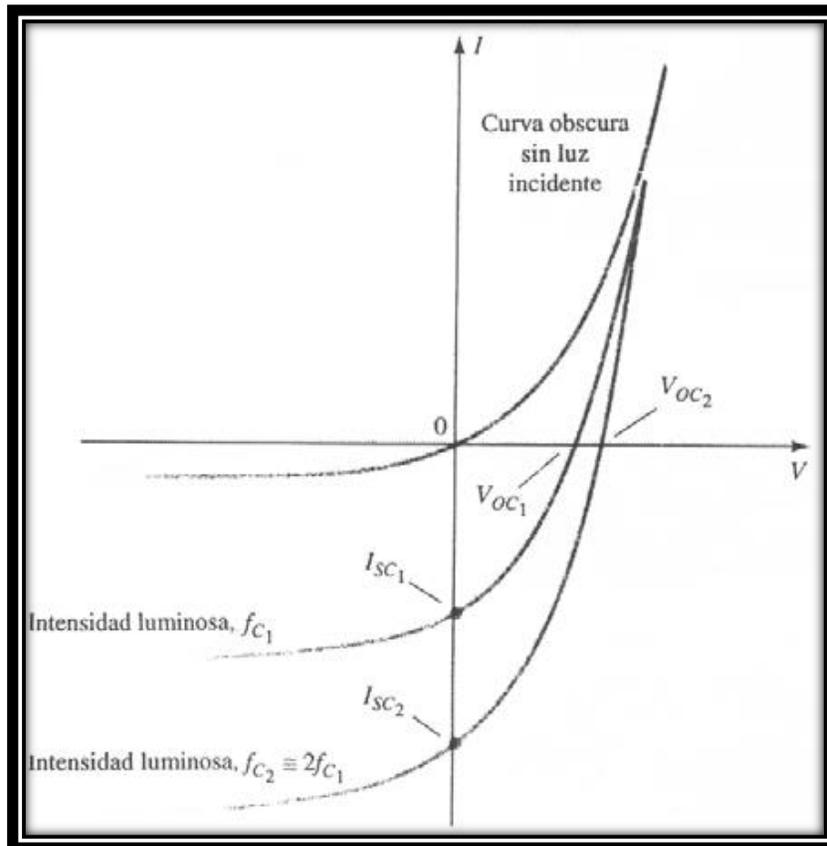
### 2.2.1. Construcción de las Celdas Solares

Como se muestra en la figura 2.2, en la vista superior de una celda solar se hace todo tipo de esfuerzos para asegurar que el área superficial perpendicular al sol sea máxima. La capa metálica conectada al material tipo n y el grosor de este mismo son tales que aseguran que un número máximo de fotones alcancen la unión. Un fotón en esta región puede chocar con un electrón de valencia e impartirle suficiente energía para que abandone el átomo, generándose los electrones libres y los huecos. Este fenómeno ocurrirá a cada lado de la unión. En el material tipo n los nuevos huecos generados son portadores minoritarios y se moverán con bastante libertad a través de la unión como en el caso de la unión p-n básica sin polarización aplicada. Un argumento similar se cumple para los electrones generados en el material tipo p. El resultado es un aumento en el flujo de portadores minoritarios, cuya dirección es opuesta a la de la corriente directa convencional de una unión p-n.



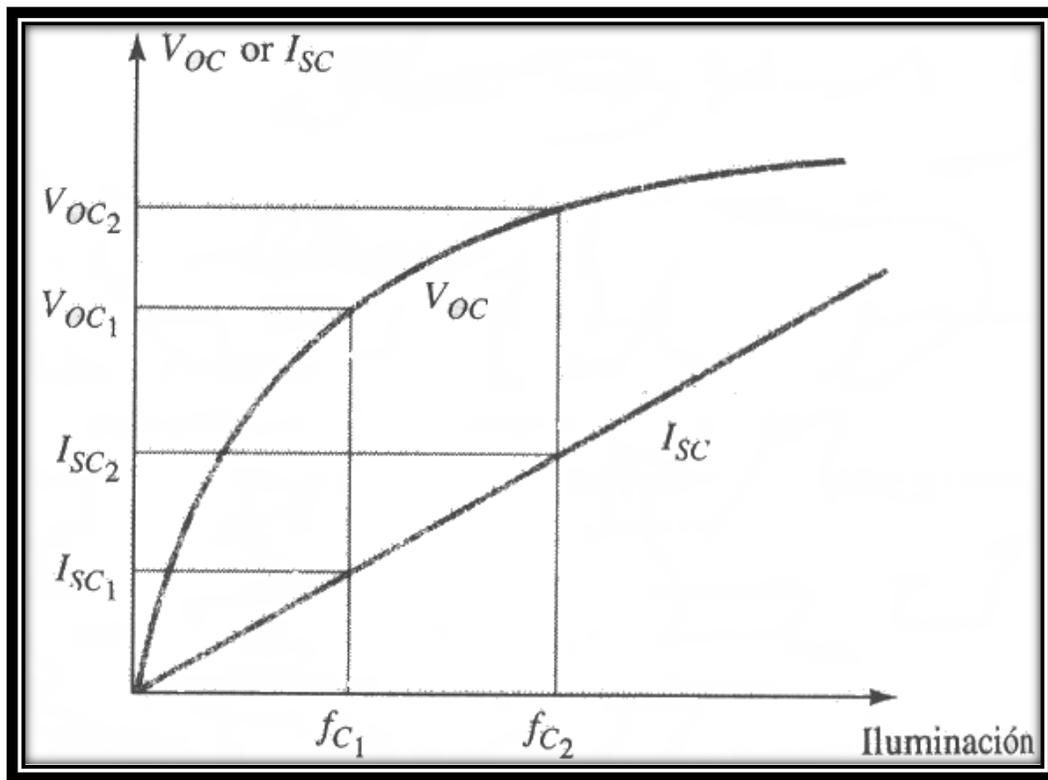
**Figura 2.2.** Celda solar: a) Sección Transversal, b) Vista Superior.

Este incremento en la corriente inversa se muestra en la figura 2.3. Como  $V = 0$  en todas partes sobre el eje vertical y representa una condición de cortocircuito, la corriente en esta intersección se denomina corriente de cortocircuito y se representa mediante la notación  $I_{sc}$ .



**Figura 2.3.**  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$  contra Intensidad Luminosa.

En condiciones de circuito abierto se producirá el voltaje fotovoltaico  $V_{OC}$ , el cual es el voltaje terminal de una batería en condiciones sin carga (circuito abierto). Obsérvese que en la figura 2.4 la corriente de cortocircuito es una función lineal de la iluminación. Esto significa que se duplicará para el mismo incremento en la iluminación  $f_{c1}$  y  $f_{c2}$ , en tanto que el cambio en  $V_{OC}$  es menor para esta región. El mayor incremento de  $V_{OC}$  ocurre para aumentos de menor nivel de la iluminación. Un aumento adicional en la iluminación tendrá muy poco efecto sobre  $V_{OC}$  aunque  $I_{SC}$  aumentará provocando que se incremente la potencia (Ramírez, 2003).

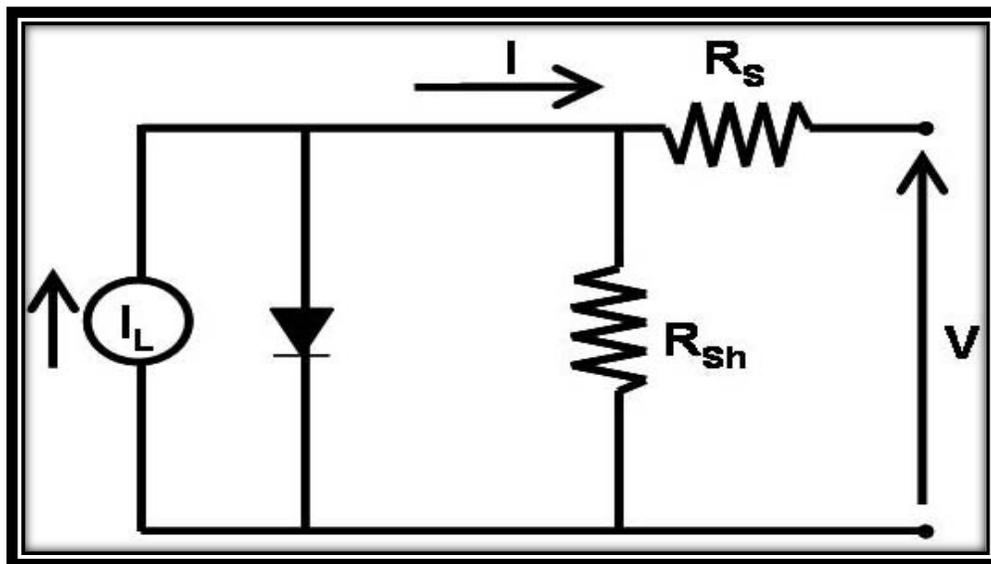


**Figura 2.4.**  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  contra Iluminación en Celda Solar.

La celda solar se representa con un circuito equivalente como el de la figura 2.5, cuyas características son:

1. La resistencia serie ( $R_S$ ) debe ser muy baja, del orden de  $1 \Omega$ . La máxima potencia transferida no tendría lugar si hubiese una caída de voltaje apreciable en  $R_S$ . ( $R_S$  está formada por dos resistencias: la resistencia de contacto y la resistencia laminar).

2. El dopado de las celdas solares es de magnitud más elevada. Conforme el nivel de dopado se aproxima al de un conductor, la resistencia en serie se reduce notablemente y la región desierta se hace muy estrecha, aumentando la tensión en circuito abierto.
3. El área de la celda solar es mucho mayor con lo cual puede interceptarse mayor flujo radiante.
4. El elevado dopado y la película anti-reflexiva disminuyen notablemente las pérdidas por reflexión.
5. La capa superior es tan delgada hasta donde es posible para extender la respuesta en ultravioleta hasta coincidir con el espectro solar.
6. Las celdas solares trabajan siempre sin polarización.
7. La velocidad y respuesta de una celda solar son considerablemente menores que en un fotodiodo.
8. En muchas celdas solares, la resistencia de contacto se disminuye empleando un contacto directo.
9. Normalmente se usa una película superior para reflejar parte del espectro solar (próximo al ultravioleta y al infrarrojo) que produce calor pero origina pocos portadores de corriente.

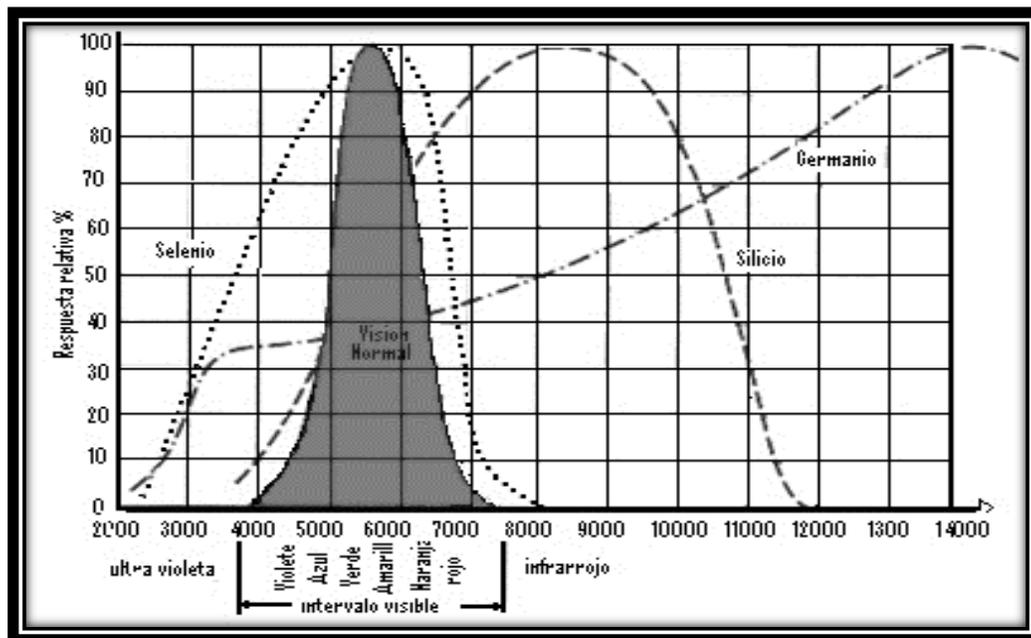


**Figura 2.5.** Circuito de una Celda Solar con Resistencias en Serie y Paralelo.

La figura 2.5 es el circuito equivalente de una celda solar en donde  $I_L$  es la corriente de carga,  $I$  es el flujo de corriente a través del circuito,  $R_s$  es la resistencia en serie,  $R_{sh}$  es la resistencia en paralelo y  $V$  es el voltaje generado en el circuito.

El silicio y el telurio de cadmio (CdTe) son los materiales más utilizados en las celdas solares, aunque también se emplean otros como son: el arseniuro de galio (GaAs), el arseniuro de indio (InAs) y el sulfuro de cadmio (CdS). La longitud de onda de la luz incidente afectará la respuesta de la unión p-n ante los fotones incidentes. En la figura 2.6 nótese la proximidad de la curva de respuesta de la celda de selenio a la correspondiente al ojo humano. Este hecho tiene una aplicación ampliamente utilizada en el equipo fotográfico, tal como los medidores de exposición y los diafragmas de exposición automática; el silicio se traslapa con el espectro visible cuyo su máximo es en la longitud de onda de 800 nm, localizada en la región infrarroja.

En general, el silicio tiene una eficiencia de conversión más alta y una mayor estabilidad estando menos sujeto a la fatiga. Los materiales antes mencionados tienen excelentes características de temperatura. Es decir, pueden soportar temperaturas muy altas o bajas sin una disminución importante de su eficiencia (Ramírez, 2003).



**Figura 2.6.** Respuesta Espectral del Silicio, Selenio y el Intervalo Visible.

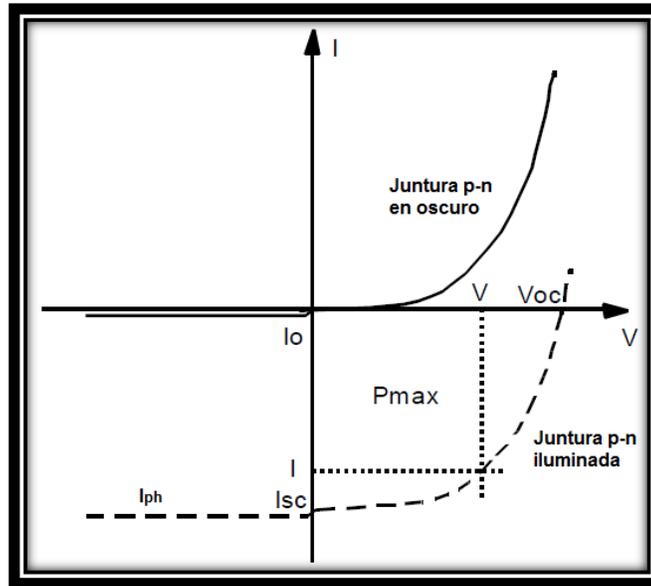
La radiación afecta al tiempo de vida de los portadores minoritarios y, la respuesta de la celda a longitudes de onda larga se reduce debido a que los pares inducidos por el infrarrojo se forman generalmente más allá de la región desierta y tienen mayor recorrido de difusión. En las celdas n sobre p, los portadores minoritarios en la región inferior p son electrones cuyo tiempo de vida es mucho mayor que el de los huecos, y por tanto son menos afectados por la radiación.

La eficiencia de operación de una celda solar se determina mediante la salida de potencia eléctrica dividida entre la potencia que proporciona la fuente luminosa. Es decir, los niveles típicos de eficiencia varían del 10 % al 40 % (NREL, 2016).

### **2.2.2. Características Opto-eléctricas de la Celda Solar**

La curva I-V representa las características opto-eléctricas de los dispositivos fotovoltaicos, ya que esta va en función la cantidad de luz a la que se encuentre expuesta, por la temperatura y por la característica de la carga que esté conectada. (Honsberg & Bowden, PVEducation.org, 2014).

Al incidir un fotón sobre la zona de carga espacial de la unión p-n es creado un par electrón-hueco que se separa a causa del campo eléctrico presente a ambos lados de la juntura. A su vez, el potencial de contacto separa los pares electrón-hueco ocasionando que los electrones presentes en el material p fluyan hacia el material tipo n y viceversa. La figura 2.7 ilustra que el comportamiento de la curva I-V de la celda es similar a la del diodo ideal en oscuro y bajo iluminación, produciéndose la fotocorriente ( $I_{ph}$ ) a la par de la corriente de saturación ( $I_0$ ) (Mijangos Alonzo, 2014).



**Figura 2.7.** Curva I-V de la Juntura p-n en Oscuro e Iluminada.

Cuando la celda está en modo de circuito abierto, los electrones y huecos acumulados en ambos lados de la juntura provocan un voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) que es el voltaje máximo entregado por la celda en base a su temperatura y la irradiancia cuando sus contactos están en cortocircuito, cuyos valores van en función del material utilizado para la fabricación de la celda, siendo de 0.9 V en el caso del CdTe (Borges Pool, 2014). Su comportamiento es representado con la ecuación:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.1)$$

Donde K es la constante de Boltzman ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/°K), T es la temperatura en °K,  $I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito,  $I_0$  es la corriente de saturación de los portadores libres que fluyen a través de la juntura p-n y q es la carga del electrón ( $1.6 \times 10^{-19}$ C) (Carranza Flores, 2004).

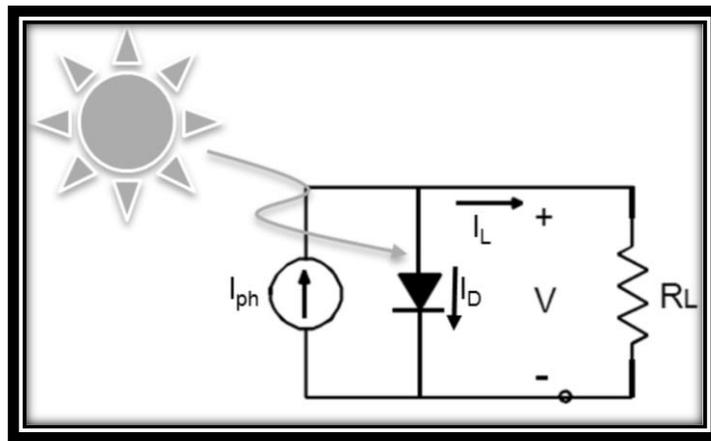
La corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) es el valor máximo de la corriente foto-generada que fluye a través de la celda cuando su resistencia y voltaje son iguales a cero (Mijangos Alonzo, 2014). Por otra parte, el flujo de corriente que fluye a través de la juntura se representa con la ecuación:

$$I = -I_{ph} + I_0 \left[ e^{\frac{V}{VT}} - 1 \right] \quad (2.2)$$

En la ecuación 2.2,  $I_{ph}$  representa la corriente foto-generada a causa de la luz incidente de luz en la celda, mientras que el resto de la ecuación es la corriente de la juntura en oscuro. En la figura 2.7 se observa la zona de operación la curva I-V de la cual se extrae la potencia eléctrica de la celda. En base a la ecuación 2.1 se puede inferir que la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) puede ser considerada como igual pero inversa a la corriente foto-generada ( $I_{ph}$ ) (Mijangos Alonzo, 2014).

$$I = -I_{ph} = I_{sc} \quad (2.3)$$

En la figura 2.8 se representa el circuito eléctrico equivalente a la celda solar ideal, en donde la fuente de corriente va en función de la potencia irradiada sobre la juntura.

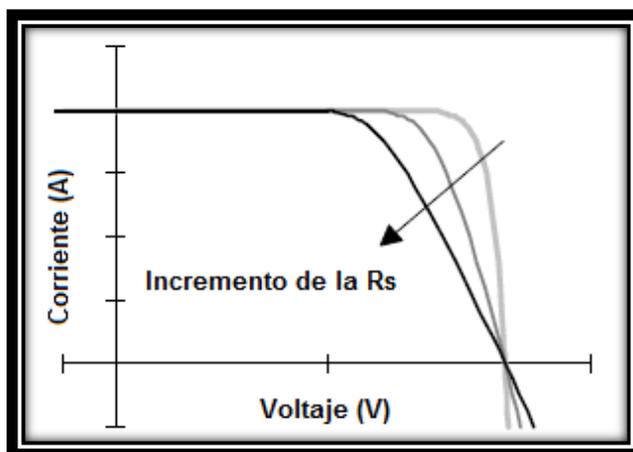


**Figura 2.8.** Circuito Eléctrico de una Celda Solar Ideal.

Por otra parte, las celdas solares reales ven afectado su comportamiento a causa de las resistencias ( $R$ ), que son la oposición que ejercen los electrones al desplazarse por un conductor, se expresa de la siguiente forma:

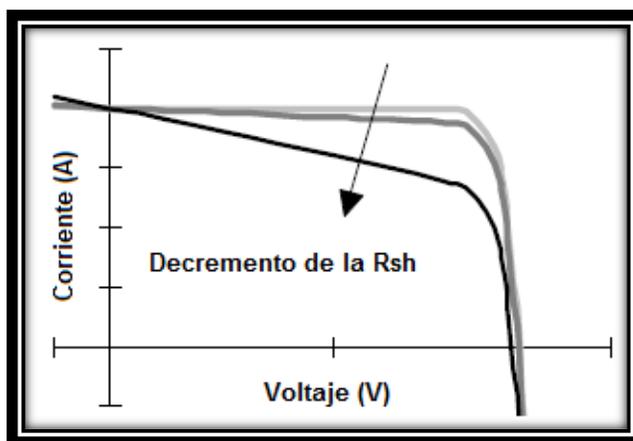
$$R = \frac{V}{I} \quad (2.4)$$

Las resistencias se expresan en ohm ( $\Omega$ ) y pueden estar en serie o paralelo. Sus efectos son considerados con respecto a la resistencia en serie ( $R_s$ ) y la resistencia en paralelo o “shunt” ( $R_{sh}$ ).



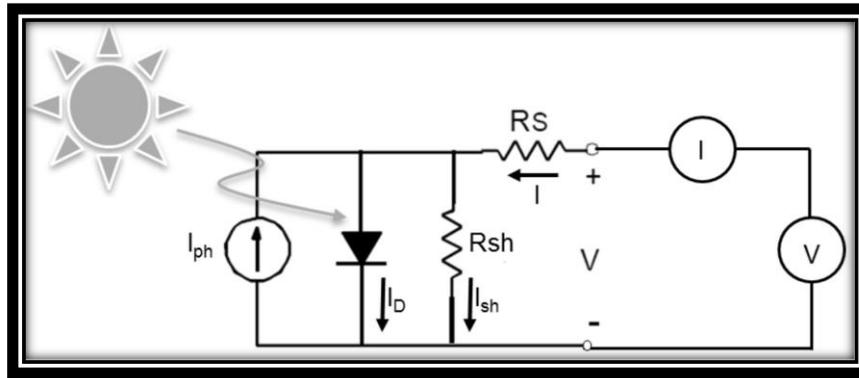
**Figura 2.9.** Efecto de la  $R_s$  de la Celda Solar en su Curva I-V.

En el caso de la resistencia en serie, sus efectos son a causa de la barrera de potencial presente entre los contactos y el espesor de las películas depositadas (Mijangos Alonzo, 2014). La  $R_s$  es debida a la baja conductividad de la capa ventana (CdS) y la capa absorbente (CdTe), así como a la recombinación de los portadores en los materiales, reduciéndose la potencia de salida y suavizando la curva I-V que eventualmente afectará la  $I_{sc}$  y el FF de la celda (Borges Pool, 2014).



**Figura 2.10.** Efecto de la  $R_{sh}$  de la Celda Solar en su Curva I-V.

La figura 2.10 representa el efecto de la  $R_{sh}$  en la curva I-V de la celda solar, la cual está asociada con defectos como pueden ser las corrientes de fuga, agujeros y otros efectos físicos que degradan el  $V_{oc}$  y el FF de la celda (Borges Pool, 2014).



**Figura 2.11.** Circuito Eléctrico de una Celda Solar con Resistencias.

La Figura 2.11 representa el circuito eléctrico de una celda solar real, en la cual se consideran los efectos resistivos. Aplicando las leyes de Kirchoff se obtiene la ecuación (Mijangos Alonzo, 2014):

$$I + I_{ph} = I_D + I_{sh} \quad (2.5)$$

Por lo que en base a las variables introducidas por las resistencias en serie y paralelo, la ecuación 2.5 queda así:

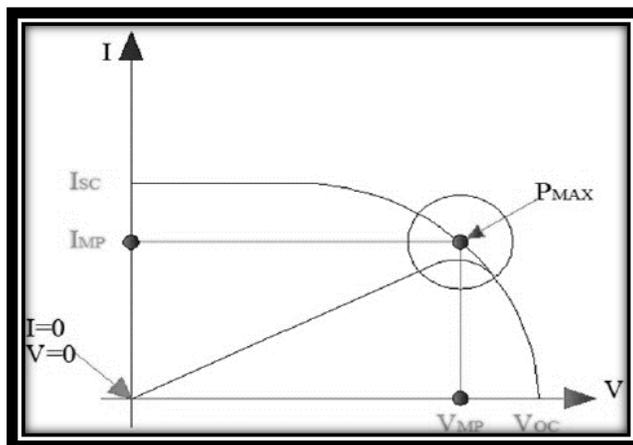
$$I = I_0 \left[ e^{\frac{V - I \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right] + \frac{V - I \cdot R_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (2.6)$$

En la figura 2.12 se presenta el punto donde la corriente y el voltaje adquieren sus puntos máximos bajo condiciones de temperatura y radiación particulares; es la Potencia Máxima ( $P_{MAX}$ ) la que determina cuanta energía transforma la celda respecto a la energía recibida (Honsberg & Bowden, PVEducation.org, s.f.).

La  $P_{MAX}$  puede encontrarse a través de la ecuación:

$$P_{MAX} = I_{MAX} \cdot V_{MAX} \quad (2.7)$$

Donde  $I_{MAX}$  y  $V_{MAX}$  representan la corriente y voltaje máximos, respectivamente (Borges Pool, 2014).



**Figura 2.12.** Características Opto-eléctricas de la Celda Solar.

El Factor de Llenado (FF) es el cociente entre la potencia máxima y el producto entre la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto (Borges Pool, 2014). Su ecuación es:

$$FF = \frac{P_{MAX}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (2.8)$$

Para el cálculo de la Eficiencia ( $\eta$ ), que equivale al total de energía solar que la celda solar puede convertir en electricidad, se debe considerar la potencia máxima que el dispositivo puede entregar con respecto a la potencia de radiación incidente ( $P_{in}$ ) (Mijangos Alonzo, 2014):

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{in}} \cdot (100 \%) \quad (2.8)$$

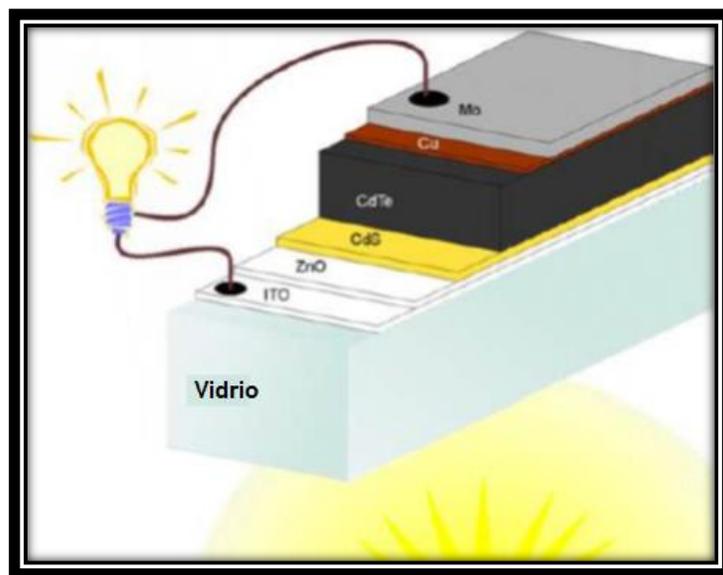
### 2.3. Celdas Solares de Telurio de Cadmio

Las celdas solares de Telurio de Cadmio son la base de una tecnología con gran impacto comercial en el rubro de la producción de energía solar. Ello se debe a que poseen una mayor estabilidad y rendimiento competitivo (McCandless & Sites, 2003).

El CdTe es un semiconductor compuesto que surgió en 1947 cuando fueron sintetizados cristales de Telurio de Cadmio a través de la reacción de vapores de Cadmio y Telurio en una atmósfera de hidrógeno y se midió su fotoconductividad. Para 1954 se reportó que la conductividad de tipo p y tipo n podía obtenerse en el CdTe a

través de impurezas externas. Es un compuesto cristalino con cristales de forma cúbica. Tiene muy baja solubilidad en agua y es grabada por muchos ácidos, tales como ácidos bromhídrico y clorhídrico. Está disponible comercialmente como polvo o cristales. Posee un peso molecular de 240.01 g/mol, densidad de 5.85 g/cm<sup>3</sup>, su punto de fusión es de 1092 °C y su punto de ebullición de 1130 °C. Su banda prohibida es de 1.44 eV con una constante dieléctrica de 10.2 e índice de refracción de 2.67 (Mijangos Alonzo, 2014).

Las celdas solares con hetero-junturas de Telurio de Cadmio se fabrican en dos diferentes configuraciones: substrato y superestrato. En ambas configuraciones, la luz entra en la celda a través de un óxido conductor transparente (TCO) y las películas de sulfuro de cadmio (CdS). En la configuración de superestrato (figura 2.13), las películas de TCO, CdS y CdTe son depositadas secuencialmente en un vidrio superestrato que sirve como soporte mecánico para la celda antes de alcanzar la unión CdTe/CdS.



**Figura 2.13.** Configuración de Superestrato de la Celda Solar.

Las celdas solares de CdTe actuales se basan en el concepto del CdTe tipo p y el CdS tipo n. Mientras que las propiedades eléctricas deseadas se obtienen a través de tratamientos de activación que incorporan impurezas específicas en las capas de CdTe/CdS (McCandless & Sites, 2003).

## **2.4. Efectos de la No-Homogeneidad en las Interconexiones**

Las pérdidas por desacople son causadas por la interconexión entre las celdas o módulos que no tienen propiedades idénticas o que experimentan condiciones diferentes uno del otro. Dichas pérdidas son un problema grave en los módulos fotovoltaicos porque la salida de todo módulo fotovoltaico, bajo las peores condiciones, es determinada por la celda solar con la salida más baja.

Las diferencias en cualquier parte de la curva I-V entre una celda solar y otra, pueden conducir a pérdidas por desacople en algún punto de su funcionamiento. Aunque los grandes desacoples suelen ser causados principalmente por las diferencias en la corriente de cortocircuito o el voltaje de circuito abierto, el impacto por desacople depende tanto de la configuración de circuito como del tipo de desacople (Honsberg & Bowden, PVEducation.org, 2014).

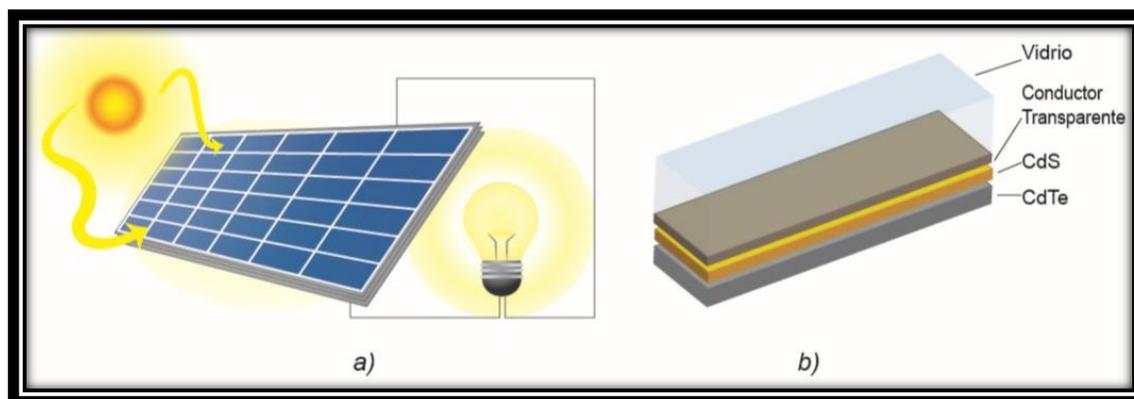
Cuando se hace un escalamiento en el área de los dispositivos fotovoltaicos, aparecen otros mecanismos de pérdida diferentes a los que aparecen en las celdas solares individuales. Entre estos mecanismos se encuentran las interconexiones de las celdas y el área correspondiente a los bordes con pobre desempeño fotovoltaico.

Las pequeñas pérdidas por desacople son comunes en los módulos comerciales y están cubiertos por las tolerancias de fabricación. Las pérdidas adicionales pueden ser causadas por el sombreado que debe evitarse siempre que sea posible. La situación puede empeorar dramáticamente si una celda en serie se daña y no genera corriente. El sobrecalentamiento severo puede causar grietas, fusión de la soldadura, o daños en el material del encapsulado (Lynn, Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics, 2010).

## **2.5. Funcionamiento de los Módulos Fotovoltaicos**

Un módulo fotovoltaico se compone de celdas solares individuales conectadas eléctricamente entre sí para aumentar su potencia de salida. Se encapsulan de modo que estén protegidos del ambiente y que el usuario esté protegido de una descarga eléctrica.

Se deben considerar varios aspectos del diseño de módulos fotovoltaicos que puedan reducir su potencia de salida. Adicionalmente, los efectos más importantes de los módulos fotovoltaicos son las pérdidas debidas a la interconexión de las celdas solares y la temperatura del módulo.



**Figura 2.14.** Diagrama de: a) Panel Fotovoltaico, b) Celda Solar de CdTe.

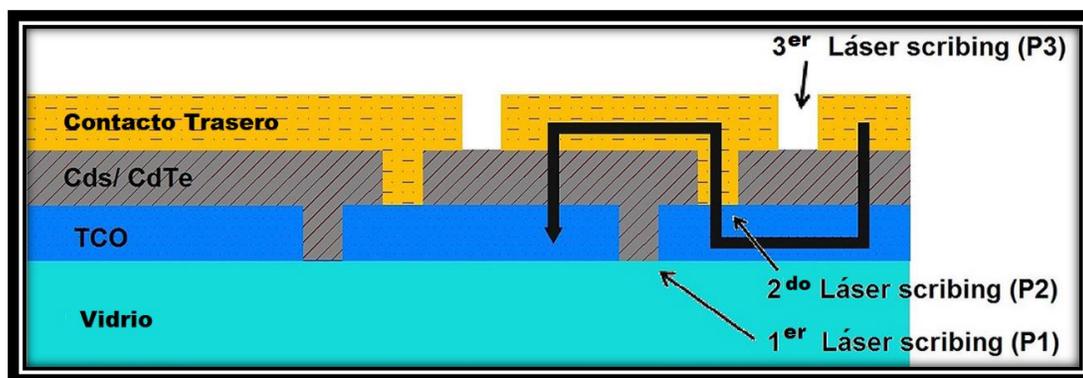
El voltaje de un módulo fotovoltaico se elige generalmente para ser compatible con una batería de 12 V. La corriente de un módulo no se ve afectada por la temperatura de la misma manera que el voltaje pero depende en gran medida del ángulo de inclinación del módulo.

Si todas las celdas solares en un módulo tienen características eléctricas idénticas y todas experimentan la misma insolación y temperatura, entonces, todas las celdas estarán operando exactamente a la misma corriente y voltaje. La curva I-V del módulo tendrá la misma forma que las celdas individuales, excepto que el voltaje y la corriente se incrementan (Honsberg & Bowden, PVEducation.org, s.f.).

### 2.5.1. Interconexión Monolítica de los Módulos

La interconexión monolítica de una celda solar de película delgada puede lograrse a través de tres pasos denominados: P1, P2 y P3. Los cuales se van alternando con el depósito de las capas de película. Son dos los métodos para obtener el rayado: el método abrasivo o mecánico y el método por láser. Independientemente de la tecnología utilizada para las interconexiones, la configuración de P1, P2 y P3 es la misma (figura 2.15).

En el caso del método por láser, en la figura 2.15 se observa que el rayado P1 crea un micro-canal a través de todo el substrato. Típicamente, se utilizan láseres de longitud de onda infrarroja para remover el TCO del substrato. A su vez, se utiliza el haz de luz láser de 532 nm para las capas de CdTe del proceso P2 y las películas de metal del proceso P3 (Jiménez-Olarte, Vigil-Galan, de la Rosa, Seuret-Jiménez, & Contreras-Puente, 2015).

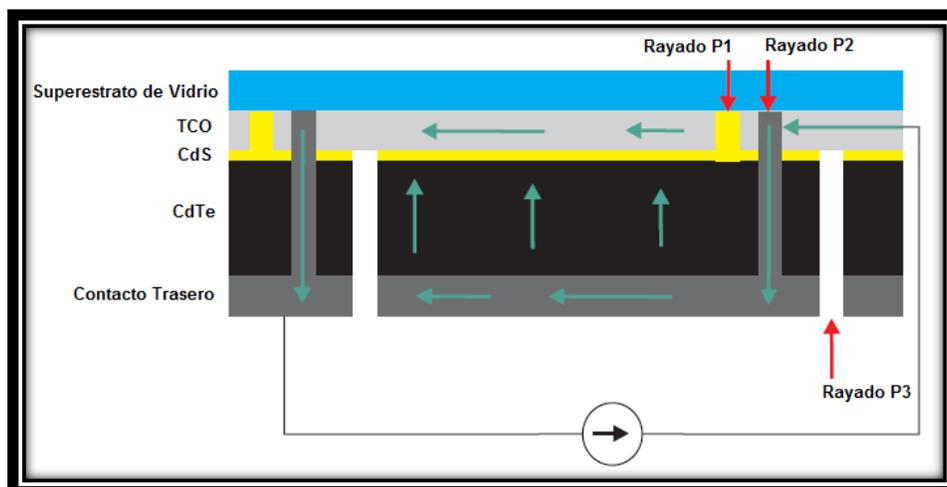


**Figura 2.15.** Pasos de la Escritura por Láser para Interconexión Monolítica.

Con el objetivo de evitar el daño térmico en la celda durante el proceso de rayado láser, se usa un tren de pulsos. Los cuales deben ser tan cortos y tan intensos como sea posible. Como consecuencia, la potencia pico de los impulsos de láser oscila más allá del umbral de daño del contacto frontal. Usualmente, se utiliza una longitud de onda infrarroja (1064nm) para rayar a las películas TCO (P1) y una longitud de onda verde (entre 515 a 532 nm) para rayar las capas absorbentes (P2 y P3) aunque también se pueden usar longitudes de onda infrarrojas (Mijangos Alonzo, 2014).

### 2.5.2. Defectos en los Módulos

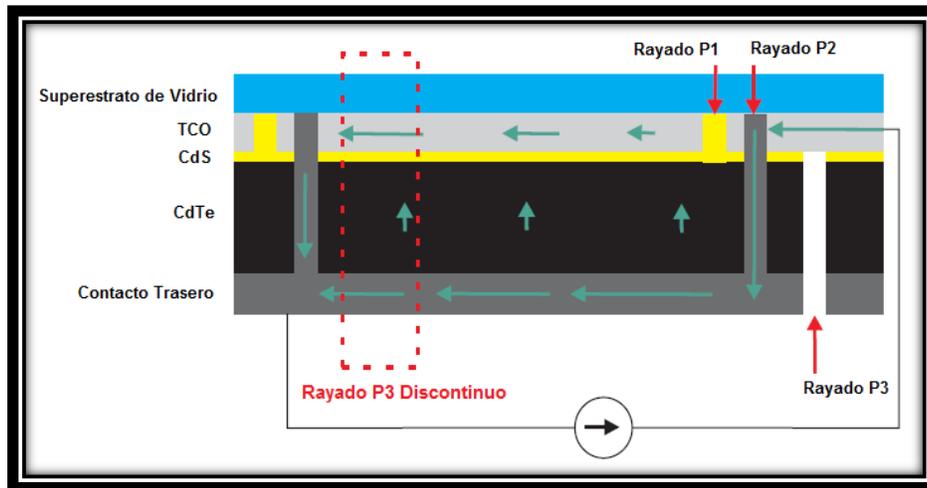
Un módulo de CdTe generalmente consiste de un arreglo de celdas interconectadas monolíticamente cuyas imperfecciones a causa las técnicas de rayado pueden crear corrientes de fuga en áreas específicas. Las interconexiones monolíticas constan de tres rayas (P1, P2 y P3). En la figura 2.16 se observa el flujo de corriente (flechas verdes) en un módulo sin defectos en las interconexiones con polarización directa y sin iluminación incidente (Raguse, 2015).



**Figura 2.16.** Esquema de un Módulo de CdTe Interconectado Monolíticamente.

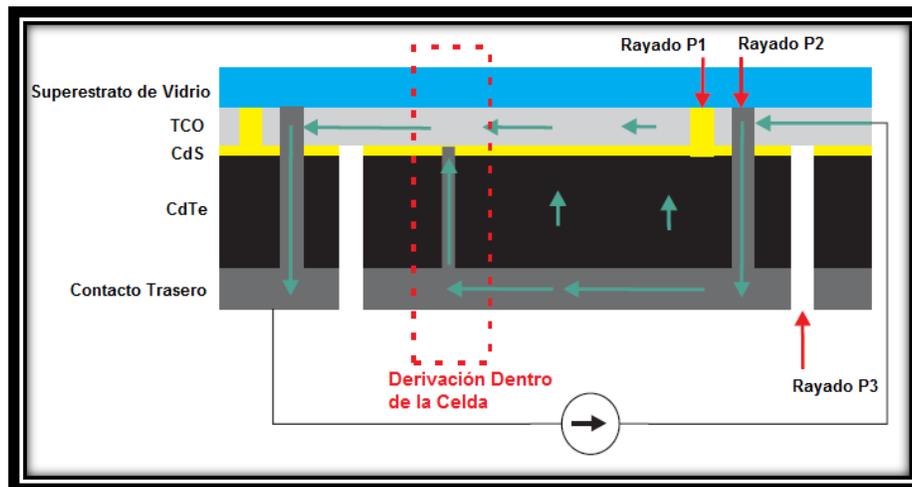
Usualmente, las fugas de corriente a causa de una  $R_{SH}$  muy baja no son aleatorias y se presentan en las cúspides de las celdas al igual que en las esquinas de las fronteras de grano a lo largo de bordes de la celda debido al astillado del proceso de rayado. Por otra parte, dichas imperfecciones no son la única causa de una baja  $R_{SH}$  en los módulos. Otro mecanismo que puede ocasionarla es un defecto durante el proceso de depósito de la película de la capa ventana (CdS), que se deposita demasiado delgada en ciertas zonas o no es continua (Mijangos Alonzo, 2014).

La mayoría de los defectos observados en los módulos de CdTe son a causa de derivaciones (“shunt” en inglés) dentro del rayado (P1, P2 o P3) entre las celdas (derivación entre celdas) o por derivaciones dentro de la celda (derivación dentro de las celdas) (Raguse, 2015). Las derivaciones dentro y entre celdas son consideradas a causa de resistencias óhmicas en paralelo con un diodo de resistencia no lineal. En el caso de las derivaciones (internas o entre celdas), las variaciones observables en las imágenes de su electroluminiscencia son usualmente a causa de variaciones en la densidad de corriente local a través del diodo a medida que las derivaciones afectan el voltaje que fluye en el módulo.



**Figura 2.17.** Módulo de CdTe con Defecto en el Rayado entre Celdas.

En la figura 2.17 se ejemplifica un módulo de CdTe con un rayado P3 discontinuo resultando en una derivación entre las celdas, resultando en una celda con excesiva inyección de corriente a través del diodo.



**Figura 2.18.** Módulo de CdTe con Defecto Dentro de las Celdas.

En el caso de los defectos dentro de las celdas, el contacto entre el contacto trasero y TCO crea corto-circuitos, ocasionando que parte de la corriente no fluya a través de la juntura p-n, sino a través de la derivación que es menos resistiva (ver figura 2.18) (Raguse, 2015).

# Capítulo 3

## Desarrollo Experimental

En este capítulo se detalla el proceso de obtención de los mini-módulos; así como el posterior rayado de las películas delgadas para interconectar las celdas. Posteriormente, se pormenorizan las técnicas de caracterización utilizadas para analizar las características de cada dispositivo.

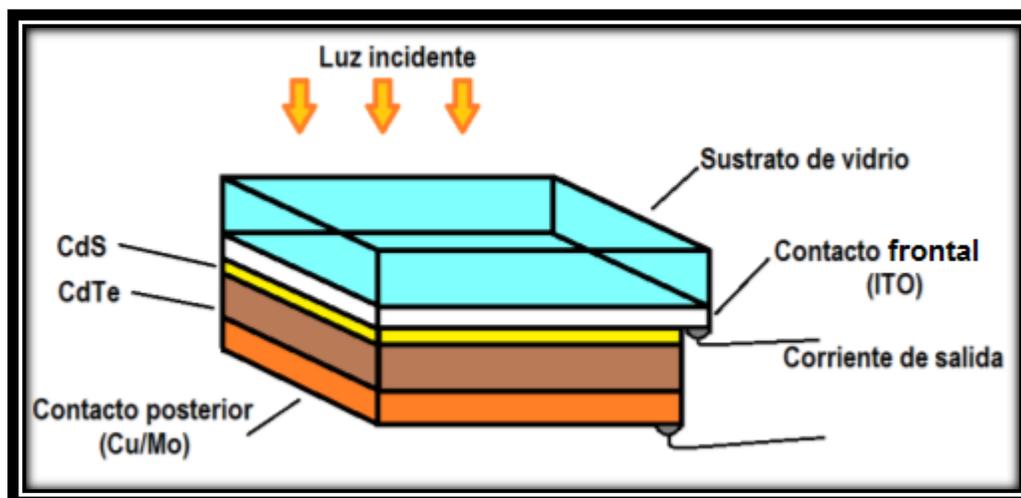
### 3.1. Manufactura de Mini-módulos con Rayado Híbrido

Los mini-módulos utilizados en esta investigación fueron fabricados en el Laboratorio de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida.

El proceso de obtención se resume de la siguiente manera:

1. Limpieza del substrato de vidrio con película de ITO.
2. Depósito de 100 nm de ZnO sobre la película ITO.
3. Depósito de 160 nm de CdS sobre la película de ZnO.
4. Depósito de 8-10  $\mu\text{m}$  CdTe sobre la película de CdS.
5. Activación de la película CdTe a 400 °C por la técnica de recocido.
6. Depósito de 5-10 nm de Cu sobre el CdTe activado.
7. Depósito de 500-1000 nm de Mo sobre el Cu.
8. Recocido a 400 °C (ver tabla 3.1.) en una atmósfera de argón (Ar).
9. Delimitación lateral del área del mini-módulo.

Para hacer el estudio comparativo se utilizaron cuatro mini-módulos de CdTe de tipo monolítico con rayado híbrido fabricados en el Laboratorio de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida. Cada dispositivo cuenta con cinco celdas interconectadas en serie monolíticamente, con rayado híbrido (láser y mecánico).



**Figura 3.1.** Configuración Típica de Superestrato de una Celda Solar de CdTe.

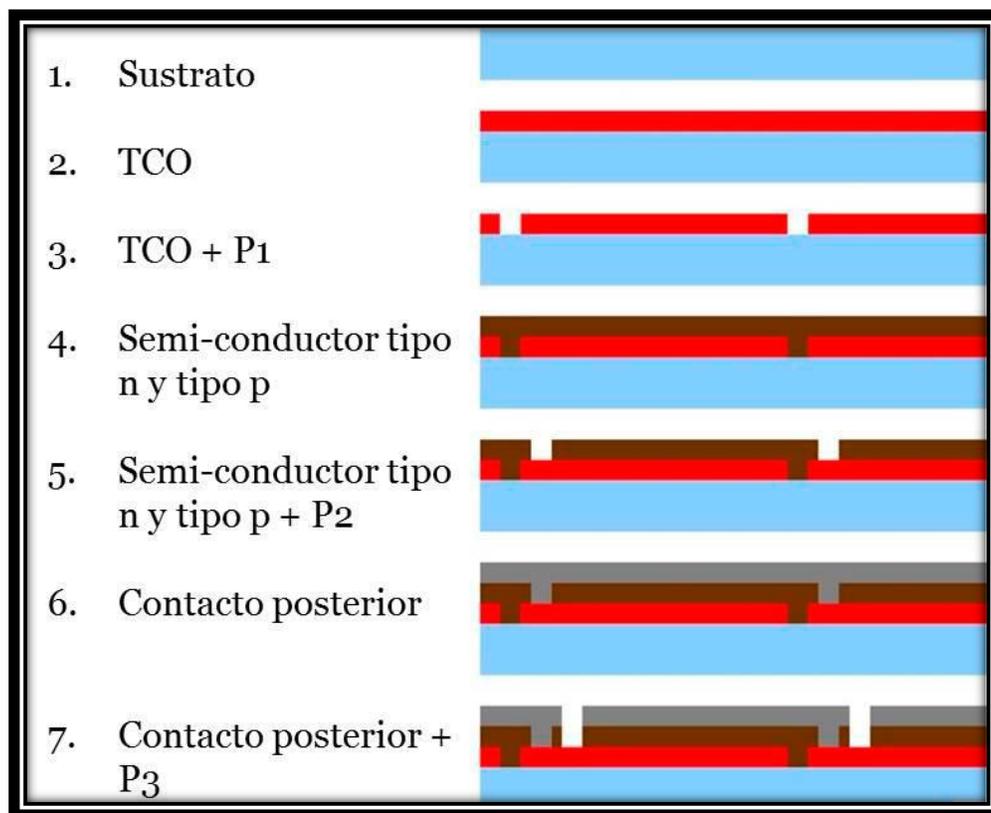
### 3.1.1. Rayado de Películas Delgadas

Típicamente, el rayado de las películas delgadas se puede realizar con dos métodos diferentes, uno de ellos es usando un abrasivo (método mecánico) y el otro, usando un sistema láser. Existe una tercera alternativa que consiste en la combinación del método mecánico con el método láser para efectuar las interconexiones. Para este trabajo de tesis se utilizó el láser para el rayado P1, mientras que los rayados P2 y P3 se elaboraron con el método abrasivo. Esta alternativa es accesible para la etapa de producción de prototipos, consiste en la abrasión completa y selectiva de microcanales dentro de las capas de película delgada para después interconectar la parte delantera y trasera del contacto de dos o más celdas contiguas.

En la figura 3.2 se presentan los tres pasos de rayado de los microcanales P1, P2, y P3, alternando con el depósito de películas delgadas necesarios para separar las celdas solares y llevar a cabo la interconexión de tipo monolítica (Compaan, Matulionis, & Nakade, 2000).

Cada panel comienza como una hoja de vidrio con un espesor típico de 3 mm. La configuración típica se le llama superestrato, porque la luz solar entrará a través del vidrio. El primer paso es depositar una capa continua y uniforme de un óxido conductor transparente (TCO, por sus siglas en inglés) con un espesor típico de 200 nm, que formarán los electrodos frontales. Esto es seguido del proceso de rayado denominado

P1, que crea un micro-canal a través todo el espesor de la capa, el cual debe realizarse sin dañar al sustrato de vidrio. Este rayado determina el número de celdas que tendrá el mini-módulo. Después se realizan una serie de rayados laterales, perpendiculares a los primeros y a 1 mm de los bordes del sustrato los cuales delimitarán al mini-módulo.

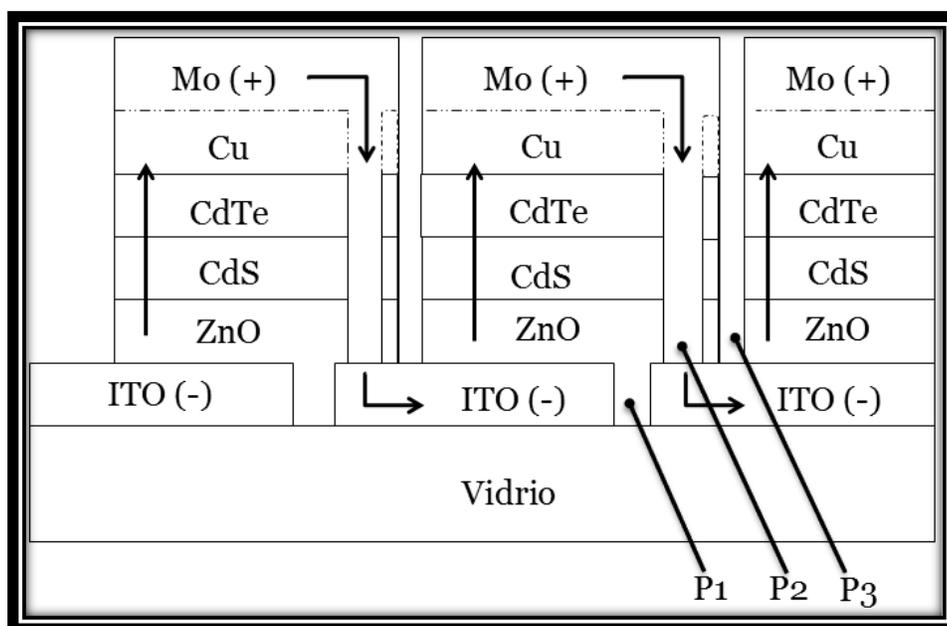


**Figura 3.2.** Pasos P1, P2 y P3 para el Rayado de Películas Delgadas.

Para el rayado P2 se realizan el depósito de los semiconductores CdS (tipo n) con un espesor de 150 nm y del CdTe (tipo p) con 8-10  $\mu\text{m}$  de espesor. Después se realiza el rayado P2 paralelo a P1. Con esto se elimina el cortocircuito de cada celda, dejando parte de la estructura en el micro-canal que servirá de puente (que lucirá inactivo en la caracterización por EL y en LBIC como un área de muy baja foto-generación) y al mismo tiempo dejando al descubierto el contacto frontal de cada una de las celdas, exponiendo al TCO de una celda contigua, para que esta se interconecte con el contacto posterior de la celda. Posteriormente, se realiza un proceso de activación a 400 °C en una atmósfera que contiene cloro (Cl).

Por último, mediante la técnica de RF-Sputtering, se depositan las películas delgadas de Cu/Mo (que forman los electrodos traseros) para realizar la interconexión del contacto posterior. Seguidamente se realiza el tercer proceso de rayado P3. Dicho rayado sirve para eliminar mecanismos de pérdida como cortocircuitos entre los contactos de la misma celda para así obtener la interconexión en serie. Facilitando que la corriente foto-generada fluya por la interconexión del contacto frontal de una celda hacia el contacto posterior de su vecina. Finalmente, el panel concluye con una superficie trasera llamada laminación de vidrio.

Cabe señalar que cada celda requiere de los tres pasos (P1, P2 y P3) para su manufactura, por lo que el número de veces requeridos para hacer estos tres pasos es proporcional al número de celdas individuales necesarias en el mini-módulo.



**Figura 3.3.** Interconexión P1, P2 y P3 de las Películas Delgadas.

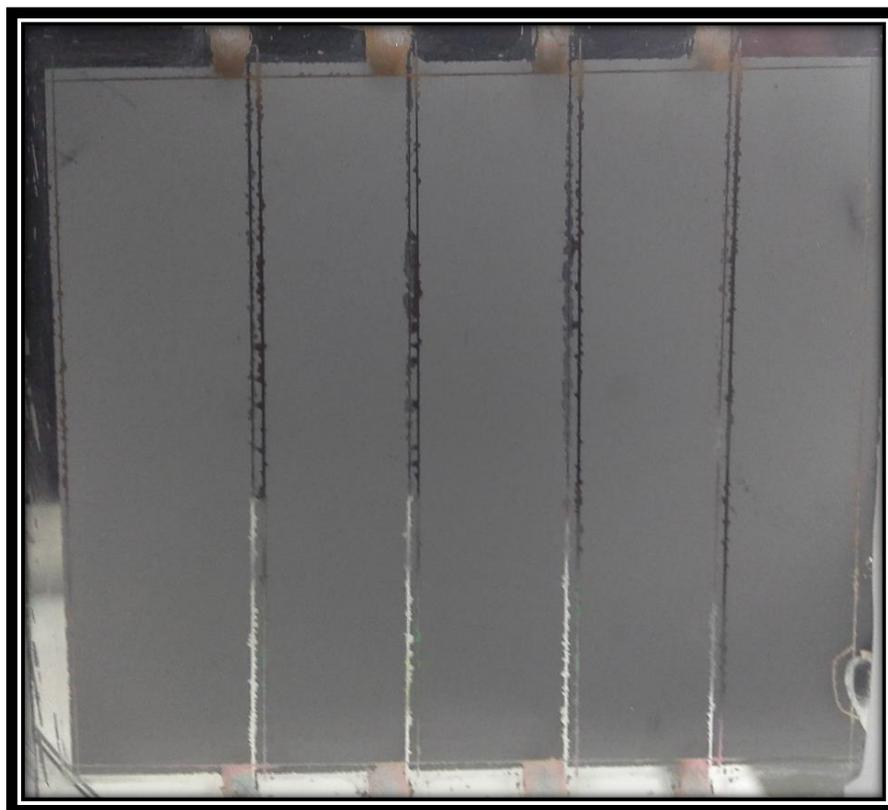
Para finalizar, debido a que el proceso de depósito de las películas delgadas se realiza con el método de RF-Sputtering, es muy probable que parte del material esté alojado en los bordes laterales del sustrato de vidrio por lo que pueden ocurrir cortos circuitos entre el ITO y el Mo del contacto posterior. Para evitar dicho problema se remueven las películas delgadas que se depositaron sobre el rayado lateral justo en los bordes del mini-módulo (Mijangos Alonzo, 2014).

Como resultado de este proceso, se obtuvieron cuatro mini-módulos monolíticos de CdTe con rayado híbrido. Las características generales de cada dispositivo son cinco celdas interconectadas en serie monolíticamente con rayado híbrido y un área aproximada de 19 cm<sup>2</sup>.

**Tabla 3.1.** Tiempos de Activación de los Mini-módulos por Recocido a 400°C.

Mini-módulo	Tiempo de Activación
MCAG04	30 min
MCAG05	40 min
MCAG06	60 min
MCAG07	50 min

La diferencia entre cada mini-módulo fue el tiempo de tratamiento en atmósfera de Freón-Oxígeno para la activación de las celdas (ver tabla 3.1). Esto con el objetivo de optimizar los dispositivos.



**Figura 3.4.** Mini-módulo Monolítico de CdTe con Rayado Híbrido.

## 3.2. Técnicas de Caracterización

A través de las técnicas de caracterización se analizarán las propiedades opto-eléctricas tanto del mini-módulo comercial de silicio, como los manufacturados en el laboratorio de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida con el fin de identificar los mecanismos de pérdida por recombinación, ópticos y resistencias en los mini-módulos de Telurio de Cadmio.

### 3.2.1. Corriente-Voltaje

Los simuladores solares son utilizados para la simulación de la radiación solar con un haz de luz colimado y uniforme, garantizando una irradiación lo más cercana posible a la luz solar. El uso de filtros de masa de aire permite simular la luz del sol a partir de una fuente de luz de xenón.

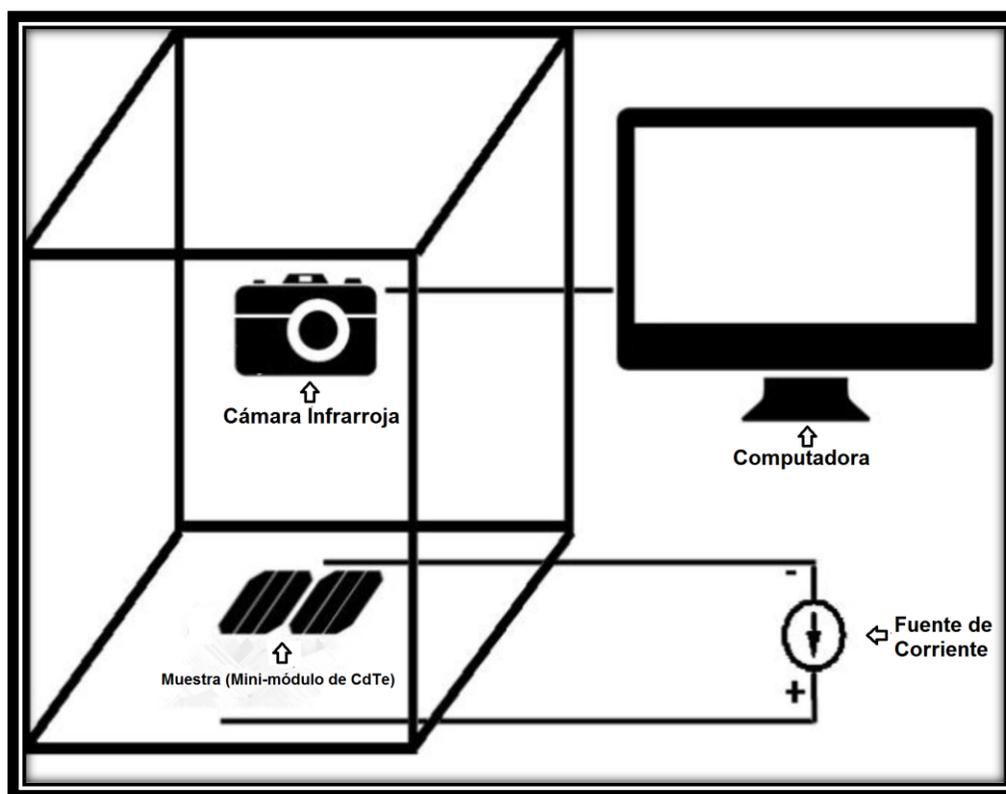


**Figura 3.5.** Simulador Solar de la FIUADY.

El simulador solar utilizado fue clase ABA Marca Oriel Modelo 94042A (figura 3.5), donde se obtuvo la curva J-V de cada mini-módulo, tanto del comercial como los del laboratorio del CINVESTAV-IPN. El equipo consta de una lámpara de Xenón de 450 W con un filtro AM 1.5 y un haz de luz con área de 4x4". Incorporando un instrumento de fuente-medición (SMU) Marca KEITHLEY Modelo 2420-C. El mini-módulo fue colocado sobre el porta-celdas del simulador para después recopilar y procesar los datos obtenidos a través de un software diseñado en LabVIEW.

### 3.2.2. Electroluminiscencia (EL)

A través de esta técnica la celda o módulo opera como un diodo emisor de luz (LED) por lo cual se utiliza una cámara especial para fotografiar su luminiscencia (Sites J. , 2012). La electroluminiscencia permite identificar las no-homogeneidades presentes en las celdas y módulos ya que es una técnica de mayor sensibilidad con respecto a los defectos que la de corriente-voltaje. También ha quedado demostrado que sólo puede proveer información pertinente a la calidad de la unión p-n y de los contactos eléctricos (contacto trasero, TCO, interconexiones, etc.). (Raguse, 2015)



**Figura 3.6.** Diagrama del Sistema de Electroluminiscencia.

La electroluminiscencia deriva de la recombinación radiativa de los electrones con los huecos en la capa emisora de luz, de manera que cuando esta recombinación ocurre se forman estados electrónicos excitados que son los responsables de la emisión de luz al relajarse al estado electrónico fundamental (Álvaro, Cabeza, Fabuel, Corma, & García, 2007).



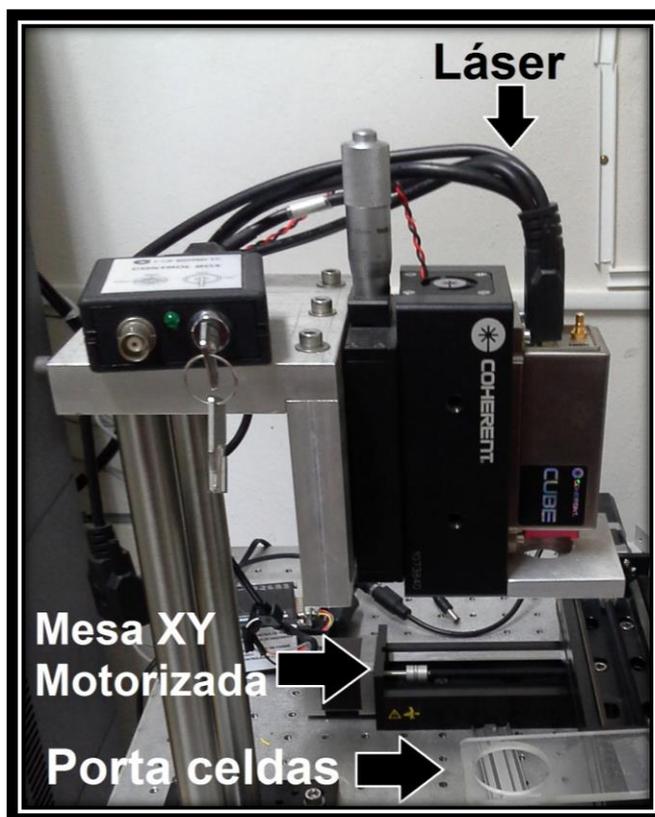
**Figura 3.7.** Cámara Digital Infrarroja de la FIUADY.

Se utilizó una fuente GW Instek GPD-3303D para aplicar una corriente al mini-módulo para que éste se ilumine, siendo necesaria la cámara infrarroja (con filtro para el visible) CCD D/ELECTROM PCO Imaging (figura 3.7) para captar su luminiscencia. Los datos son recopilados y procesados en un software de LabVIEW.

Aunque las capturas de EL son útiles en la localización e identificación de la severidad de los defectos en las muestras en tiempos relativamente cortos, su habilidad para identificar las causas de dichos defectos es limitada. En cambio, el uso en conjunto de la EL con la de LBIC forja un poderoso conjunto para el análisis e interpretación de tales mecanismos de pérdida (Raguse, 2015).

### **3.2.3. Corriente Foto-inducida por Láser (LBIC)**

La técnica de Corriente Foto-inducida por Láser o LBIC (por sus siglas en inglés), es una técnica de caracterización óptica no-dañina que realiza un mapeo de alta resolución mediante un haz de luz láser de baja potencia sobre una celda o módulo fotovoltaico, el cual permite visualizar (a través de una imagen bidimensional) y localizar regiones eléctricamente activas, las cuales pueden estar asociadas con la afectación y/o disminución de su eficiencia y vida útil (Geisthardt, 2014).



**Figura 3.8.** Equipo LBIC de la FIUADY.

El haz de luz láser es enfocado hacia la muestra a través de una lente y un espejo reflectante. El láser es de color rojo clase 3B con longitud de onda de 691 nm, potencia de 40 mW cuyo haz de luz posee un diámetro base de  $1 \text{ mm}^2$ , mientras que con el objetivo microscopio es de  $5 \times 5 \text{ }\mu\text{m}$ . La fotocorriente generada se mide en cada punto con un preamplificador modelo SR570 que utiliza la tarjeta de adquisición de datos National Instruments modelo NI USB-6251. La muestra es movida bajo el haz láser con una mesa XY motorizada de Zaber Technologies modelo T-LSR300B. Los datos obtenidos se generan en una matriz para su posterior procesamiento.

## Capítulo 4

### Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan y se discuten los resultados de esta investigación. Este capítulo se divide en tres secciones, las primeras dos están enfocadas a la caracterización de dos mini-módulos monolíticos de tecnologías distintas, los cuales son utilizados de prueba, para el dominio de las metodologías de caracterización. A estos mini-módulos les denominaremos de la siguiente manera: mini-módulo de silicio y otro mini-módulo de CdTe. Es importante subrayar que el mini-módulo de Si forma parte de un producto comercial, y tiene las tres rayas realizadas con un láser. También es importante señalar que el mini-módulo de CdTe tiene las tres rayas realizadas mediante abrasión mecánica como se describe en la Tesis de (Mijangos Alonzo, 2014). Una vez establecidas y dominadas las metodologías de caracterización, se fabricaron cinco mini-módulos de CdTe. La diferencia fundamental consistió en realizar el rayado P1 con un láser de 532 nm de longitud de onda y 20,000 disparos por segundo, mientras P2 y P3 fue realizado utilizando el método de abrasión mecánica, como en el mini-modulo denominado de prueba. El rayado de esta clase lo denominaremos rayado híbrido y, al mini-modulo con rayado híbrido. La diferencia fundamental entre el mini-módulo de prueba y el mini-módulo con rayado híbrido consiste en la manera de rayar (P1) la película delgada ITO. Mediante la caracterización opto-electrónica, descritos en la sección 4.3, se permitirá conocer la influencia del rayado P1 en desempeño de los mini-módulos con rayado híbrido. La caracterización de cada mini-módulo se divide en tres partes o sub-secciones: Corriente-Voltaje, Electroluminiscencia y LBIC.

## 4.1. Pruebas de Referencia con Mini-módulo Comercial de Silicio

En la figura 4.1 se presenta el mini-módulo de silicio, el cual fue extraído de una lámpara solar para jardín. Posee tres celdas interconectadas en serie, cuyo rayado fue realizado totalmente con láser, el área activa es de  $9 \text{ cm}^2$ .



Figura 4.1. Mini-módulo de Silicio.

### 4.1.1. Corriente-Voltaje

El mini-módulo de silicio fue caracterizado en las condiciones de laboratorio utilizando un simulador solar con el espectro solar estándar AM 1.5, con la finalidad de conocer sus parámetros fotovoltaicos. En la figura 4.2, se presenta su curva J-V.

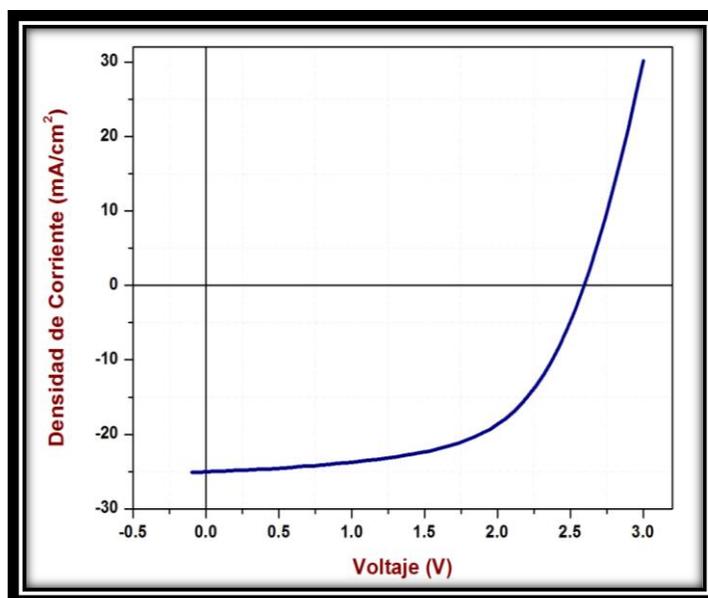


Figura 4.2. Curva J-V del Mini-módulo de Silicio.

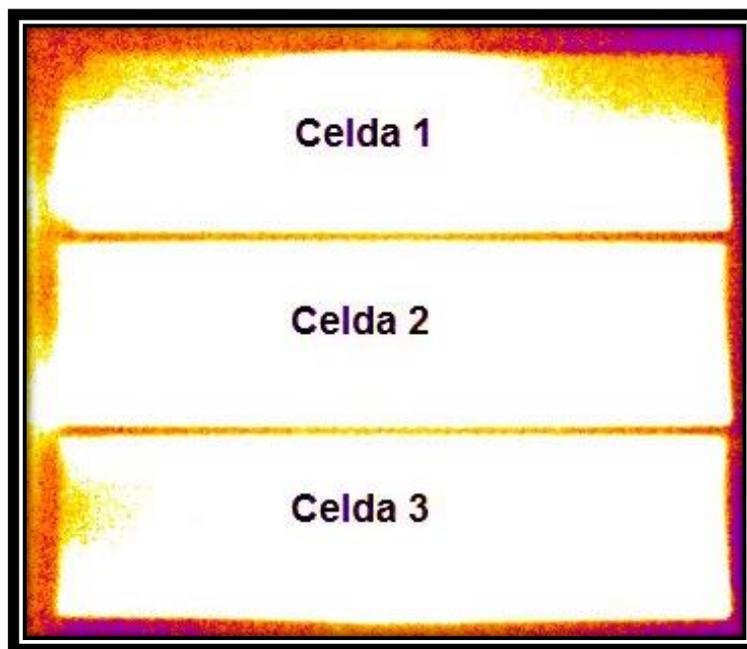
Con base en la curva J-V se obtuvieron los datos presentados en la tabla 4.1. Se observa una resistencia en paralelo ( $R_{SH}$ ) de  $1017.95 \Omega \cdot \text{cm}^2$  con una resistencia en serie ( $R_S$ ) de  $16.65 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , que es corroborado a través de las pendientes de la curva J-V en las regiones de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ . A pesar de sus características resistivas, el dispositivo proporcionó un factor de llenado (FF) del 58 % y una eficiencia ( $\eta$ ) del 4.18 %.

**Tabla 4.1.** Parámetros Fotovoltaicos.

Área ( $\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (mA)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{MAX}$ (V)	$I_{MAX}$ (A)	$P_{MAX}$ (mW)	$R_S$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_{SH}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
9	2.60	25.04	2.78	1.91	19.70	37.65	16.65	1017.95	58	4.18

#### 4.1.2. Electroluminiscencia (EL)

La figura 4.3 muestra la electroluminiscencia del mini-módulo de silicio. Debido a que la señal de EL es proporcional a la corriente a través de la unión p-n (Raguse, 2015), se tomó como referencia la  $I_{sc}$  de 25.04 mA de la curva J-V del mini-módulo (ver tabla 4.1), inyectándosele cuatro veces más corriente (aproximadamente unos 100 mA) hasta obtener la luminiscencia del mini-módulo.



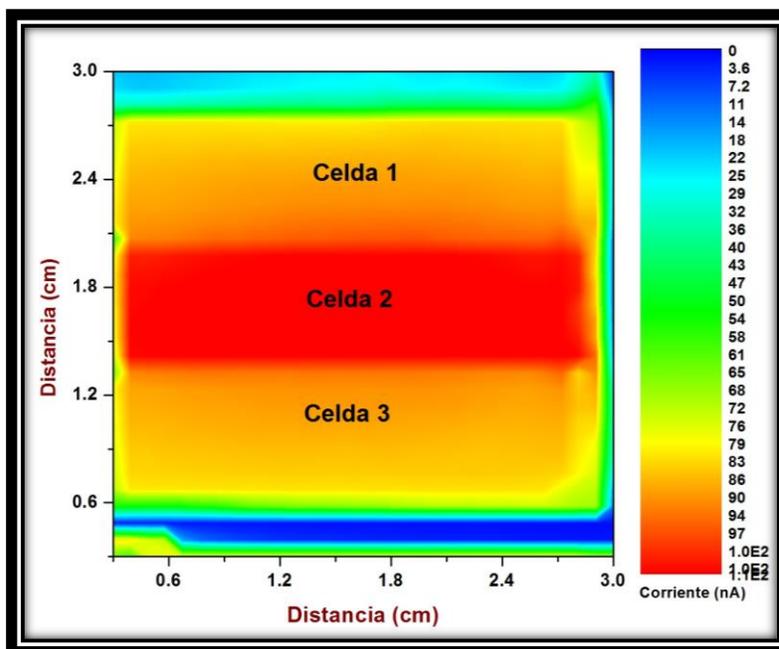
**Figura 4.3.** Electroluminiscencia del Mini-módulo de Silicio.

Se observa que la celda 2 es totalmente homogénea, mientras que en las celdas 1 y 3 su luminiscencia es no-homogénea. También se observan zonas inactivas tanto en los bordes como en el rayado de interconexión (P1, P2 y P3 con láser). Considerando lo reportado en la tesis doctoral de (Raguse, 2015), las posibles causas de las no-homogeneidades presentes en los mini-módulos se encuentran: áreas de diodos débiles, agujeros y alta resistencia laminar en el contacto trasero, así como las separaciones a causa del rayado para realizar las interconexiones entre las celdas.

#### 4.1.3. Corriente Foto-inducida por Láser (LBIC)

En la figura 4.4 se presenta el mapeo por LBIC del mini-módulo completo, realizado con un barrido de 900 puntos y un spot de luz láser de  $1 \text{ mm}^2$ , cuyo resultado se presenta en la figura 4.4.

Considerando que la longitud de onda del láser fue  $691 \text{ nm}$ , la profundidad a la que se analizó la muestra fue a  $\sim 5 \mu\text{m}$  del espesor de la película, lo que significa que el comportamiento observado corresponde al área cercana a la superficie de la película de silicio cuyo espesor aproximado es de  $300 \mu\text{m}$ .



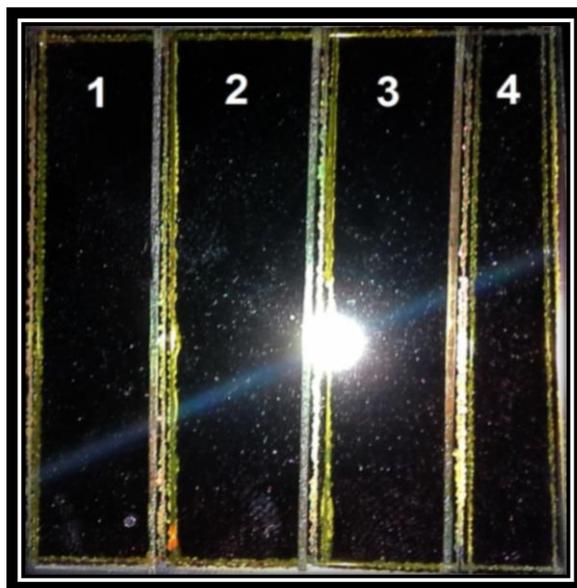
**Figura 4.4.** LBIC del Mini-módulo de Silicio.

Comparando la imagen LBIC de la figura 4.4 con la imagen de electroluminiscencia (ver fig. 4.3), se observan coincidencias en la segunda celda del mini-módulo (en colores rojos y anaranjado), siendo la de mejor foto-generación de corriente y mayor homogeneidad. Mientras que las celdas uno y tres, son menos homogéneas y con zonas de pérdida en sus bordes.

La técnica aplicada permitió corroborar la homogeneidad observada en la electroluminiscencia de la celda 2. Al tratarse de un experimento preliminar, el diámetro del spot utilizado durante el experimento permitió entrenarse en la caracterización por LBIC.

## 4.2. Mini-módulo de CdTe con Rayado Mecánico

Para complementar las pruebas de referencia se utilizó un mini-módulo monolítico de CdTe (figura 4.5) fabricado en el Laboratorio de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida. El dispositivo posee cuatro celdas en serie interconectadas utilizando el método de rayado mecánico y un área activa de 12 cm<sup>2</sup>.



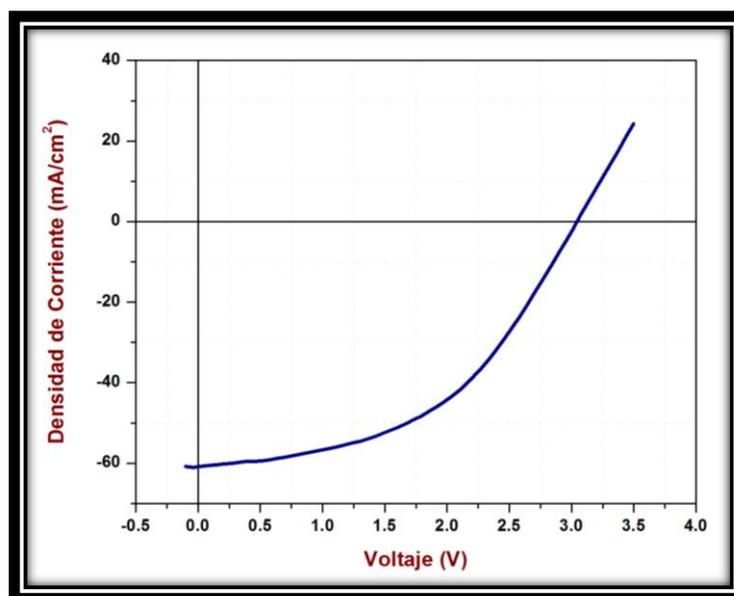
**Figura 4.5.** Mini-módulo de CdTe Fabricado en el CINVESTAV.

### 4.2.1. Corriente-Voltaje

A través de la curva J-V se obtuvieron los parámetros más esenciales del mini-módulo, como son el Voltaje de Circuito Abierto ( $V_{oc}$ ), Corriente de Corto-circuito ( $I_{sc}$ ),

Resistencia en Serie ( $R_s$ ), Resistencia en Paralelo ( $R_{SH}$ ), Factor de Llenado (FF) y la Eficiencia ( $\eta$ ).

En la figura 4.6 se presenta la curva I-V del mini-módulo de CdTe. Se observa que su factor de llenado se vio afectado por las pérdidas resistivas, ya que en este mini-módulo, las rayas trazadas durante el rayado mecánico tienen un ancho de aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  aproximadamente (Mijangos Alonzo, 2014). La raya posee residuos de ZnO, CdS y CdTe, mismos que sirven de puente para la interconexión de las respectivas celdas. Estos residuos, se sabe que son fotosensibles, es decir, disminuyen su resistencia al absorber luz, lo cual deberá ser tomado en cuenta debido a que, si la raya disminuye su ancho, podría ser causa de fugas de corriente, lo cual impacta directamente en el factor de llenado y la eficiencia del mini-módulo. Otras causas pueden ser los rayones e inclusión de partículas contaminantes, ocasionando pequeños cortocircuitos y resistencias en serie entre las celdas (Raguse, 2015).



**Figura 4.6.** Curva J-V del Mini-módulo de CdTe con Rayado Mecánico.

Con base en la curva J-V se obtuvieron los datos presentados en la tabla 4.2. Se observa una resistencia en paralelo ( $R_{SH}$ ) de 335.57  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  con una resistencia en serie ( $R_s$ ) de 22.45  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , que es corroborado a través de las pendientes de la curva J-V en las regiones de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ . El mini-módulo proporcionó un factor de llenado (FF) del 47 % y una eficiencia ( $\eta$ ) de 7.38 %.

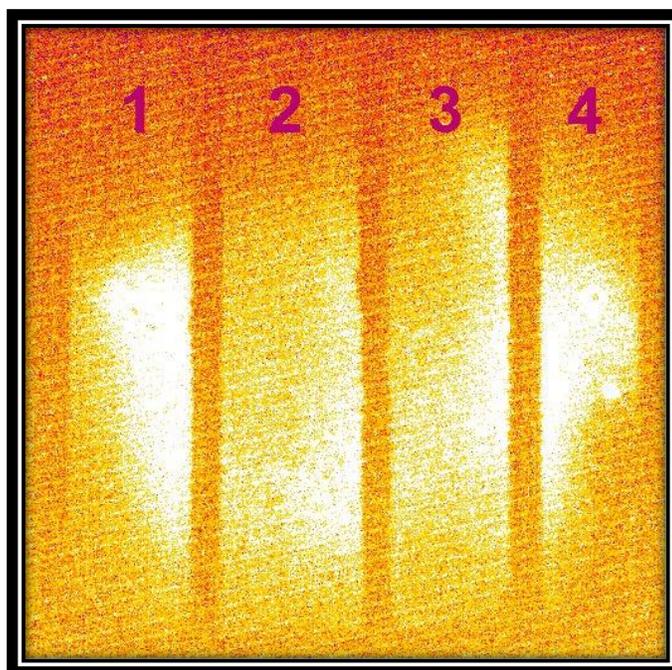
**Tabla 4.2.** Parámetros Fotovoltaicos.

Área (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (mA)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>MAX</sub> (V)	I <sub>MAX</sub> (A)	P <sub>MAX</sub> (mW)	R <sub>s</sub> (Ω·cm <sup>2</sup> )	R <sub>SH</sub> (Ω·cm <sup>2</sup> )	FF (%)	η (%)
12	3.04	60	5.07	2	40	88.5	22.45	335.57	47	7.38

A través de la caracterización por electroluminiscencia del mini-módulo se podrá visualizar los defectos de las interconexiones entre las celdas, así como de las zonas defectuosas en el interior del área de la celda. Lo anterior se puede identificar, observando las zonas inactivas o de menor luminiscencia.

#### 4.2.2. Electroluminiscencia (EL)

La figura 4.7 muestra la electroluminiscencia del mini-módulo de CdTe. Como la señal de EL es proporcional a la corriente a través de la unión p-n (Raguse, 2015), se utilizó como referencia el valor de su I<sub>sc</sub> de 60 mA (ver tabla 4.2), inyectándosele cuatro veces más corriente (aproximadamente 240 mA) hasta obtener la luminiscencia del dispositivo.



**Figura 4.7.** Electroluminiscencia del Mini-módulo de CdTe con Rayado Mecánico.

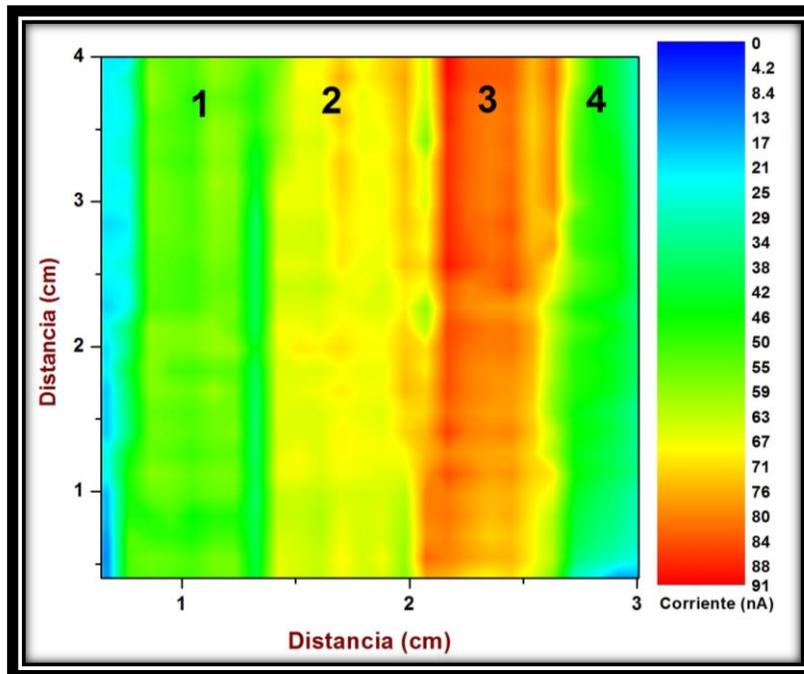
En el mini-módulo mostrado en la figura 4.7, se observan dos fenómenos fundamentales: a) mayor luminiscencia en la zona de inyección de corriente, b) luminiscencia al centro del mini-modulo. Se considera que estos efectos son debido a una alta resistencia laminar del contacto trasero que afectó la distribución de corriente a través de las celdas, dicha conclusión se tomó al comparar los resultados obtenidos de la electroluminiscencia del mini-módulo de silicio donde la distribución de la corriente inyectada fue homogénea en las celdas, aunque cabe destacar que son diferentes las tecnologías de fabricación de estos mini-módulos.

También se aprecian rayas sin luminiscencia, esto es debido al rayado para realizar las interconexiones entre las celdas. Usualmente son las causantes de la mayoría de los defectos observados en los mini-módulos de CdTe, ya que durante el rayado (especialmente de P1) se crean “cortocircuitos” entre las celdas, ocasionando resistencias en paralelo o “cortocircuitos”, por las que el flujo de corriente tenderá a fugarse, en este caso las áreas afectadas poseen una menor luminiscencia o son más oscuras (Raguse, 2015).

#### **4.2.3. Corriente Foto-inducida por Láser (LBIC)**

En la figura 4.8 se presenta el mapeo por LBIC del mini-módulo, realizado con un barrido de 900 puntos y un spot de luz láser de 1 mm<sup>2</sup>.

Considerando la longitud de onda del láser fue de 691 nm, la profundidad a la que se analizó la muestra fue de 0.33 μm, lo que significa que el comportamiento observado corresponde a la zona cercana a la juntura p-n (CdTe/CdS).



**Figura 4.8.** LBIC del Mini-módulo de CdTe con Rayado Mecánico.

Se observan las áreas correspondientes a las cuatro celdas. En colores anaranjado y amarillo están representadas las zonas de mayor generación de fotocorriente. En el caso de las celdas 1 y 4 (fig. 4.8), aunque poseen mayor homogeneidad con respecto a las otras dos, su foto-generación de corriente es la más baja. Se identifican zonas de baja foto-generación en sus bordes externos. Las celdas 2 y 3 son no-homogéneas. No obstante, de acuerdo con los resultados J-V, son las más eficientes, especialmente la celda 3 que foto-genera valores de corriente de hasta 91 nA.

La caracterización por LBIC permitió apreciar la no-homogeneidad presente en las cuatro celdas. Así mismo, habiéndose cumplido el objetivo de entrenarse en las técnicas de caracterización, con esta sección se dan por terminadas las pruebas de referencia.

### 4.3 Mini-módulos de CdTe con Rayado Híbrido

La caracterización de los dispositivos fotovoltaicos permite entender su comportamiento, rendimiento y propiedades físicas. Diferentes técnicas son utilizadas para caracterizar, que una vez combinadas, permiten conocer y estudiar las características de operación del mini-módulo y las celdas que lo componen. Para

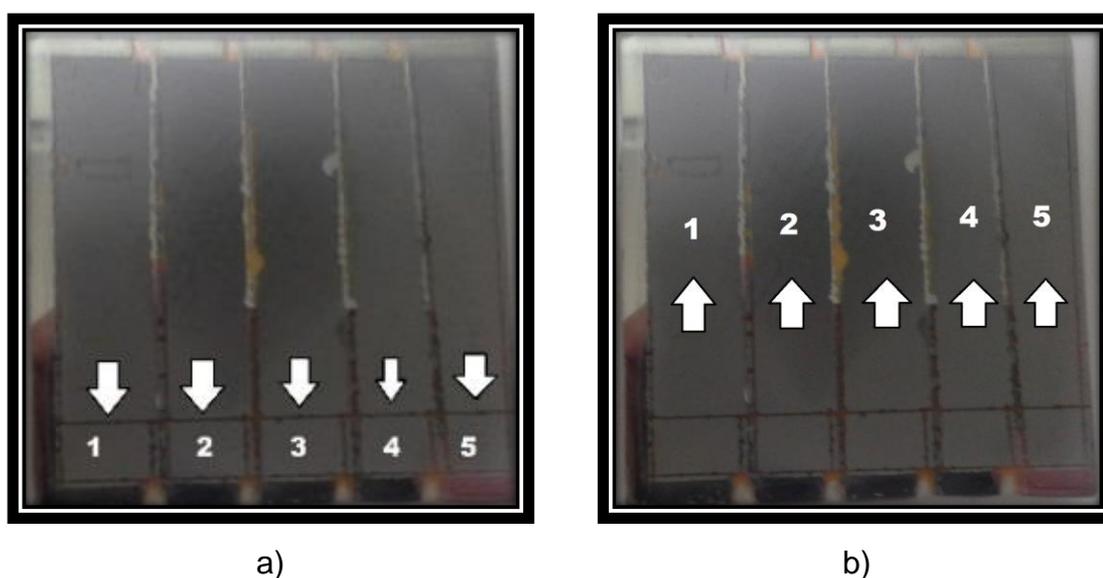
conocer a fondo esta problemática, se realizaron estudios con las técnicas de: Corriente-Voltaje, Electroluminiscencia y LBIC.

A continuación, se presentan los resultados de las caracterizaciones realizadas a dos mini-módulos de CdTe con rayado de tipo híbrido fabricados en el CINVESTAV.

#### 4.3.1. Corriente-Voltaje

Con el objetivo de estudiar los parámetros foto-voltaicos de los mini-módulos y las celdas que lo componen, se realizó el estudio de su corriente-voltaje.

Los mini-módulos con rayado híbrido tuvieron problemas derivados de su interconexión. Debido a que la raya P1 posee un ancho menor a  $50\mu\text{m}$ , realizado con un láser de 532 nm, el cual contiene residuos de ZnO, CdS y CdTe, mismos que son fotosensibles. La inclusión de esos semiconductores pueden ocasionar pequeños cortocircuitos y corrientes de fuga (Raguse, 2015). Para corroborar la influencia de la raya P1 (ver sección 3.2.3), se delimitaron celdas pequeñas de  $\sim 0.5\text{ cm}^2$  contenidas dentro de las celdas del mini-modulo, estas celdas fueron denominadas “de área pequeña” (fig. 4.9a). A las celdas del mini-modulo serán referidas como “de área grande” (fig. 4.9b). Esta estrategia nos permitirá corroborar la calidad del proceso de fabricación de las películas delgadas de cada dispositivo a través de la obtención de sus respectivas características J-V (ver tabla 4.3).



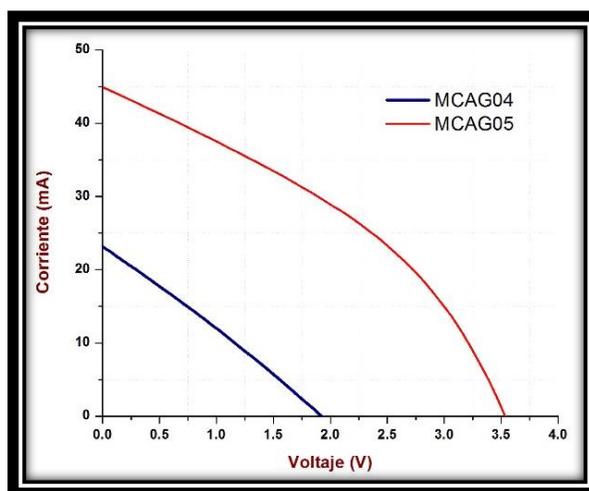
**Figura 4.9.** Celdas de área: a) Pequeña y b) Grande.

Es importante señalar que a los cuatro mini-módulos fabricados se les aplicó la estrategia de seccionar celdas de área pequeña contenidas en cada celda del mini-módulo. A todas las celdas se les caracterizó su eficiencia ( $\eta$ ). Dichos estudios fueron realizados en el laboratorio de Física Aplicada del CINVESTAV y en la FI-UADY. Los resultados sirvieron para elegir los mini-módulos más representativos en los estudios posteriores. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.3. En cada caso se aprecia que la eficiencia se reduce al aumentar el área de la celda solar. Es decir, al escalar de áreas pequeñas a mayores.

**Tabla 4.3.** Eficiencias de los Mini-módulos de CdTe y de las Celdas de Área Pequeña/Grande.

Módulo	$\eta$ (%)	Celda 1		Celda 2		Celda 3		Celda 4		Celda 5	
		Pequeña	Grande								
MCAG04	0.88	8.55	0.65	9.27	0.72	8.85	0.27	6.58	0.01	8.24	1.47
MCAG05	4.87	8.62	3.15	9.53	5.17	9.48	3.69	1.05	4.03	0.15	2.16
MCAG06	2.26	7.37	1.11	7.92	0.29	7.14	1.04	4.96	0.38	1.97	1.24
MCAG07	2.71	4.71	3.78	8.62	1.93	7.37	1.27	5.95	0.66	0.65	0.84

Con el propósito de estudiar los factores de pérdidas en los mini-módulos, se propone estudiar con mayor detalle al mini-módulo de menor eficiencia MCAG04 y el de mejor eficiencia MCAG05. Es importante señalar que las mediciones de eficiencia se realizaron en el Simulador Solar de la Facultad de Ingeniería de la UADY. En la figura 4.10 se presentan las curvas I-V de ambos mini-módulos.

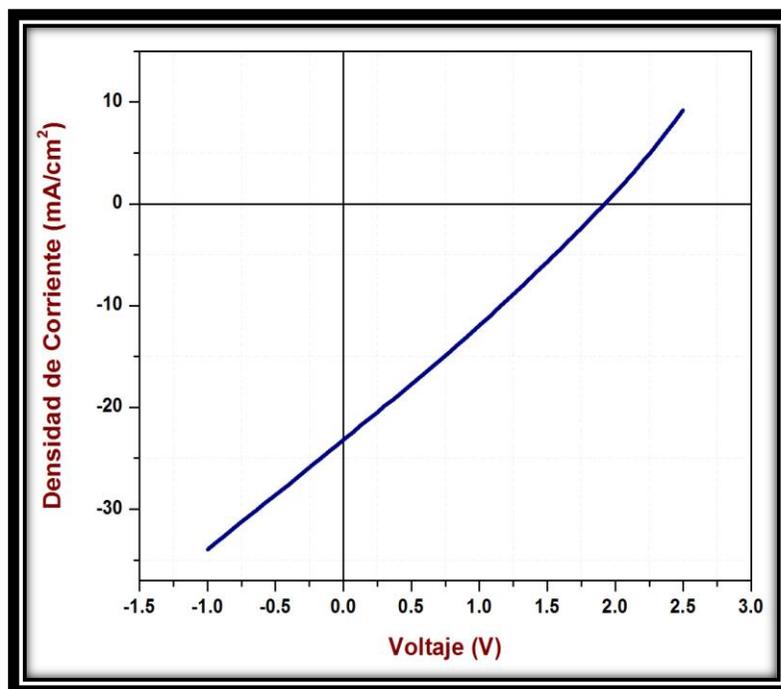


**Figura 4.10.** Curvas I-V de los Mini-Módulos MCAG04 vs. MCAG05.

La forma de la curva I-V del mini-módulo MCAG04 es casi lineal, este comportamiento es ocasionado por una alta resistencia en serie que afecta directamente el factor de llenado, que a su vez afecta adversamente la eficiencia. Este mini-modulo tiene una eficiencia menor al 1 %. En la tabla 4.3 se observa que las eficiencias de las celdas de área pequeña oscilan entre el 6.25 % al 9.27 %. No obstante, las respectivas celdas del mini-módulo poseen una eficiencia drásticamente menor, resultando en un mini-módulo de pobre desempeño.

En contraste, el mini-módulo MCAG05 presenta un mejor desempeño de conversión fotovoltaica. En la tabla 4.3 se observa que, de sus celdas de área pequeña, sólo las primeras tres poseen una eficiencia entre 8.6 % y 9.5 %, siendo las celdas 4 y 5 las de peor desempeño. Los efectos del escalamiento en este mini-módulo no resultaron tan perjudiciales como en el mini-módulo MCAG04. Para encontrar las causas de estas pérdidas, es necesario estudiar este mini-módulo por medio de EL y LBIC.

A continuación, se muestran los resultados de las mediciones J-V realizadas en el mini-módulo MCAG04, así como de su celda 5 en área pequeña y grande.



**Figura 4.11.** Curva J-V del Mini-Módulo MCAG04.

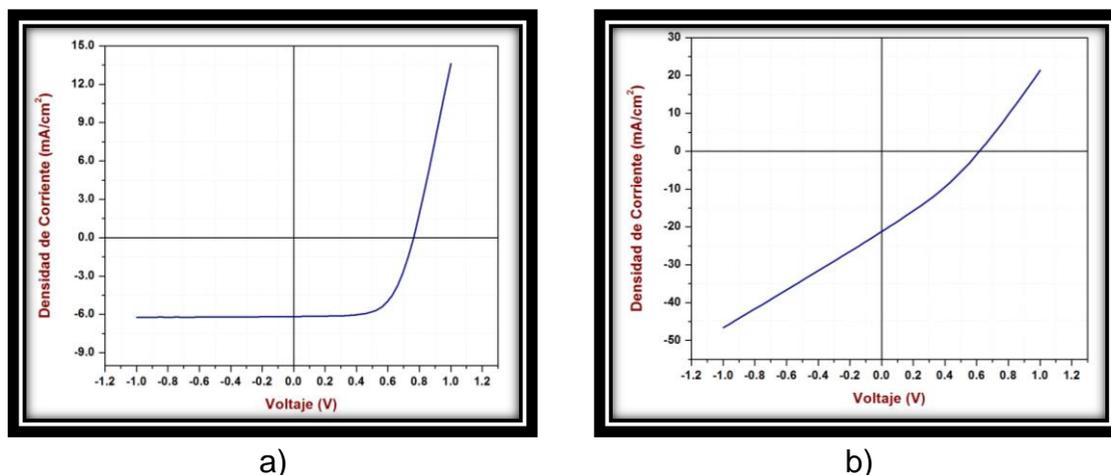
En la figura 4.11 se presenta la curva J-V del mini-módulo MCAG04, este fue caracterizado bajo condiciones de laboratorio, con el espectro solar AM 1.5, con la finalidad de conocer sus parámetros fotovoltaicos.

A través de su curva J-V se obtuvieron los datos presentados en la tabla 4.4. Se obtuvo una  $R_s$  con valor de  $970.87 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , el cual es considerado alto e impacta adversamente en el factor de llenado. Mientras que la  $R_{SH}$  fue de  $1241 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , lo cual es considerado un valor aceptablemente alto, ya que la máxima fuga que ocasionaría es de alrededor de  $1.6 \text{ mA/cm}^2$ , y puede descartarse como la principal causa del mal desempeño. Debido a las características resistivas, su FF fue de 26.89 % y con una eficiencia ( $\eta$ ) de 0.96 %.

**Tabla 4.4.** Parámetros Fotovoltaicos del Mini-módulo MCAG04.

Área ( $\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (mA)	$J_{sc}$ ( $\text{mA/cm}^2$ )	$V_{MAX}$ (V)	$I_{MAX}$ (A)	$P_{MAX}$ (mW)	$R_s$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_{SH}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
13.58	1.92	23.19	1.71	1	11.99	11.98	970.87	1241.28	26.89	0.96

Con respecto a la celda 5 del mini-módulo MCAG04, en las figuras 4.12 a y b, se presentan sus curvas J-V en área pequeña y grande, respectivamente. En el caso de la celda pequeña (ver tabla 4.5a), el valor de su  $R_s$  es  $7.32 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , y puede ser considerado relativamente bajo, lo cual lleva a un factor de llenado de 64.5%. Mientras que en su respectiva celda del mini-módulo, ambos valores tienen un valor adverso. Especialmente, el valor de su  $R_s$  es de  $50.05 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , impactando adversamente en el factor de llenado y a la eficiencia. Es importante subrayar, que la celda de área pequeña está completamente aislada de la celda del mini-módulo, esta tiene la influencia de la interconexión y del proceso de escalamiento.



**Figura 4.12.** Curva I-V de Celda 5 del Mini-módulo MCAG04 de Área: a) Pequeña y b) Grande.

En el caso de la celda de área grande (ver tabla 4.5b), su  $R_s$  aumenta al incrementarse su área activa. Con base a la baja  $R_{SH}$  de la celda, se deduce que cuando la celda tiene una mayor área, se presentan defectos que producen una corriente de fuga, resistencia laminar del contacto trasero, agujeros y otros efectos físicos que degradan el FF y la eficiencia del mini-módulo (Borges Pool, 2014).

**Tabla 4.5.** Parámetros fotovoltaicos de la Celda 5 del Mini-módulo MCAG04 de Área: a) Pequeña y b) Grande.

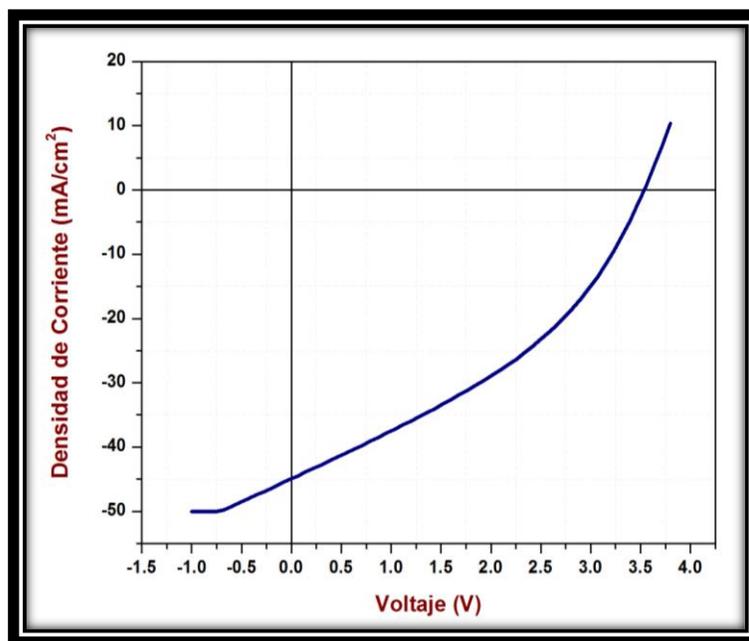
Área (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (mA)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>MAX</sub> (V)	I <sub>MAX</sub> (A)	P <sub>MAX</sub> (mW)	R <sub>s</sub> (Ω·cm <sup>2</sup> )	R <sub>SH</sub> (Ω·cm <sup>2</sup> )	FF (%)	η (%)
0.34	0.76	6.1	18.15	0.56	5.3	3.03	7.32	3246.76	64.54	9.71

Tabla a)

Área (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (mA)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>MAX</sub> (V)	I <sub>MAX</sub> (A)	P <sub>MAX</sub> (mW)	R <sub>s</sub> (Ω·cm <sup>2</sup> )	R <sub>SH</sub> (Ω·cm <sup>2</sup> )	FF (%)	η (%)
2.51	0.62	21.25	21.25	0.34	11.45	3.93	50.05	93.54	29.91	1.7

Tabla b)

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones J-V realizadas en el mini-módulo MCAG05 y de su celda 2 en área pequeña y grande.



**Figura 4.13.** Curva J-V del Mini-Módulo MCAG05.

En la figura 4.13, se presenta la curva J-V del mini-módulo MCAG05 que fue caracterizado bajo condiciones de laboratorio, con el espectro solar AM 1.5, con la finalidad de conocer sus parámetros fotovoltaicos.

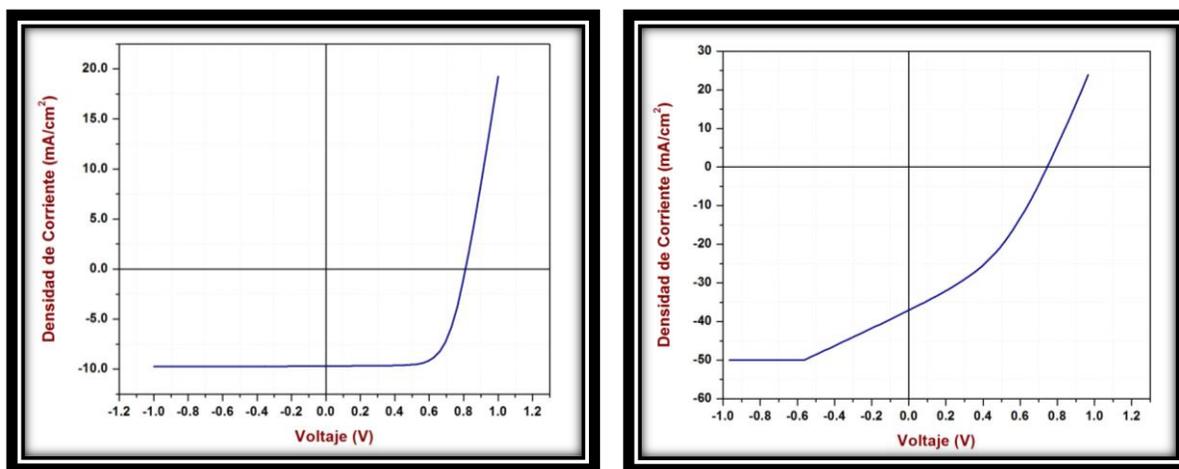
Con base en la curva J-V se obtuvieron los parámetros presentados en la tabla 4.6, se observa una  $R_s$  de  $395.25 \Omega \cdot \text{cm}^2$  y una  $R_{SH}$  de  $1901.87 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , debido a la influencia adversa de la  $R_s$ , el dispositivo posee un FF del 37.44 %, impactando adversamente en la eficiencia, la cual fue de 4.65 %. Al igual que en el mini-módulo MCAG04, su valor de  $R_s$  aumentó con el escalamiento. Mientras que la  $R_{SH}$  disminuyó.

**Tabla 4.6.** Parámetros Fotovoltaicos del Mini-módulo MCAG05.

Área ( $\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (mA)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{MAX}$ (V)	$I_{MAX}$ (A)	$P_{MAX}$ (mW)	$R_s$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_{SH}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
13.86	3.52	45	3.24	2.27	26.12	59.33	395.25	1901.87	37.44	4.65

Con respecto a la celda 2 del mini-módulo MCAG05, en las figuras 4.14 a y b, se presentan sus curvas J-V de la celda 2 en área pequeña y grande, respectivamente. En el caso de la celda pequeña (ver tabla 4.7a), tiene una  $R_s$  relativamente baja y una  $R_{SH}$  relativamente alta. Estas características permitieron al dispositivo poseer un FF del

70.16 %, siendo un valor cercano al 79.4 % obtenido por las celdas de First Solar (Green, Emery, Hishikawa, Warta, & Dunlop, 2014), no obstante su eficiencia fue de 9.22 %.



a)

b)

**Figura 4.14.** Curva J-V la Celda 2 del Mini-módulo MCAG05 de Área: a) Pequeña  
b) Grande.

Para la celda de área grande (ver tabla 4.7b), su  $R_s$  aumentó el doble con respecto a la pequeña, por lo que se deduce que producir celdas con mayor área, los procesos de fabricación introducen defectos. Estos ocasionan corrientes de fuga, resistencia laminar del contacto trasero, agujeros y otros defectos físicos que degradan el FF y la eficiencia del mini-módulo (Borges Pool, 2014). Respecto a la celda de mayor área, a pesar de una densidad de corriente de  $14.01 \text{ mA/cm}^2$ , similar a la de menor área, su eficiencia se vio reducida a casi la mitad, lo anterior a causa de una dramática reducción del factor de llenado, reduciéndose de 70.16 % a 37.63 %.

**Tabla 4.7.** Parámetros fotovoltaicos de la Celda 2 del Mini-módulo MCAG05 de Área:  
a) Pequeña y b) Grande.

Área ( $\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (mA)	$J_{sc}$ ( $\text{mA/cm}^2$ )	$V_{MAX}$ (V)	$I_{MAX}$ (A)	$P_{MAX}$ (mW)	$R_s$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_{SH}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
0.65	0.81	0.97	14.91	0.62	0.88	5.52	7.57	6019.49	70.16	9.22

Tabla a)

Área (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (mA)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>MAX</sub> (V)	I <sub>MAX</sub> (A)	P <sub>MAX</sub> (mW)	R <sub>s</sub> (Ω·cm <sup>2</sup> )	R <sub>SH</sub> (Ω·cm <sup>2</sup> )	FF (%)	η (%)
2.65	0.74	37.1	14.01	0.45	23.03	10.4	13.26	109.64	37.63	4.27

Tabla b)

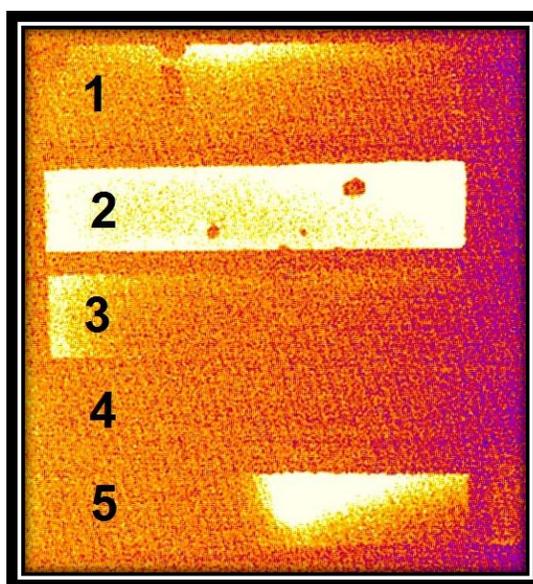
Con el fin de investigar las causas que producen las pérdidas en los mini-módulos, estos fueron caracterizados por medio de la técnica de electroluminiscencia.

#### 4.3.2. Electroluminiscencia (EL)

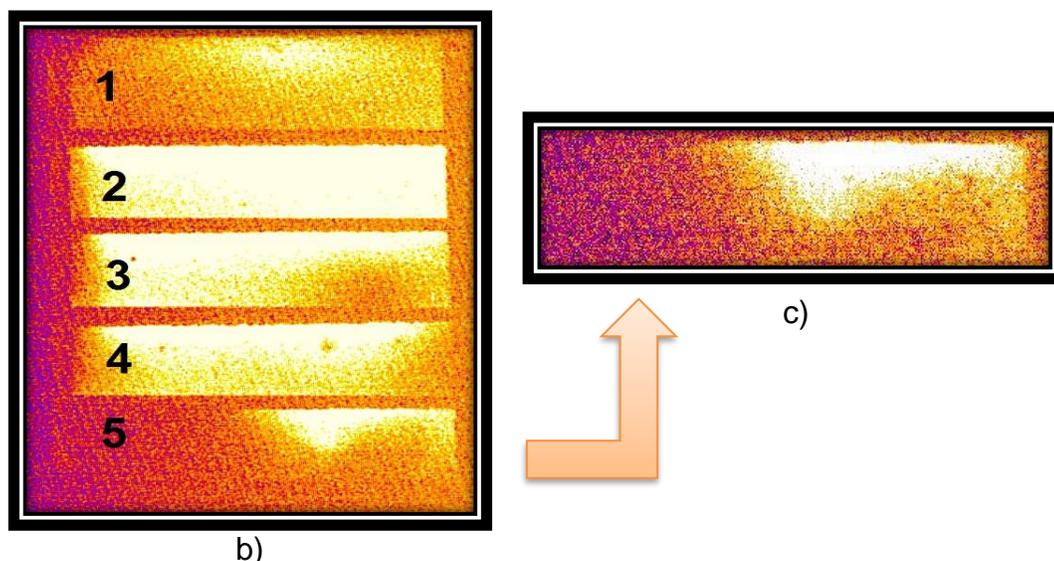
La electroluminiscencia es una herramienta que permite conocer la uniformidad del dispositivo. En esta caracterización, el mini-módulo está polarizado en forma directa lo que ocasiona que la luz sea emitida en una longitud de onda cercana a su band gap. Una cámara infrarroja captura la imagen de la luz emitida para observar la uniformidad en el dispositivo (Raguse, 2015).

Con base a sus parámetros opto-eléctricos, al mini-módulo MCAG04 (ver tabla 4.4) le fue inyectada una corriente de 80 mA con voltaje de 4 V, mientras que en el MCAG05 (ver tabla 4.6), la corriente aplicada fue de 50 mA con un voltaje de 4 V para obtener una clara luminiscencia de los dispositivos.

En la figura 4.15 se presentan las electroluminiscencias de los mini-módulos MCAG04 y MCAG05, así como de la celda 5 del segundo.



a)



**Figura 4.15.** Electroluminiscencia de: a) MCAG04, b) MCAG05, c) Celda 5 de MCAG05.

En el mini-módulo MCAG04, se observan zonas de baja luminiscencia en el interior de las celdas 1 y 2, esto es debido a “agujeros” producidos por rayones y/o desprendimiento de las películas delgadas (Raguse, 2015). Las partes oscuras indican zonas inactivas en el mini-módulo. Las celdas 1, 3 y 5 tienen luminiscencia de manera no-uniforme y con menor intensidad, estando totalmente inactiva la celda 4. Con base a su luminiscencia, se confirma la presencia de defectos tanto dentro, como en los bordes de las celdas. Lo cual nos lleva a deducir que esto es causado por la interconexión, repercutiendo en el desempeño del mini-módulo como un dispositivo de baja conversión fotovoltaica (Raguse, 2015)

El mini-módulo MCAG05 presentó mejor eficiencia, lo que se corroboró a través de su electroluminiscencia, donde las celdas 1, 2, 3 y 4 se iluminaron de manera relativamente uniforme. Mientras que la celda 5 es la de peor desempeño, emitiendo luminiscencia de manera parcial. Para confirmar que dicho desempeño es ocasionado por defectos a causa de las interconexiones, en la figura 4.15c se obtuvo su electroluminiscencia como celda, observándose el mismo patrón de luminiscencia, significando que posibles defectos en la raya P1 crea derivaciones (“shunts”), observándose que el comportamiento de la celda 5 es consistente con su caracterización como mini-módulo (Raguse, 2015).

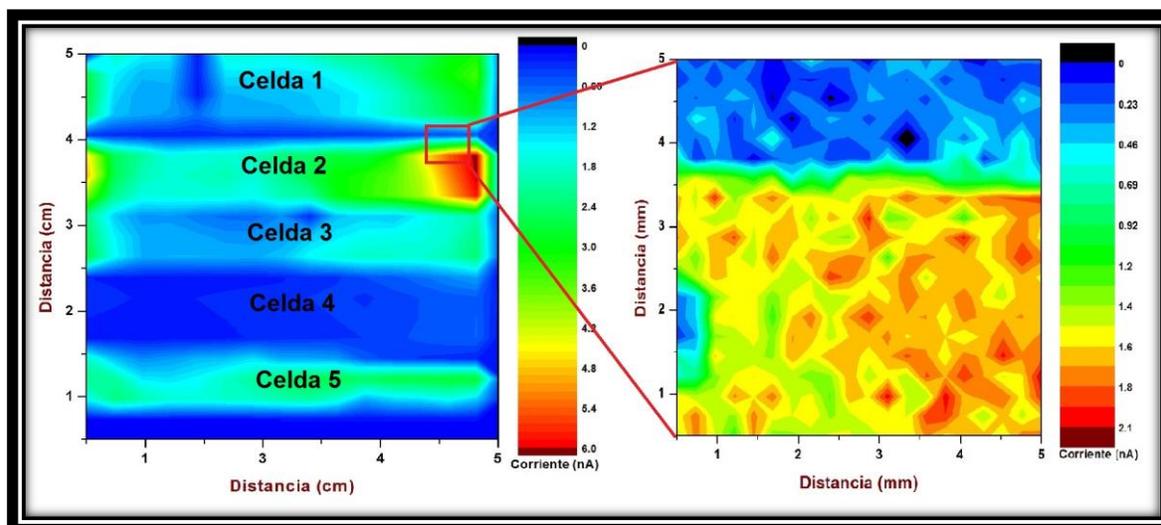
La baja electroluminiscencia de algunas zonas de las celdas coincide con lo reportado por la caracterización de su respectiva J-V, por lo que la resistencia serie introducida por su contacto trasero es una de las posibles causas que impiden la distribución homogénea de la corriente, observándose zonas inactivas o no-homogéneas (Raguse, 2015).

La técnica de EL permitió identificar las zonas de menor conversión fotovoltaica. Así como las celdas solares que están en cortocircuito debido a su interconexión. Para esta técnica la polarización del mini-módulo fue variada, así como la resolución de la imagen. Lo anterior con el propósito de identificar los defectos en las interconexiones (Zaubrecher, Johnston, & Sites, 2013). Los mini-módulos también fueron caracterizados por medio de la técnica de LBIC.

#### **4.3.3. Corriente Foto-inducida por Láser (LBIC)**

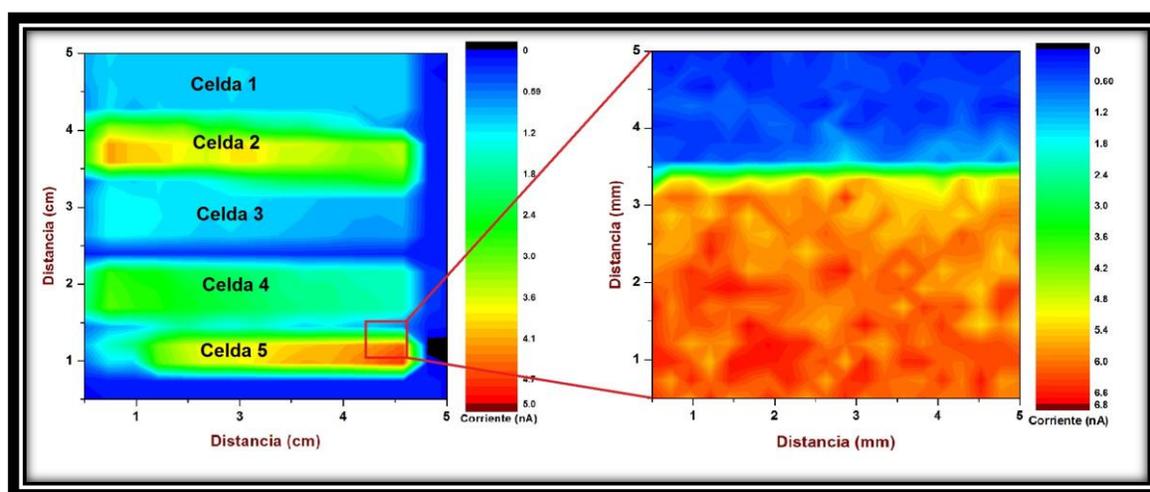
El sistema de LBIC es una poderosa técnica que revela información respecto a la uniformidad del dispositivo fotovoltaico. Esta técnica permite la variación de determinados parámetros para proveer información sobre las diferentes capas del mini-módulo, con el fin de identificar variaciones en el espesor del CdS, el band gap del CdTe o zonas identificadas como posibles centros de recombinación que disminuyen la eficiencia cuántica del dispositivo (Geisthardt, 2014).

El haz de luz láser empleado fue de 691 nm, lo que permitió realizar el mapeo la muestra a una profundidad de 0.33  $\mu\text{m}$ , correspondiente a la zona de la juntura entre el CdS y CdTe. Las figuras 4.16 y 4.17 presentan los mapeos de los mini-módulos MCAG04 y MCAG05 a dos diferentes resoluciones cada una. Para ambos casos, el barrido fue realizado con 400 puntos, la medición a menor resolución se realizó utilizando el spot láser de 1  $\text{mm}^2$  de diámetro con un paso de 5 mm. Para mayor resolución, se realizó la ampliación a un área de 25  $\text{mm}^2$  con un paso de 250  $\mu\text{m}$  y spot de 5  $\mu\text{m}^2$  de diámetro.



**Figura 4.16.** LBIC del Mini-módulo MCAG04 y Área de Interconexión.

En la figura 4.16, las celdas 1, 2, 3 y 5 del mini-módulo MCAG04, se aprecian como zonas activas. Comparando el mapeo con su electroluminiscencia (ver fig. 4.15a), se observa que ambas mediciones concuerdan en que la celda 2 es la de mejor conversión fotovoltaica. Adicionalmente, en la figura de la derecha, se presenta el mapeo mayor resolución, el cual permite identificar claramente a la zona inferior como la correspondiente a la celda 2 (con mayor generación de fotocorriente), mientras que la parte superior corresponde a la zona de interconexión en tonos azules debido a la casi nula generación de fotocorriente.

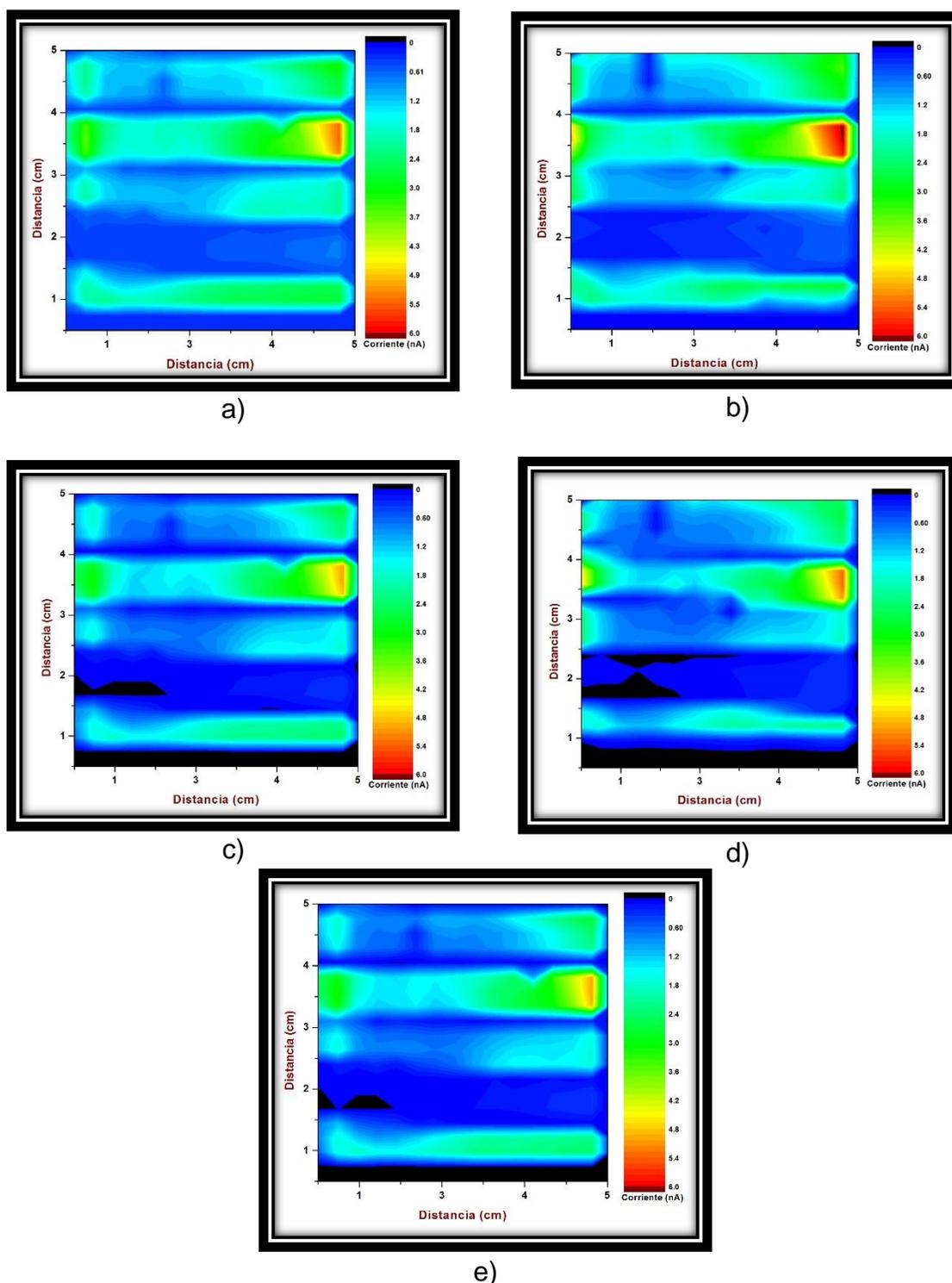


**Figura 4.17.** LBIC del Mini-módulo MCAG05 y Área de Interconexión.

En la figura 4.17 se presentan los mapeos en baja y alta resolución del mini-módulo MCAG05. La imagen de mayor resolución muestra una celda más uniforme con la zona de interconexión bien definida en tonos azules a causa de la baja generación de fotocorriente. Se observan no-homogeneidades, cuyas causas pueden deberse a un depósito no-uniforme del CdS que ocasiona variaciones en el rendimiento de la celda, haciendo que regiones sin CdS (llamadas “pinholes”) provoquen que el CdTe y el TCO entren en contacto directo. Como el CdTe y TCO forman una juntura débil, esta región será de rendimiento menor. Inclusive las regiones con CdS delgado pueden reducir el rendimiento a través de una juntura débil o pobre (Geisthardt, 2014).

Las capas delgadas de CdS absorben menor cantidad de luz, y poseen una EQ mayor a causa de una mayor colección por parte del CdTe. Por su parte, las capas gruesas de CdS absorben más luz y por ello su EQ es más baja a causa de una pésima colección del CdTe. Puede haber ocasiones donde una mejor uniformidad y rendimiento se correlacionan. Aunque el LBIC es efectivo en la detección de no-uniformidades, su mayor objetivo es ir más allá de la simple detección y poder identificar los defectos y posibles causas. Para ello se realizan estudios con la celda polarizada, donde se determina la localización de los defectos eléctricamente activos dentro de la estructura.

Considerando que la respuesta del mini-módulo en polarización directa es no-uniforme, y siendo las regiones de diodos débiles las que tenderán a reducir su EQ de manera más rápida que las de diodos fuertes. Las zonas de diodos débiles son uniones eléctricas parásitas entre las capas de CdS y CdTe, no hay un enlace “fuerte” entre ambas hetero-junturas, ocasionando que la corriente del diodo fluya con voltajes menores, afectando negativamente la  $V_{oc}$  del dispositivo (Sites J. R., 211). Se propone la polarización de los dispositivos fotovoltaicos de CdTe para conocer a mayor las no-homogeneidades y defectos en el módulo (Geisthardt, 2014). Fue realizado un barrido en el mini-módulo MCAG04 con un voltaje de -0.2 V a 0.8 V y un barrido de -0.2 V a 2.2 V. Al aplicar polarización directa en ambos mini-módulos, su EQ tuvo un decremento. Caso contrario con la polarización inversa, con la cual, los mini-módulos presentaron “mejoría” en su EQ.



**Figura 4.18.** LBIC de MCAG04 con Voltaje Aplicado de: a) -0.2 V, b) 0 V, c) 0.4 V, d) 0.6 V y e) 0.8 V.

Como se esperaba, la EQ medida del mini-módulo decreció al aplicársela una polarización directa. Sin embargo, el cambio en la respuesta fue no-uniforme.

Así mismo, las regiones de diodos débiles tendieron a reducir más rápidamente su EQ que las regiones de diodos buenos. Los diodos débiles pueden ser a causa de un CdS delgado o por una alta recombinación de interface (Geisthardt, 2014).

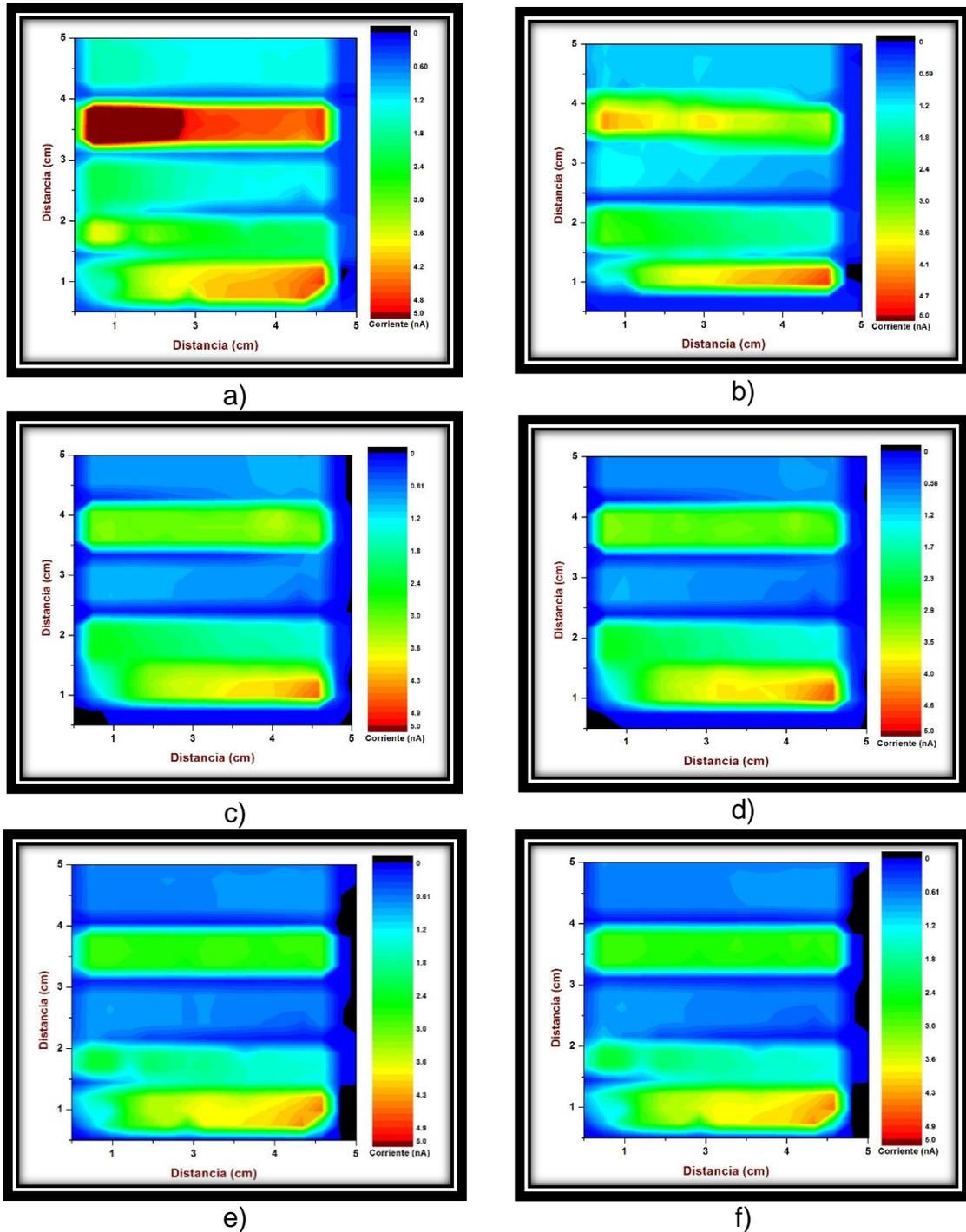


Figura 4.19. LBIC de MCAG05 con Voltaje Aplicado de: a) -0.2 V, b) 0 V, c) 0.6 V, d) 1.2 V, e) 1.6 V y f) 2.2 V.

La resistencia en serie, la foto-conductividad del CdS y la energía de las bandas tuvieron un impacto significativo en el EQ bajo polarización directa. La no-uniformidad se incrementó a medida que se fue aumentando el voltaje de la polarización, mientras que en polarización inversa, las no-uniformidades tienden a “mejorar” debido al enmascaramiento de las zonas con diodos débiles (Geisthardt, 2014).

## Conclusiones y Recomendaciones

En este apartado, con base en los resultados obtenidos, se ofrecen las conclusiones y recomendaciones que permitan optimizar la eficiencia de los mini-módulos en el desarrollo de futuras investigaciones.

### Conclusiones

En este trabajo se estudiaron mini-módulos de CdTe. El de referencia fue fabricado utilizando el método de rayado por abrasión mecánica, mientras que en los demás mini-módulos de CdTe la raya P1 fue realizada con un láser de 532 nm. Siendo esta la principal diferencia en el método de fabricación.

Mediante esta investigación se corroboró que las técnicas de Electroluminiscencia y LBIC proveen los medios visuales para una rápida identificación de las no-uniformidades y de zonas de baja conversión fotovoltaica. Al respecto, los análisis por EL corroboraron que la intensidad luminosa de las celdas va en función del voltaje de circuito abierto. Observándose que los mini-módulos cuyas celdas son relativamente uniformes, poseen menos mecanismos de pérdida inherentes a sus técnicas de fabricación y problemas en las juntas. Así mismo, no fue sino hasta la aplicación de voltaje en polarización directa en LBIC, que se aprovechó el potencial de esta caracterización. Proveyendo razonable información espacial de los dispositivos, debido a que el mapeo sin polarización enmascara diversas variaciones en ellos.

Tras comparar los resultados obtenidos en cada técnica, no solo se obtuvo un mejor entendimiento de cada mini-módulo, sino que también fue posible identificar las no-homogeneidades. En este caso, permitió observar la influencia del rayado del ITO en la eficiencia de los mini-módulos. Así mismo, la experiencia adquirida en el laboratorio de Física Aplicada del CINVESTAV, permitió conocer el proceso físico y factores que influyen en el desempeño de los mini-módulos fotovoltaicos de CdTe.

## Recomendaciones

- Implementación de un espacio cerrado para el sistema de EL, ya que la actual configuración posee presencia de luz externa, afectando negativamente el estudio por dicha técnica.
- Para el LBIC, con el objetivo de obtener una mejor resolución para observar las interconexiones entre celdas, se recomienda utilizar lentes microscópicas de mayor aumento, así como mejoras en el software. Ya que durante los experimentos se presentaron fallas técnicas que van en detrimento de la investigación.
- Incrementar en 100  $\mu\text{m}$  el ancho de los rayados de corte, así como explorar otros anchos con el fin de mejorar el proceso de interconexión.
- Fomentar la investigación de la tecnología de películas delgadas, ya que representa una poderosa alternativa para la generación de energía fotovoltaica. Abriendo nuevas fronteras para así llegar, hasta donde nadie ha ido antes.

## Bibliografía

1. Alamri, B. R. (2009). Technical Review of Energy Storage Technologies when Integrated with Intermittent Renewable Energy. *Sustainable Power Generation and Supply*, 1-5.
2. Álvaro, M., Cabeza, J. F., Fabuel, D., Corma, A., & García, H. (2007). *Electrochemiluminescent cells based on zeolite-encapsulated host-guest systems: encapsulated ruthenium tris-bipyridyl*.
3. Arkhipov, V., & Poortmans, J. (2008). *Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications*. Leuven, Bélgica: John Wiley & Sons, LTD.
4. Balenzategui Manzanares, J. L. (2008). Fundamentos de la Conversión Fotovoltaica. *Master en Energías Renovables y Mercado Energético 2007/2008*, 1-13.
5. Borges Pool, A. d. (2014). *Estudio de Degradación de Celdas Solares de CdTe/CdS a Través del Intemperismo Acelerado*. Mérida, Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán.
6. Carranza Flores, D. (2004). *Proceso de Caracterización V-I de Celdas Solares con LabView*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
7. Compaan, A. D., Matulionis, I., & Nakade, S. (2000). Laser scribing of polycrystalline thin films. *Optics and Lasers in Engineering* 34, 15-45.
8. Ellingson, R. J. (2014). *Solar Cells, Modules, Arrays, and Characterization*. The University of Toledo, Department of Physics and Astronomy: Principles and Varieties of Solar Energy (PHYS 4400).
9. erenovable.com. (2015, Noviembre 3). *Energías Renovables*. Retrieved from <http://erenovable.com/energias-renovables/>

10. First Solar. (2015, Enero). *First Solar*. Retrieved from <http://www.firstsolar.com/Home/About-Us>
11. Fraunhofer ISE. (2014). *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE*. Freiburg: Fraunhofer ISE.
12. Geisthardt, R. M. (2014). *Device Characterization of Cadmium Telluride Photovoltaics*. Fort Collins: Colorado State University.
13. Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2014, Octubre 27). Solar Cell Efficiency Tables (Version 45). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2-3.
14. Honsberg, C., & Bowden, S. (2014). *PVEducation.org*. Retrieved from <http://pveducation.org/pvcdrom/modules/introduction>
15. Jiménez-Olarte, D., Vigil-Galan, O., de la Rosa, J., Seuret-Jiménez, D., & Contreras-Puente, G. (2015). Laser scribing of fluorine doped tin oxide for serial interconnection of CdS/CdTe solar cells. *Revista Mexicana de Física*, 160-165.
16. Lynn, P. A. (2010). Electricity from Sunlight. In P. A. Lynn, *Electricity from Sunlight* (pp. 25-26). John Wiley & Sons, Ltd.
17. McCandless, B. E., & Sites, J. R. (2003). Cadmium Telluride Solar Cells. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 617-621.
18. Mijangos Alonzo, P. A. (2014). *Metodología para la Interconexión Monolítica de Celdas Solares de Película Delgada Basadas en CdS/CdTe*. Mérida: Instituto Tecnológico de Mérida.
19. Miliarium.com. (2008). *Energía solar fotovoltaica*. Retrieved from <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Energia/EnergiasRenovables/EnergiaSolarFotovoltaica.asp>
20. NREL. (2016, Marzo 9). *NREL*. Retrieved from National Renewable Energy Laboratory: <http://www.nrel.gov/ncpv/>

21. Raguse, J. M. (2015). *Electroluminescence of Thin-film CdTe Solar Cells and Modules*. Fort Collins: Colorado State University.
22. Ramírez, B. (2003, Septiembre 20). *Instituto Tecnológico de la Laguna* . Retrieved from Celdas Solares: [http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/optopdf4\\_archivos/unidad4tema1.pdf](http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/optopdf4_archivos/unidad4tema1.pdf)
23. Sites, J. (2012, Marzo). CdTe Based Solar Cells. Colorado, E.E.U.U.
24. Sites, J. R. (211). Measurement and analysis of non-uniformities in CdTe solar cells. *Thin Film Solar Technology III*, 1-7.
25. Xintao, X., & Junzi, X. (2010). Evaluation of Potential for Developing Renewable Sources of Energy to Facilitate Development in Developing Countries. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 1-3.
26. Zaunbrecher, K., Johnston, S., & Sites, J. R. (2013). Analysis of Thin-film Inhomogeneities Using Electroluminescence and LBIC Measurements. *IEEE*, 166-169.