

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS DE CONVERSIÓN  
DESCENDENTE DE LONGITUD DE ONDA DE  
CALCOGENUROS DE CADMIO EN CELDAS  
SOLARES DE SILICIO”

## **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA:

**LEONEL VARGAS MORENO**

DIRECTORES DE TESIS:

**DR. CARLOS VILLA ANGULO**

**DR. RAFAEL VILLA ANGULO**

## DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a mis padres, por su apoyo, amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ellos he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy hoy en día. Ha sido un orgullo y privilegio ser su hijo.

A mi hermana por estar siempre presente, acompañándome, por sus conocimientos y por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de laboratorio del laboratorio de física aplicada y bioinformática, que me apoyaron con sus conocimientos y experiencias.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos Villa por creer en mí y darme la oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo, quien con su dirección, conocimiento y enseñanza permitió el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Rafael Villa y al Dr. Ricardo Morales por su apoyo moral, por sus consejos y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Baja California y al Instituto de Ingeniería por darme la oportunidad de continuar mi desarrollo tanto académico como laboral.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me otorgó durante estos dos años y permitió que pudiera dedicar todo mi tiempo a la realización de esta Tesis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Eficiencia de conversión $\eta(\%)$ vs la temperatura del módulo considerando los parámetros $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$ y un $T_{ref} = 25 \text{ °C} = 298.15 \text{ °K}$ .....	4
Figura 2.	Eficiencia de conversión $\eta(\%)$ vs temperatura de operación para los módulos con características mostradas en la tabla (2) utilizando el parámetros $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$ .....	5
Figura 3.	Potencia de salida $P(W)$ vs la temperatura del módulo considerando los parámetros $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$ y un $T_{ref} = 25 \text{ °C} = 298.15 \text{ °K}$ .....	6
Figura 4.	Potencia de salida $P(W)$ vs temperatura de operación para los módulos con características mostradas en la tabla (2) utilizando el parámetro $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$ .....	6
Figura 5.	Parte de la tabla periódica que muestra los componentes cationes y aniones de cadmio de los grupos semiconductores II-VI.....	8
Figura 6.	Imagen SEM de la síntesis de nano fibras de CdS. (Li et al. 2014).....	9
Figura 7.	a) Diagrama esquemático de un QD de CdSe recubierto con polímero hidrofílico [35], b) Escala de emisión fluorescente de los QDs de CdSe recubiertos con ZnS [36].....	10
Figura 8.	Ensanchamiento térmico de fotoluminiscencia.....	11
Figura 9.	Diferentes pérdidas en una celda solar, (a) en el diagrama esquemático de la celda and (b) en el diagrama de bandas de la celda.....	12
Figura 10.	(a) Proceso de conversión ascendente; dos fotones con energía $\frac{1}{2}E_g$ generan un fotón con energía $E_g$ , donde $E_g$ es la banda prohibida del material y (b) diagrama de una celda solar con el CA.....	13
Figura 11.	(a) Proceso de conversión descendente; un fotón con energía $2E_g$ genera dos fotones de energía $E_g$ cada uno, y (b) diagrama esquemático de la celda con el CD.....	15
Figura 12.	Diagrama esquemático de un sistema de aspersion pirolítica.....	18
Figura 13.	Esquema de un sistema de división espectral de la luz incidente (SBS).....	22

Figura 14.	Esquema de un sistema de filtrado fotoluminiscente, (a) l luz es guiada hacia las CS, (b) la luz es desviada hacia las CS.....	23
Figura 15.	Sistema solar FL-Celda Solar propuesto.....	24
Figura 16.	Perfil del coeficiente de absorción vs energía del fotón, (a) CdS, (b) CdSe, (c) CdTe y (d) CdSe <sub>0.4</sub> Te <sub>0.6</sub> para las longitudes de onda de 350 nm a 800nm.....	28
Figura 17.	Comparación de los perfiles de los coeficientes de absorción vs energía del fotón de cada CC (CdS, CdSe, CdTe y CdSe <sub>0.4</sub> Te <sub>0.6</sub> ) con el estándar de irradiación solar AM1.5G.....	29
Figura 18.	Perfil de fotoluminiscencia obtenido para el CC binario CdS.....	30
Figura 19.	Perfil absorbancia del CdS sobrepuesto en el perfil de radiación del estándar AM1.5G.....	31
Figura 20.	Perfil luminiscencia del CdS sobrepuesto en el perfil de radiación del estándar AM1.5G.....	32
Figura 21.	Espectro de radiación posterior al filtro FL (impacta a la celda solar de silicio), el cual es resultante de la absorción y retransmisión del filtro FL de CdS.....	33
Figura 22.	Ejemplos de las temperaturas estimadas en el espectro de radiación AM1.5G....	34
Figura 23.	Ejemplos de las temperaturas estimadas en el espectro posterior al filtro de cds.	35
Figura 24.	Representación de una estructura multicapa.....	36
Figura 25.	Estructura de la celda solar de Si considerada.....	37
Figura 26.	G <sub>t</sub> en la capa activa Si-P para el espectro incidente (AM1.5G). (a) Perfil G <sub>t</sub> vs Profundidad en la capa para $\lambda = 350$ nm, (b) perfil de G <sub>t</sub> considerada desde el nm uno hasta el nm 10000 par $\lambda = 350$ nm hasta $\lambda = 800$ nm.....	43
Figura 27.	G <sub>t</sub> en la capa activa Si-P para el espectro posterior al filtro FL de CdS. (a) Perfil G <sub>t</sub> vs Profundidad en la capa para $\lambda = 350$ nm, (b) perfil de G <sub>t</sub> considerada desde el nm uno hasta el nm 10000 par $\lambda = 350$ nm hasta $\lambda = 800$ nm.....	44
Figura 28.	Curva J-V teórica de la celda solar de Si sin filtro FL de CdS.....	47
Figura 29.	Curva J-V teórica de la celda solar de Si con filtro FL de CdS.....	49
Figura 30.	Diagrama a bloques del procedimiento seguido para implementar los filtros FL...58	
Figura 31.	Sustrato de vidrio soda-lima utilizado.....	59

Figura 32.	Celda solar utilizada, (a) celda tal y como se adquirió del fabricante, (b) soldado de terminales.....	60
Figura 33.	Combo de la celda solar de Si adherida al vidrio soda-lima.....	60
Figura 34.	Combo de la celda solar de Si adherida al vidrio soda-lima.....	61
Figura 35.	Pistola micro aerógrafo y sus principales componentes.....	62
Figura 36.	Proceso de depósito del CdS sobre el sustrato de vidrio utilizando aspersion.....	64
Figura 37.	Proceso de depósito del CdSe sobre el sustrato de vidrio utilizando aspersion....	65
Figura 38.	Proceso de depósito del CdTe sobre el sustrato de vidrio utilizando aspersion....	66
Figura 39.	Proceso de depósito del $CdSe_{0.4}Te_{0.6}$ sobre el sustrato de vidrio utilizando aspersion.....	68
Figura 40.	Circuito de conexión para la prueba de voltaje de circuito abierto.....	69
Figura 41.	Circuito de conexión para la prueba de corriente de corto circuito.....	69
Figura 42.	Circuito de conexión para la obtención de la curva I-V.....	70
Figura 43.	Curva característica J-V teórica de una celda solar de Si sin filtro FL.....	72
Figura 44.	Curva característica J-V teórica de una celda solar de Si con filtro FL de CdS.....	73
Figura 45.	Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si sin filtro FL.....	74
Figura 46.	Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si con filtro FL de CdS.....	75
Figura 47.	Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si con filtro FL de CdSE.....	77
Figura 48.	Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si con filtro FL de CdTe.....	78
Figura 49.	Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si con filtro FL de $CdSe_{0.4}Te_{0.6}$ .....	79

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Características de desempeño de diferentes modelos de módulos solares de la compañía Sunpower.....	3
Tabla 2.	Características de desempeño de diferentes modelos de módulos solares en condiciones normales de operación.....	4
Tabla 3.	Propiedades más importantes de los CC en su forma burda.....	7
Tabla 4.	Parámetros de deposición utilizados para preparar películas de Cd utilizando SPD.....	21
Tabla 5.	Relación fraccional de la radiación absorbida por el material CdS.....	31
Tabla 6.	Relación fraccional de la radiación emitida por el material CdS.....	33
Tabla 7.	Ejemplo de las temperaturas estimadas para el espectro de irradiación AM1.5G.....	34
Tabla 8.	Ejemplo de las temperaturas estimadas para el espectro de irradiación posterior al filtro FL.....	35
Tabla 9.	Índice de refracción complejo para $\lambda = 350$ nm de cada material que compone la celda solar de Si-P.....	37
Tabla 10.	Gt obtenida para el espectro incidente AM1.5G y el rango de longitudes de onda desde el 350 a 850 nm.....	43
Tabla 11.	Gt obtenida para el espectro posterior al filtro FL de CdS y el rango $\lambda$ desde el 350 a 850 nm.....	45
Tabla 12.	Lista de parámetros de desempeño para la celda solar de Si con y sin el filtro FL de CdS.....	45
Tabla 13.	Lista de parámetros de desempeño calculados para la celda solar de Si con y sin el filtro FL de CdS.....	46
Tabla 14.	Lista de parámetros de desempeño calculados para la celda solar de Si con y sin el filtro FL de CdS.....	50
Tabla 15.	Materiales utilizados para la implementación de los filtros FL basados en CC. ...	51
Tabla 16.	Equipos de protección utilizados para la implementación de los filtros filtro FL basados en CC.....	54

Tabla 17.	Instrumentos de laboratorio y herramientas utilizados para la implementación de los filtros filtro FL.....	55
Tabla 18.	Resultados de la caracterización teórica de la celda solar de Si sin filtro FL.....	72
Tabla 19.	Resultados de la caracterización teórica de la celda solar de Si con filtro de CdS...	73
Tabla 20.	Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si sin filtro FL.....	75
Tabla 21.	Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si con filtro FL de CdS.....	76
Tabla 22.	Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si con filtro FL de CdSe.....	76
Tabla 23.	Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si con filtro FL de CdTe.....	77
Tabla 24.	Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si con filtro FL de CdSe <sub>0.4</sub> Te <sub>0.6</sub> .....	78
Tabla 25.	Comparación de los resultados teóricos de las celdas con filtro y sin filtro de CdS.....	80
Tabla 26.	Comparación de los resultados prácticos de la celda sin filtro, así como las celdas con filtros de CdS, CdSe, CdTe y CdSeTe.....	80
Tabla 27.	Parámetros de desempeño teóricos de las celdas con filtro y sin filtro de CdS y su correlación con $\eta_{power}$ .....	82
Tabla 28.	Parámetros de desempeño medidos prácticamente de la celda sin filtro y las celdas con filtros de CdS, CdSe, CdTe y CdSeTe y su correlación con $\eta_{power}$ .....	83

## ACRONIMOS Y ABREVIATURAS

A	Área del módulo o celda
$B_g$	Band Gap “Banda prohibida”
$\beta_{ref}$	Coficiente de temperatura
CA	Up-conversion “Conversión ascendente”
CC	Calcogenuros de cadmio
Cd	Cadmio
CdS	Sulfuro de Cadmio
CdSe	Seleniuro de Cadmio
CdTe	Telururo de Cadmio
CdSeTe	Calcogenuro ternario $CdSe_{0.4}Te_{0.6}$
Cu	Cobre
CdO	Oxido de cadmio
DC	Down-conversion “Conversión descendente”
FL	Fotoluminiscente
$FF$	Fill Factor “Factor de llenado”
$G_T$	Flujo de radiación solar
$I_m$	Corriente maxima
$I_{sc}$	Short Circuit Current “Corriente de corto circuito”
NF	Nano fibras
$\eta_{Tref}$	Eficiencia eléctrica del modulo
P	Potencia de salida
$P_m$	Potencia máxima
PL	Fotoluminiscencia
QD's	Quantum dots “Puntos cuánticos”
SBS	Spectral Beam Splitting “ Division spectral de la luz incidente”
Si	Silicio
SPD	Deposición por aspersion pirolítica
$T_{ref}$	Temperatura de referencia

UV-----Ultravioleta  
 $V_m$ -----Voltaje maximo  
 $V_{oc}$ -----Open Circuit Voltaje "Voltaje de circuito abierto"  
 $\gamma$ -----Coeficiente de radiación solar

## Resumen

En este trabajo de tesis se presenta de manera detallada el diseño teórico e implementación práctica de filtros fotoluminiscentes (FL) de conversión descendente de longitud de onda para mejorar la eficiencia de conversión de celdas solares de silicio. El diseño teórico está basado en el cálculo de los perfiles de absorbanza y fotoluminiscencia, el espectro incidente, la temperatura promedio retirada por el filtro y dos procesos básicos en el análisis de celdas solares; el cálculo de la tasa de generación de excitones  $G(x)$  utilizando la técnica de la matriz lineal de transferencia óptica en un solo eje y la caracterización del desempeño de la celda unitaria mediante el cálculo del voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la densidad de corriente de corto circuito ( $J_{sc}$ ), la curva de densidad de corriente (JV), el factor de llenado y la eficiencia de conversión ( $\eta_{power}$ ) utilizando las ecuaciones básicas para dispositivos con unión PN.

La implementación práctica se realizó a través del depósito de películas delgadas de los materiales CC: CdS, CdSe, CdTe o  $CdSe_{0.4}Te_{0.5}$  sobre sustratos de vidrio soda-lima utilizando deposición por rocío en frío. La deposición por rocío en frío es una técnica simple y económica que se implementó utilizando una pistola aerógrafo con aspersión por chorro de aire presurizado. Las mediciones—obtenidas en la implementación práctica de los filtros tienen una buena correlación con los valores calculados en la teoría.

En el **capítulo uno** se encuentra una descripción general del efecto que tiene la temperatura de operación en la eficiencia de conversión y la potencia de salida de las celdas solares basadas en silicio. Adicionalmente, se describen las características de los CC utilizados en este trabajo de tesis y la técnica de deposición por aspersión pirolítica en la cual está basado el rociado en frío utilizado para el depósito de los materiales sobre los sustratos de vidrio.

En el **capítulo dos** se describe la justificación, el objetivo general, los objetivos específicos y la hipótesis planteada de esta tesis.

En el **capítulo tres** se describe de manera detallada el proceso que se utilizó para el diseño teórico de los filtros. Se describe la estimación del perfil de absorbanza de los CC, la estimación del perfil de fotoluminiscencia del CdS, el espectro incidente en la celda resultante de la implementación del filtro, la estimación promedio de la temperatura retirada por dicho filtro, el

culo de la tasa de generación de excitones para celdas con y sin el filtro, y por último el cálculo de las características de desempeño de las celdas solares.

En el **capítulo cuatro** se describe el proceso completo de la fabricación de los módulos de prueba con y sin filtro. Se describe el proceso de encapsulamiento de la celda solar de Si y el sustrato de vidrio con la película de CC depositada. Adicionalmente, se describen las pruebas realizadas para la caracterización de los módulos resultantes.

En el **capítulo cinco** se analizan los resultados obtenidos comparando los valores teóricos que se reportan en el capítulo tres y los valores medidos en los módulos fabricados del capítulo cuatro.

En el **capítulo seis** se describen las conclusiones obtenidas durante y después de la realización de este trabajo de tesis, así como el planteamiento de trabajos futuros.

## Abstract

In this thesis, the theoretical design and practical implementation of down conversion based photoluminescent filters to improve the conversion efficiency of silicon solar cells is presented in detail. The theoretical design is based on the calculation of the absorbance and photoluminescent spectra, the incident spectrum, the average temperature withdrawn by the filter and two basic processes of solar cells analysis: the calculation of the generation rate of excitons  $G(x)$  using the technique of the linear matrix of optical transfer in a single axis and the characterization of the unitary solar cell performance by calculating the current-voltage density curve (J-V), the open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), the short circuit current density ( $J_{sc}$ ), fill factor ( $FF$ ) and conversion efficiency ( $\eta_{power}$ ) using the basic equations for PN junction devices.

The practical implementation was carried out through the deposit of thin layer films of the materials: CdS, CdSe, CdTe or CdSe<sub>0.4</sub>Te<sub>0.5</sub> on soda-lime glass substrates using cold spray deposition. Cold spray deposition is a simple and inexpensive technique that was implemented using a pressurized air jet spray micro-airbrush gun. The measurements obtained in the practical implementation of the filters have a good correlation with the values calculated in theory.

**Chapter one** provides an overview of the effect operating temperature has on the conversion efficiency and power output of silicon-based solar cells. Additionally, the characteristics of the CC used in this thesis work and the pyrolytic spray deposition technique on which the cold spray used for the deposit of materials on glass substrates is based are described.

**Chapter two** describes the justification for carrying out this thesis work, the general objective, the specific objectives, and the proposed hypothesis.

In **chapter three**, the process used for the theoretical design of the filter is described in detail. The estimation of the CC absorbance profile, the estimation of the CdS photoluminescence profile, the incident spectrum in the cell resulting from the implementation of the filter, the average estimate of the temperature removed by said filter, the calculation of the generation rate of excitons for cells with and without the filter, and finally the calculation of the performance characteristics of the solar cells.

In **chapter five** the results obtained throughout this work are analyzed through a comparison between the theoretical values reported in chapter three and the values of the measurements made with the modules manufactured in chapter four.

**Chapter six** describes the conclusions obtained during and after the completion of this thesis work, as well as the proposal for future work that would improve the achievements obtained in this thesis.

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABLAS.....	vi
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xii
<b>Capítulo 1 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Efecto teórico de la temperatura en el rendimiento de una celda solar .....	1
1.1.1 Eficiencia de conversión vs temperatura de operación de módulos celdas comerciales.....	3
1.1.2 Potencia de salida vs temperatura de operación en celdas solar comerciales...	5
1.2 Compuestos Calcogenuros de Cadmio.....	7
1.2.1 Sulfuro de cadmio (CdS).....	8
1.2.2 Seleniuro de cadmio (CdSe).....	9
1.2.3 Telurio de cadmio (CdTe).....	10
1.3 Filtros fotoluminiscentes de ensanchamiento térmico.....	10
1.3.1 Conversión ascendente de longitud de onda.....	12
1.3.2 Conversión descendente de longitud de onda.....	14
1.4 Aproximación de Wien para estimar la temperatura promedio de la radiación solar (AM1.5G) en incidencia directa.....	15
1.5 Técnica de deposición por aspersion pirolítica.....	16
<b>Capítulo 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>22</b>
2.1 Justificación del problema .....	22
2.2 Objetivos.....	25
2.2.1 Objetivo general.....	25
2.2.2 Objetivos particulares .....	25
2.3 Hipótesis.....	26

<b>Capítulo 3 DISEÑO TEÓRICO</b> .....	27
3.1 Estimación del perfil de absorbancia de los calcogenuros de cadmio (CdS, CdSe, CdTe, CdTe <sub>0.4</sub> Se <sub>0.6</sub> ).....	27
3.2 Estimación del perfil de fotoluminiscencia del filtro CdS.....	29
3.3 Estimación del espectro incidente en la celda solar con filtro CdS.....	30
3.4 Estimación de la temperatura promedio retirada por el material semiconductor CdS.....	33
3.5 Cálculo de la tasa de generación de exítones (GT) en la celda solar de Si sin filtro CdS.....	35
3.6 Cálculo de la tasa de generación de exítones (GT) en la celda solar de Si con filtro CdS.....	44
3.7 Cálculo de las características de desempeño de las celdas solares.....	45
3.7.1 Celda solar sin filtro de CdS.....	46
3.8.2 Celda solar con filtro de CdS.....	48
3.8 Comparación de resultados y observaciones importantes.....	50
<b>Capítulo 4 IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA Y EXPERIMENTAL DE LOS FILTROS DE CONVERSION DECENDENTE DE LONGITUD DE ONDA.</b>	
4.1 Materiales utilizados en la fabricación de los módulos de prueba.....	51
4.1.1 Equipo utilizado.....	53
4.2 Procedimientos para la implementación de los filtros.....	58
4.2.1 Preparación del sustrato.....	59
4.2.2 Preparación de la celda solar.....	59
4.2.3 Preparación celda solar sin filtro o de referencia.....	60
4.2.3.1 Encapsulado de la celda solar.....	60
4.2.4 Herramienta principal para la deposición de los filtros basados en CC.....	62
4.2.4.1 Implementación práctica del filtro de CdS.....	63
4.2.4.2 Implementación práctica del filtro de CdSe.....	64
4.2.4.3 Implementación práctica del filtro de CdTe.....	65
4.2.4.4 Implementación práctica del filtro de CdSe <sub>0.4</sub> Te <sub>0.6</sub> .....	67

4.3 Pruebas de caracterización del desempeño.....	68
4.3.1 Pruebas de circuito abierto.....	68
4.3.2 Pruebas de corto circuito.....	69
4.3.3 Obtención de las curvas I-V de las implementaciones prácticas.....	69
<b>Capítulo 5 RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>71</b>
5.1 Resumen de los resultados obtenidos en el diseño teórico.....	71
5.2 Resumen de los resultados obtenidos en la implementación práctica.....	73
5.3 Comparación y correlación de los resultados teóricos y prácticos.....	79
<b>Capítulo 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>83</b>
6.1 Conclusiones.....	83
6.2 Trabajo futuro.....	84
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>93</b>

# Capítulo 1

## MARCO TEÓRICO

En la actualidad las energías renovables se han vuelto un recurso indispensable para el ser humano. La gran mayoría de la energía eléctrica que utilizamos en nuestro planeta proviene de los combustibles fósiles y hoy en día este recurso escasea más y más. Adicionalmente, la quema de combustible fósil contamina la atmosfera gravemente, por lo que la investigación y desarrollo de energías limpias que sustituyan a este recurso ha tomado un gran impulso en los últimos años. Dentro de los diferentes recursos renovables con los que contamos en nuestro planeta la energía solar se puede considerar como la fuente de energía más importante para nosotros. Diferentes estudios alrededor del mundo estiman que la energía proveniente del sol es más que suficiente para satisfacer las necesidades de energía en el mundo [1]. Esta energía la podemos aprovecharla utilizando celdas solares. Las celdas solares, también conocidas como celdas fotovoltaicas, convierten la energía de la luz en energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico. Actualmente, las limitantes más importantes para el uso de celdas solares son el alto costo de mantenimiento y producción, la dependencia de la hora del día, y el efecto que tiene la temperatura en sus características de desempeño.

Principalmente la región del norte de México cuenta con una alta radiación solar directa, lo que puede ser aprovechado por celdas solares para producir energía eléctrica que satisfaga las necesidades de esta región. Pero debido a que la región norte del país en su mayoría es un lugar desértico que alcanza temperaturas por encima de los 45 °C la eficiencia de conversión eléctrica de las celdas solares se ve afectada, por lo que el efecto de la temperatura en los paneles fotovoltaicos es sin duda es uno de los retos más importantes a resolver antes de su uso masivo en el sector residencial.

### 1.1 Efecto teórico de la temperatura en el rendimiento de una celda solar.

Las celdas solares generalmente están expuestas a temperaturas que van desde los 15 °C (288 K) hasta los 50 °C (323 K) [2, 3] en aplicaciones terrestres, e incluso temperaturas más altas en aplicaciones que usan concentradores o aplicaciones espaciales [4, 5]. El efecto que tiene la temperatura en la potencia máxima ( $P_m$ ) entregada por una celda solar puede observarse al ver

cómo la temperatura influye en el voltaje máximo ( $V_m$ ) y corriente máxima ( $I_m$ ). La potencia máxima de una celda solar está dada por la **ecuación (1)**. En esta ecuación se puede observar que si por efecto de temperatura incrementa o decrementa el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y/o el factor de llenado ( $FF$ ) y/o la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) se manifiesta un efecto lineal en la potencia.

$$P_m = V_m I_m = (FF) V_{oc} I_{sc} \quad (1)$$

Diferentes grupos de investigadores han estudiado y publicado los efectos de la temperatura en el desempeño de las celdas solares y han definido diferentes parámetros para cuantificar estos efectos. Los parámetros más significativos son los que han sido adoptados por los fabricantes de celdas solares para definir las características y el rendimiento de las celdas solares comerciales. Entre estos parámetros se encuentra, la eficiencia eléctrica de la celda o módulo  $\eta_{Tref}$  y el coeficiente de temperatura  $\beta_{ref}$  a una temperatura de referencia  $T_{ref}$ . Estos parámetros pueden obtenerse de pruebas de caracterización tipo “flash” en las que la salida eléctrica del módulo es medida a dos temperaturas diferentes para un flujo de radiación solar dado [6]. En particular  $\beta_{ref}$  no solo depende del material de la celda sino también de  $T_{ref}$ , como se muestra en la **ecuación (2)**.

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}} \quad (2)$$

donde  $T_0$  es la temperatura a la que la eficiencia eléctrica del módulo o celda solar cae a cero [7]. Para celdas solares de Silicio (Si) cristalino,  $T_0 = 270^\circ \text{C}$  [8]. Usando la **ecuación (2)**, el efecto neto de la temperatura en la eficiencia  $\eta_c$  de conversión de la celda solar se puede obtener usando la **ecuación (3)** [9].

$$\eta_c = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} G_T] \quad (3)$$

donde,  $T_c$  es la temperatura de operación de la celda solar,  $\gamma$  es el coeficiente de radiación solar y  $G_T$  es el flujo de radiación solar o irradiancia en la superficie del módulo dado en  $\text{W/m}^2$ .  $\beta_{ref}$  y  $\gamma$  son propiedades de los materiales con valores alrededor de  $0.004 \text{ K}^{-1}$  y  $0.12$  respectivamente para paneles fotovoltaicos cristalinos de Si [10]. Sin embargo, como explica Evans [11],  $\gamma$  normalmente es considerado cero por lo que el término  $\gamma \log_{10} G_T$  se elimina y la **ecuación (3)** se

reduce a la **ecuación lineal (4)**. Esta ecuación representa la expresión tradicional lineal utilizada para obtener la eficiencia de conversión de la celda solar con respecto a la temperatura [8].

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})] \quad (4)$$

De manera similar, la potencia eléctrica de salida ( $P$ ) de la celda solar se puede obtener usando la **ecuación (5)**. En esta ecuación  $P$  tiene una dependencia lineal de temperatura donde  $\tau_{PV}$  es la transmitancia de la capa exterior de la celda y  $A$  es la superficie de apertura de la celda.

$$P = G_T \tau_{PV} \eta_{T_{ref}} A [1 - 0.0045(T_c - 25)] \quad (5)$$

### 1.1.1 Eficiencia de conversión vs temperatura de operación de módulos celda comerciales.

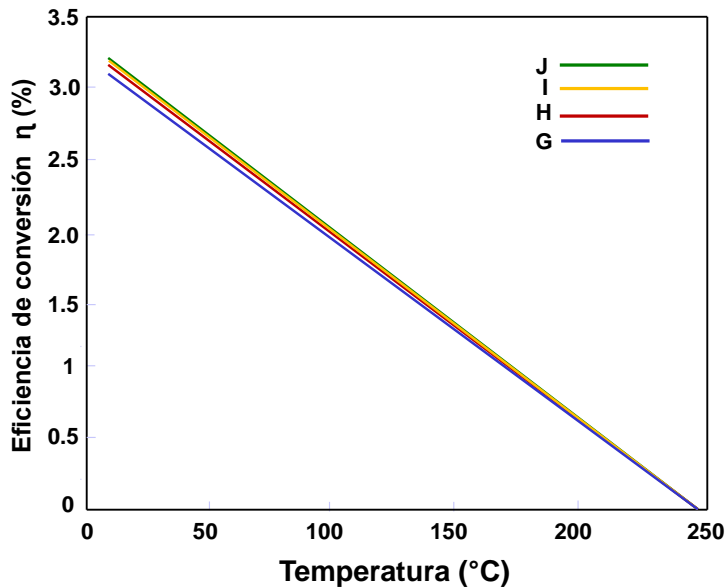
La **tabla (1)** muestra las características de desempeño de diferentes modelos de paneles solares comerciales de la compañía Sunpower. En la **tabla (1)** se puede observar que las eficiencias de conversión  $E_{ff}(\%)$  varían desde 21.8 a 22.5 para el mejor de los casos (modulo J). La mejor generación de voltaje de circuito abierto  $V_{oc} = 0.687$  V y corriente de corto circuito  $I_{sc} = 6.28$  A es obtenida por el módulo J.

**Tabla (1).** Características de desempeño de diferentes modelos de módulos solares de la compañía Sunpower.

Características eléctricas de celdas típicas en condiciones de laboratorio (STC) $1000 \text{ w/m}^2$ (AM 1.5G) a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .						
Modulo	Pmp(W)	$E_{ff}(\%)$	Vmp(V)	Imp(A)	Voc(V)	Isc(A)
G	3.34	21.8	0.574	5.83	0.682	6.24
H	3.38	22.1	0.577	5.87	0.684	6.26
I	3.40	22.3	0.581	5.90	0.686	6.27
J	3.42	22.5	0.582	5.93	0.687	6.28

Considerando un rango de temperatura de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , un  $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$  y un  $T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298.15 \text{ }^\circ\text{K}$  y aplicando la **ecuación (3)** se obtienen las curvas de la **figura (1)**. De las curvas de la **figura (1)** se puede observar que para los cuatro módulos (G, H, I y J) la eficiencia de conversión decae de manera lineal a medida que la temperatura de operación incrementa. Por ejemplo, la celda tipo J tiene una eficiencia de 22.5 % a una temperatura de operación de

25 °C, esta eficiencia decae a 16.943% cuando la temperatura de operación incrementa a 80 °C y a 14.91 % cuando la temperatura de operación incrementa a 100 °C.

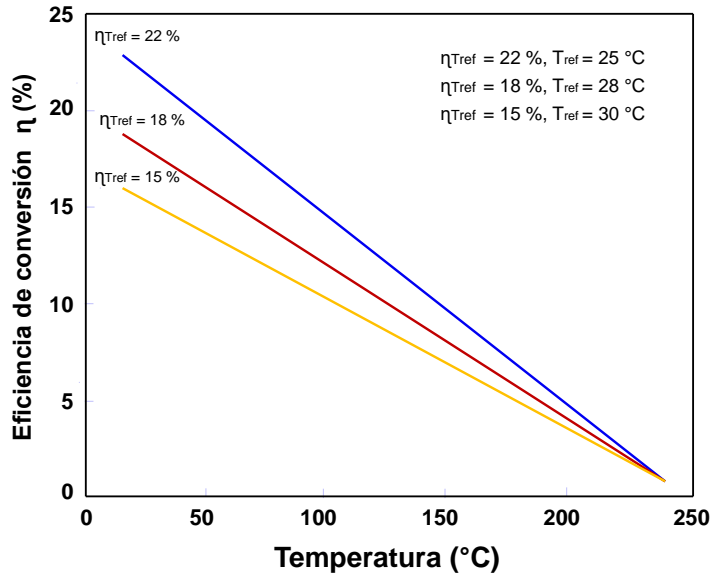


**Figura (1).** Eficiencia de conversión  $\eta$ (%) vs la temperatura del módulo considerando los parámetros  $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$  y un  $T_{ref} = 25 \text{ °C} = 298.15 \text{ °K}$

Ahora, consideramos las eficiencias de conversión y temperaturas de operación bajo condiciones normales mostrados en la **tabla (2)** y evaluando de nuevo con la **ecuación (4)**, para el mismo parámetro  $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$ , se obtienen las curvas mostradas en la **figura (2)**. De las curvas de la **figura (2)** se puede observar que, para las tres características dadas, la eficiencia de conversión decae de manera lineal a medida que la temperatura de operación incrementa. De la misma manera utilizando la **ecuación (2)** se puede obtener una temperatura teórica de 247.22 °C a la cual la eficiencia de estos módulos decae a cero. Este valor obtenido teóricamente es cercano al límite de temperatura existente para módulos de celdas solares de silicio a la cual la eficiencia de conversión de es cero.

**Tabla (2).** Características de desempeño de diferentes modelos de módulos solares en condiciones normales de operación.

Características eléctricas de celdas típicas en condiciones normales de operación (STC) $1000 \text{ w/m}^2$ (AM 1.5G)		
Tipo	$\eta_{ref}$ . (%)	$T_{ref}$ (°C)
A	21	25
B	18	28
C	15	30



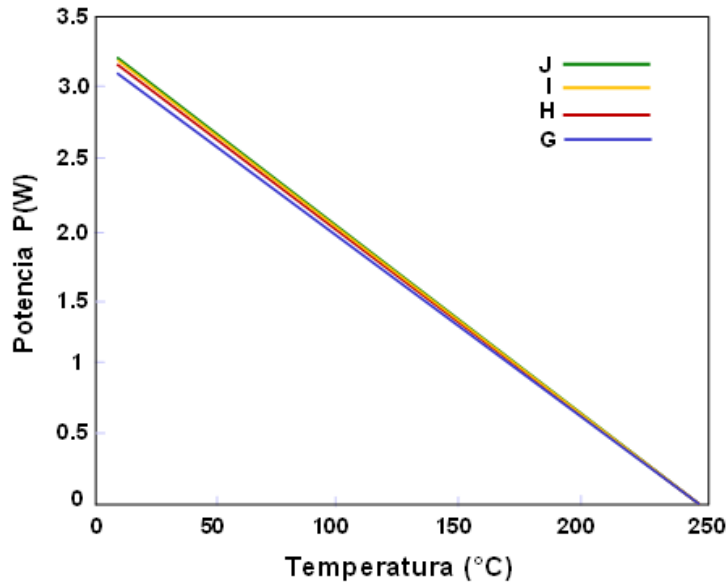
**Figura (2).** Eficiencia de conversión  $\eta$ (%) vs temperatura de operación para los módulos con características mostradas en la tabla (2) utilizando el parámetro  $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$ .

### 1.1.2 Potencia de conversión vs temperatura de operación de módulos celda comerciales.

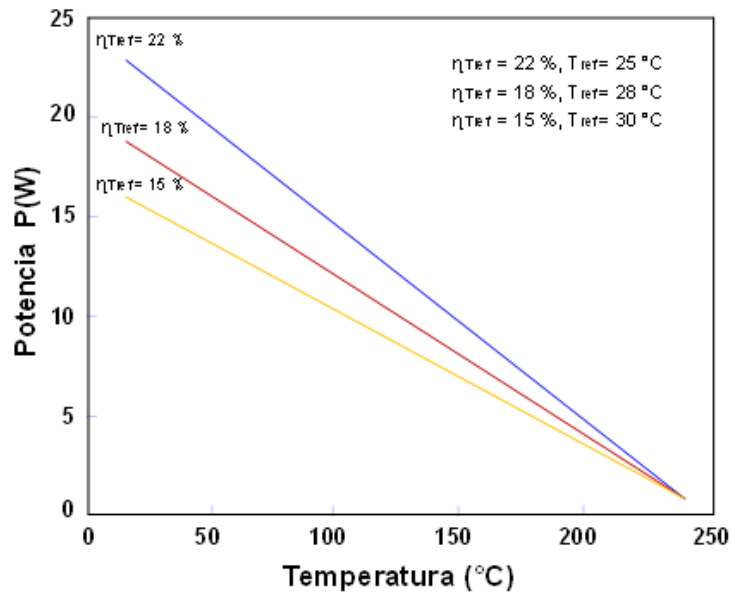
Usando los parámetros de los módulos mostrados en la tabla (1) y utilizando la ecuación (5) se obtuvieron las potencias eléctricas de salida ( $P$ ) vs la temperatura de los módulos tal como se muestran en **figura (3)**. De las curvas de la **figura (3)** se puede observar que para los cuatro casos  $P$  tiene una dependencia lineal de la temperatura, esto es la potencia de salida decae de manera lineal a medida que la temperatura de operación incrementa, donde  $\tau_{PV}$  es la transmitancia de la capa exterior de la celda y  $A$  es la superficie de apertura de la celda. Por ejemplo, el módulo J tiene una potencia de 3.42 W a una temperatura de operación de 25 °C, esta potencia decae a 2.23 W cuando la temperatura de operación incrementa a 80 °C y a una potencia de 1.9633 W cuando la temperatura de operación incrementa a 100 °C.

De la misma manera que en el caso del cálculo de la eficiencia, si consideramos los parámetros bajo condiciones normales de operación mostrados en la **tabla (2)** y evaluando de nuevo con la **ecuación (5)**, para el mismo parámetro  $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$ , se obtienen las curvas mostradas en la **figura (4)**. De las curvas de la **figura (4)** se puede observar que, para las tres características dadas, la potencia de salida decae de manera lineal a medida que la temperatura de operación incrementa. Igual que en el caso de la obtención de las curvas de eficiencias vs

temperatura, utilizando la **ecuación (5)** se puede obtener una temperatura teórica de 247.22 ° C a la cual la potencia de salida de los módulos decae a cero.



**Figura (3).** Potencia de salida P(W) vs la temperatura del módulo considerando los parámetros  $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$  y un  $T_{ref} = 25 \text{ °C} = 298.15 \text{ °K}$



**Figura (4).** Potencia de salida P(W) vs temperatura de operación para los módulos con características mostradas en la tabla (2) utilizando el parámetro  $\beta_{ref} = 0.0041 \text{ K}^{-1}$ .

## 1.2. Compuestos Calcogenuros de Cadmio

Los materiales compuestos por elementos de los grupos II y VI de la tabla periódica se denominan materiales semiconductores II-VI. Estos materiales, a una temperatura de cero absoluto se comportan como aislantes, pero fuera de esta temperatura presentan propiedades de conducción y aislamiento dependientes de la temperatura. En estos compuestos el catión es cadmio (Cd) y los aniones se toman de la lista de calcógenos (oxígeno, azufre, selenio, telurio) del grupo VI de la tabla periódica, el resultado es un grupo de materiales (CdO, CdS, CdSe, CdTe) que se denomina calcogenuros de cadmio (CC). Generalmente, estos materiales se sintetizan como estructura Zinc blende (cúbica) y presentan propiedades semiconductoras [12, 13]. La **tabla (3)** muestra las propiedades más importantes de los CC en su forma burda o a granel. Estas propiedades convierten a los CC en materiales ideales para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos y energía fotovoltaica [14 - 16]. En la actualidad, los semiconductores II-VI atraen la atención de muchos investigadores por sus notables propiedades físicas que los hacen lograr el confinamiento tridimensional de los portadores de carga y aumentar el número de átomos superficiales [17]. Estos semiconductores en forma cristalina se han convertido en el centro de atención debido a su estructura de banda prohibida sintonizable [18], alto coeficiente de extinción [19, 20] y posible generación de múltiples excitones [21].

Tabla (3). Propiedades más importantes de los CC en su forma burda.

Compuesto CC	Estructura	$E_{\text{gap}}$ (eV)	Constante de red (Å)	Densidad ( $\text{Khm}^{-3}$ )
CdO	FCC	2.16	4.69	8150
CdS	Wurtzite	2.49	4.13/6.71	4820
CdSe	Wurtzite	1.74	4.3/7.01	5810
CdTe	Zinc blende	1.43	6.48	5870

En especial estos materiales en forma nanoestructurada poseen características funcionales que no poseen en su forma burda o a granel. Cuando estos materiales llegan a tamaños de 2 nm o menos forman una subclase con propiedades adicionales que pueden ser utilizados en tecnologías avanzadas [22]. Las estrategias de combinaciones anión - catión posibles para sintetizar los CC se encuentra en la **figura (5)**. En especial los QDs (Quantum Dots) con estas

combinaciones revelan una extraordinaria relación entre las características ópticas y ancho de la banda prohibida con el tamaño del QD. Estos materiales muestran un potencial en aplicaciones para dispositivos fotónicos y optoelectrónicos debido a la posibilidad de ajustar sus propiedades eléctricas y ópticas con el tamaño de las partículas [23 – 26].

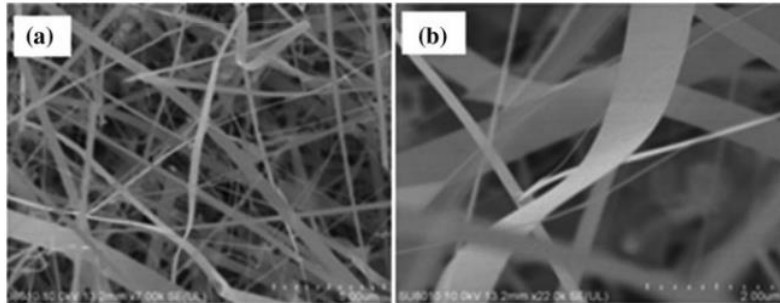
	II	III	IV	V	VI
2		5 B	6 C	7 N	8 O
3		13 Al	14 Si	15 Zn	16 S
4	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
5	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te

**Figura (5).** Parte de la tabla periódica que muestra los componentes cationes (círculo rojo) y aniones (círculo negro) de cadmio de los grupos semiconductores II-VI.

### 1.2.1 Sulfuro de cadmio (CdS)

El sulfuro de cadmio (CdS) es un compuesto binario formado por cadmio y azufre. De forma burda o a granel tiene una estructura de tipo Wurtzita hexagonal, con un punto de fusión de 1600 °C [27], es insoluble en agua, pero soluble en ácidos minerales diluidos. Es un semiconductor de tipo n que muestra conductividad debido a las vacantes de azufre. A temperatura ambiente, el CdS tiene un valor de banda prohibida ( $B_g$ ) de 2.42 eV [28], lo que lo convierte en un candidato ideal para detectar la luz visible [29]. El CdS se puede combinar con CdSe o CdTe para formar aleaciones ternarias con  $B_g$  ajustable que actualmente son utilizados para la fabricación de fotodetectores sintonizables [30]. El CdS de forma nanoestructurada posee propiedades físicas, químicas, eléctricas, ópticas y de transporte de cargas excepcionales. El CdS de 2.5 nm de tamaño tiene un punto de fusión bajo de 400 °C [27], con un ancho de banda prohibida de 3.85 eV [31]. Las nanoestructuras de CdS se pueden ajustar fácilmente para emitir diferentes longitudes de onda dentro del rango de luz visible variando proporciones iniciales de Cd y S [32]. También se ha fabricado nano fibras (NF) químicamente puras y estructuralmente homogéneas que crean una

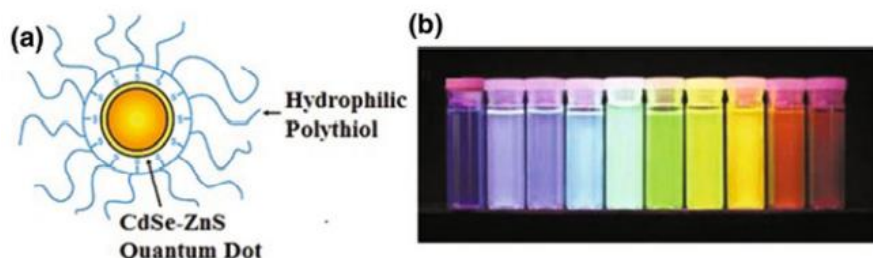
clase de nanoestructuras con un ancho de 30 a 300 nm, un grosor de 10 a 30 nm y una longitud en el orden de los milímetros, **figura (6)**.



**Figura (6)** Imagen SEM de la síntesis de nano fibras de CdS. (Li et al. 2014).

### 1.2.2 Seleniuro de cadmio (CdSe)

El seleniuro de cadmio (CdSe) es un material binario compuesto de cadmio y selenio que muestra una conductividad de tipo n y tiene una banda prohibida de 1.74 eV a temperatura ambiente. La masa molecular del CdSe es de 191.37 g/mol, y su apariencia es de un material de color rojo oscuro [33], puede tener estructuras tanto hexagonales como cúbicas. En la actualidad, en comparación con su presentación de manera burda o a granel, los nanomateriales de CdSe son uno de los compuestos semiconductores más atractivos para diversas aplicaciones modernas. Al igual que los otros CC, las propiedades eléctricas y ópticas de los nanomateriales de CdSe dependen del tamaño, y debido a su banda prohibida sintonizable juega un papel importante en los dispositivos que cubren todo el espectro de luz visible [34]. El recubrimiento de este compuesto binario con polímeros hidrofílicos les permite ser solubles en agua y proteger las propiedades fotofísicas del núcleo de CdSe asegurando dimensiones relativamente compactas, **figura (7)**. Cuando se sintetizan QDs de CdSe recubierto con otro material, este material caparazón ofrece los estados trampa de superficie, lo que aumenta la fluorescencia y hace que las nanoestructuras se apliquen en campos de etiquetado biológico y dispositivos emisores de emisión luz.



**Figura (7)** a) Diagrama esquemático de un QD de CdSe recubierto con polímero hidrofílico [35], b) Escala de emisión fluorescente de los QDs de CdSe recubiertos con ZnS [36].

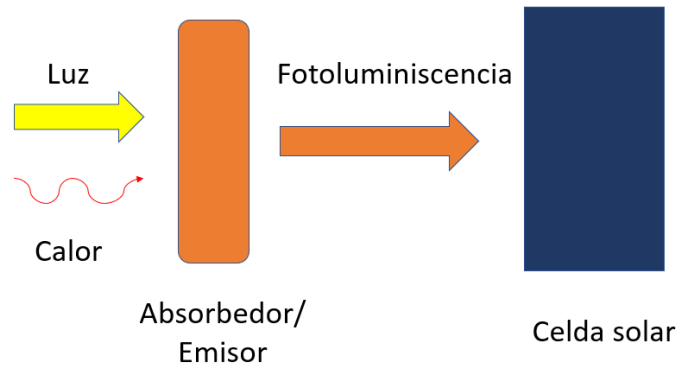
### 1.2.3 Telurio de cadmio (CdTe)

El telurio de cadmio (CdTe) es un elemento binario compuesto de cadmio y telurio. Es un semiconductor de banda prohibida directa con un ancho de 1.56 eV. Este compuesto de manera nanoestructurada tiene una banda prohibida en el rango de 1.5 y 2.1 eV. La conductividad térmica de estos nanomateriales los hace adecuados para su uso en aplicaciones termoeléctricas. El CdTe es un semiconductor que cubre una porción única del espectro solar y tiene un alto coeficiente de absorción que lo convierte en un material apropiado para su uso en dispositivos fotovoltaicos [37], diodos emisores de luz [38] y nanoportadores de fármacos [39]. El CdTe ha sido utilizado como material ventana para celdas solares de heterounión para evitar la recombinación de portadores fotogenerados, lo que en consecuencia mejora la eficiencia de las celdas [40]. En el área fotovoltaica, el CdTe se ha utilizado para fabricar celdas solares de con indio y cobre, el cual puede actuar como como capa ventana o capa activa o absorbidora dependiendo de la estructura del dispositivo o fotodetector [41]. Crisp et al. desarrollaron celdas solares tipo tándem de CdTe-PbS con una eficiencia de conversión de energía del 40 % [42]. Las capas absorbentes de CdTe y PbS se depositan en secuencia a través de una unión de túnel ZnTe-ZnO. En el campo de la medicina, los QD de CdTe se han utilizados en un dispositivo de detección para analizar el comienzo y el desarrollo de enfermedades [43].

### 1.3 Filtros foto luminiscentes de ensanchamiento térmico

La técnica de ensanchamiento térmico de fotoluminiscencia consiste en colocar en la parte frontal de la celda solar una capa de un material que absorba la parte del espectro de incidencia

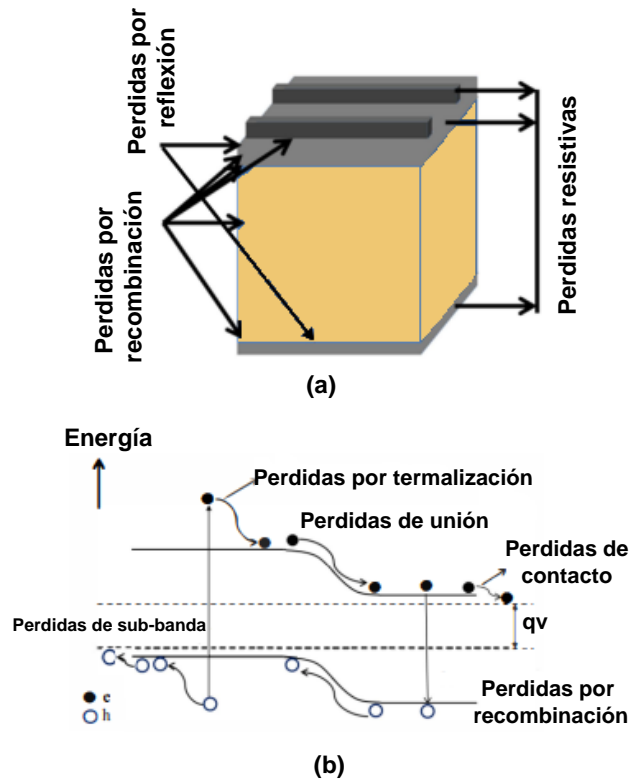
solar que más temperatura aporta (longitudes de onda menores a 500 nm) y las retransmita a longitudes de onda mayores de las de absorción (que aportan menor temperatura) reduciendo la temperatura de operación de la celda y aumentando la recolección de cargas, tal como se muestra en la **figura (8)**.



**Figura (8).** Ensanchamiento térmico de fotoluminiscencia.

En la literatura se encontró que se han propuesto diferentes esquemas y técnicas para mejorar la eficiencia de las celdas solares por encima del límite teórico del 30 % calculado por Shockley y Queisser para celdas convencionales [44]. La **figura (9)** muestra un esquema de las diferentes pérdidas en una celda solar causadas por reflexión, recombinación, pérdidas resistivas y pérdidas térmicas. La pérdida más común se debe a la absorción de fotones que tienen una energía mayor a la banda prohibida de la capa activa o material absorbedor, lo que conduce a la termalización de los portadores de carga. La termalización de los portadores de carga se puede evitar con la ayuda de materiales de conversión descendente (DC). Por otro lado, las causas de pérdida debidas a que el fotón tiene una energía menor que la banda prohibida de la capa activa o material absorbedor se pueden solucionar con la ayuda de materiales de conversión ascendente (CA), Trupke et al, realizó una evaluación teórica de estos esquemas en celdas solares de silicio, las eficiencias logradas son entre 38,6 y 47.7 % [45, 46] para ambos métodos (CDE y CA), respectivamente. Se ha reportado el uso de materiales como el Er<sup>3+</sup> como material de conversión ascendente, el cual presento un aumento en la respuesta espectral en el rango de longitud de onda de 1489-1580 nm para una celda solar bifacial. Xu et al., demostró una mejora significativa en la eficiencia de celdas solares al agregar un tinte fluorescente orgánico en el

electrolito líquido donde el fotón no absorbido pasa por un el proceso de conversión descendente [47]. Shpaisman et al., propuesto la combinación de conversión ascendente y generación de excitones múltiples (MEG) para mejorar la eficiencia de conversión de celdas solares de homounión hasta en un 49 % [48].

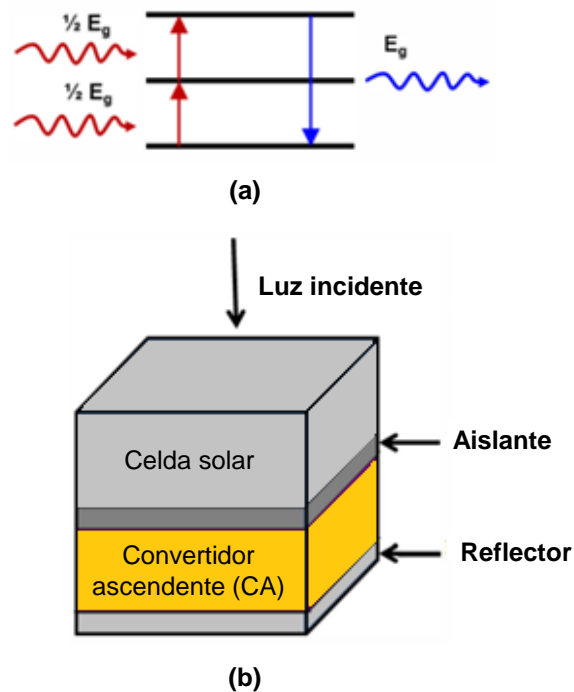


**Figura (9).** Diferentes pérdidas en una celda solar, (a) en el diagrama esquemático de la celda y (b) en el diagrama de bandas de la celda.

### 1.3.1 Conversión ascendente de longitud de onda

La conversión ascendente (CA) es un proceso óptico no lineal en el que al menos dos fotones de baja energía (región del infrarrojo cercano) se convierten en un fotón de alta energía (región visible) [49, 50]. La conversión CA es la más adecuada para las celdas solares que tienen una banda prohibida muy ancha. Los materiales y técnicas de CA son ampliamente utilizados en aplicación de captación de luz, tecnología de visualización, sensores de temperatura, iluminación de estado sólido, almacenamiento de datos ópticos y terapia médica. Los materiales de CA se pueden incorporar a celdas solares híbridas con películas delgadas y cristalinas. La **figura (10)** muestra el diagrama de energía y la estructura esquemática típica de una celda solar con

materiales de CA. El material de CA se coloca principalmente en la parte posterior de la celda solar para utilizar los fotones con energía mayor al ancho de la banda prohibida reduciendo las pérdidas de transmisión. El CA también se puede aplicar en ambos lados de las celdas solares bifaciales para mejora el rendimiento de estas. En 2009, Pan et al., utilizaron los dos convertidores CA y CD en ambos lados de una celda solar bifacial de Si y obtuvieron una mejora en la fotocorriente [51].



**Figura (10).** (a) Proceso de conversión ascendente; dos fotones con energía  $\frac{1}{2}E_g$  generan un fotón con energía  $E_g$ , donde  $E_g$  es la banda prohibida del material y (b) diagrama de una celda solar con el CA.

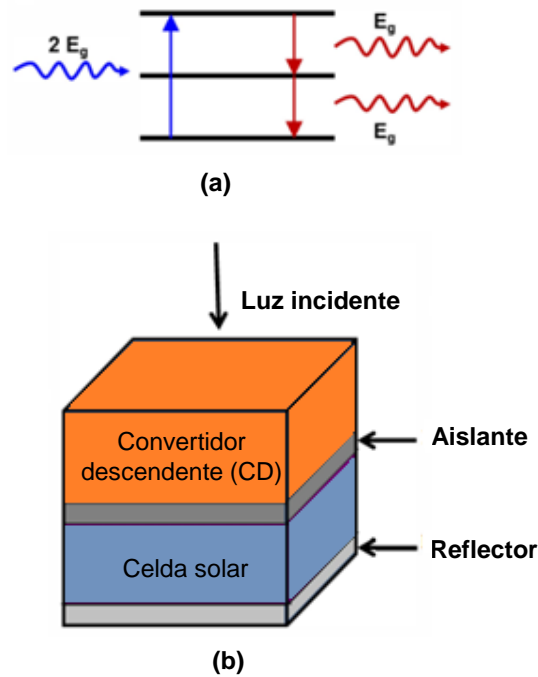
Por lo general, los materiales para CA se denominan fósforo dopado con iones de tierras raras [49]. Los materiales de CA para aplicaciones fotovoltaicas fueron propuestos en 1983 por Saxena [52]. Más tarde, en 1995, Gibart utilizó material de CA en celdas solares de GaAs y, desde entonces, se han realizado diversas investigaciones sobre estos materiales [53]. Las combinaciones que han sido utilizadas por diferentes grupos de investigación incluyen vitrocerámica dopada con  $Yb^{+3}$  y  $Er^{+3}$  [53],  $NaYF_4$  dopada con  $Er^{+3}$  [54],  $Gd_2(MoO_4)_3: Er^{+3}$  [55], PTIR545/F (tecnología de fósforo) e IRSPG (Maxmax) [51]. En los últimos años, la investigación relacionada con materiales para CA ha incrementado y se han aplicado en celdas solares

convencionales, celdas solares más avanzadas como DSSC (célula solar sensibilizada por colorante) y celdas solares orgánicas e híbridas. En 2010, Shan et al., utilizaron Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> codopado con LaF<sub>3</sub> y TiO<sub>2</sub> nano estructurado como CA [56]. En este estudio encontraron que estos materiales eran útil para recolectar fotones del infrarrojo cercano (NIR). Durante la revisión bibliográfica se encontró que los materiales para CA rara vez se han utilizado en aplicaciones solares orgánicas, donde pueden ser una herramienta importante para tratar las pérdidas por termalización, las pérdidas intrínsecas y la separación de carga. En 2011, Wang et al., reportaron la utilización de un convertidor CA en una celda solar P3HT: PCBM [49]. Utilizaron un huésped de fluoruro de itrio dopado con iterbio y erbio. Recientemente, Tamayo et al., utilizaron calcogenuros de cadmio como materiales de CA en celdas solares de Perovskite [57]. Reportaron una mejora significativa en la corriente fotoeléctrica de los dispositivos probados, lo que confirma que estos materiales tienen un potencial significativo para su uso en la mejora de la eficiencia de las células solares, independientemente de las tecnologías de celdas solares.

### 1.3.2 Conversión descendente de longitud de onda

La conversión descendente (DC) es un proceso en el que un fotón de alta energía se divide en fotones de baja energía. Diferentes autores han modelaron el límite de Shockley y Queisser que va del 30 al 40 % con la aplicación de materiales de CD en una celda solar. A este proceso también se le conoce como corte cuántico, donde un fotón de alta energía se corta en fotones de baja energía [58, 59]. Los materiales de CD son los más adecuados para las células solares que tienen banda prohibida muy angosta o pequeña. La **figura (11)** muestra el diagrama de energía y la estructura esquemática típica de una celda solar con materiales de CD. Los materiales de CD se aplican principalmente en la parte frontal de las celdas solares, mientras que la colocación del material de CD en la parte trasera requiere que la celda solar sea bifacial. Se ha reportado hasta el momento que con el proceso CD se puede lograr un 32 % más de radiación espectral para las celdas solares de Si. En 2005, Vergeer et al., publicaron la conversión descendente de fotones visibles en fotones del infrarrojo cercano (NIR) en (Y, Vb) PO<sub>4</sub> :Tb<sup>3+</sup> [60]. Liu et al. publicaron de una mejora del 2.,3 % en la eficiencia de DSSC con LaVO<sub>4</sub> dopado con Dy<sup>3+</sup> en comparación con la celda de referencia recubierta con una película de LaVO<sub>4</sub> sin dopar [61]. En 2010, Xu et al., publicaron una mejora significativa del 110.7 % en la densidad de corriente de cortocircuito de

DSSC con la aplicación de procesos de conversión descendente y la adición de colorante orgánico [47]. Algunos de los materiales de conversión descendente se pueden enumerar como  $Dy^{3+}$  -  $GdVO_4$  dopado [62],  $YF_3: Pr^{3+}, Yb^{3+}$  [63],  $LiGdF_4: Eu^{3+}$  [59] y  $LiGdF_4: (Er^{3+}, Tb^{3+})$  [64, 65]. Estos materiales son fáciles de sintetizar y brindan el control deseado sobre las propiedades del material.



**Figura (11).** (a) Proceso de conversión descendente; un fotón con energía  $2E_g$  genera dos fotones de energía  $E_g$  cada uno, y (b) diagrama esquemático de la celda con el CD.

#### 1.4 Aproximación de Wien para estimar la temperatura promedio de la radiación solar (AM1.5G) en incidencia directa.

La ley de Wien, o también llamada aproximación de Wilhelm Wien o ley de desplazamiento de Wien es una ley de la física utilizada para describir el espectro de radiación térmica de los objetos (a menudo llamada la función de cuerpo oscuro). Esta equivalencia tiene una alta correlación con la precisión de los fenómenos reales para longitudes de onda corta (de alta frecuencia) del espectro de emisión térmica de los objetos. Pero no describe con exactitud los datos experimentales para longitudes de onda larga (baja frecuencia) de emisión [66]. La ley de Wien está basada en resultados experimentales y deducciones termodinámicas realizadas por los físicos Josef Stefan y Ludwig Boltzman y está descrita por la **ecuación (6)**.

$$I(\lambda, T) = \left( \frac{2hc^2}{\lambda^5} \right) e^{-\left( \frac{hc}{\lambda kT} \right)} \quad (6)$$

donde  $I(\lambda, T)$  es la intensidad de radiación o densidad de potencia irradiada dada en  $W/m^2$ .  $I(\lambda, T)$  es dependiente de la longitud onda ( $\lambda$ ) de emisión y la temperatura absoluta ( $T$ ),  $h$  es la constante de Planck,  $k$  es la constante Boltzman y  $c$  es la velocidad de la luz. Una aproximación aceptada para conocer la temperatura absoluta promedio de un cuerpo si se conoce el espectro incidente es despejar  $T$  de la **ecuación (6)** para obtener la **ecuación (7)**.

$$T = - \frac{hc}{\lambda k * Ln \left[ \frac{\lambda^5 * I(\lambda)}{2hc^2} \right]} \quad (7)$$

### 1.5 Técnica de deposición por aspersión pirolítica.

La deposición por aspersión pirolítica (SPD) es una técnica simple y económica basada en el método de deposición de una capa delgada de material sobre la superficie de un sustrato rociando la solución. Esta técnica se utiliza para la deposición de películas delgadas mono o multicapa de alta densidad, espesor controlado y generalmente estructura porosa. Un aspecto especial de esta técnica es la preparación del material en forma de polvo poroso o denso formando granos ultrafinos. Esta técnica consiste básicamente en rociar la solución precursora sobre la superficie del sustrato previamente calentado. Para controlar la deposición, el proceso de crecimiento se lleva a cabo en una cámara aislada térmicamente y equipada con los componentes necesarios. En esta técnica, la solución inicial se prepara mezclando el material pulverizado con un disolvente. Las pequeñas gotas de solución se atomizan sobre el sustrato colocado en la cámara del atomizador donde la velocidad y la concentración de estas gotas definen la morfología y el tamaño de las películas depositadas. En este método, el tiempo de evaporación del solvente y el tiempo de difusión del soluto son importantes y definen la velocidad de depósito y la calidad de las capas crecidas. La composición final del material depositado puede controlarse mediante la composición de reactivos en la solución precursora, los parámetros de crecimiento y la dinámica de la reacción química. La temperatura juega un papel importante en la determinación de la densidad del material depositado. La influencia de

los parámetros de crecimiento en las propiedades del producto en forma de películas delgadas o polvo se puede encontrar en la literatura [67]. La deposición por aspersión pirolítica es relativamente económica, ecológica, escalable y puede ser apropiada para una gran variedad de sustratos.

El equipo requerido para SPD comprende un precursor en forma de solución, un soporte de sustrato, un calentador eléctrico, un controlador de temperatura, un sistema de enfriamiento, filtro colector, una boquilla de pulverización o atomizador y una cámara con aislamiento térmico [68]. Si se tiene la opción de ajustar la apertura de la punta de la boquilla de aspersión se puede controlar el tamaño de partícula del producto, lo que le da a esta técnica el carácter de idónea para el crecimiento de nano-partículas. La tasa de deposición y la calidad del producto dependen en gran medida de los procesos, equipos y parámetros de crecimiento. Sin embargo, comúnmente se utilizan atomizadores de aire, ultrasonidos y electrostáticos. El diagrama esquemático que muestra el proceso de pirólisis por pulverización se observa en la **figura (12)**.

Durante los últimos años, utilizando esta técnica se han depositado sobre sustratos de vidrio recubierto con FTO [69] películas delgadas de CdS nano-cristalino. Dichas películas se depositaron a diferentes temperaturas (275, 300, 325 y 350 ° C) con el objetivo de estudiar los efectos de la temperatura del sustrato en la calidad de las películas depositadas. Las películas depositadas eran estequiométricas, de naturaleza policristalina, con estructura hexagonal y contenían granos esféricos desiguales distribuidos uniformemente y de aproximadamente 120 nm. Las películas depositadas a 300 °C eran semiconductoras de tipo n con un ancho de banda prohibida de 2.44 eV. Los materiales depositados se encontraron adecuados para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos. De manera similar, se ha utilizado la técnica SPD para depositar y estudiar películas delgadas de nano-cristales de CdS puros y dopados con Al sobre sustratos de vidrio [70]. Los resultados mostraron que no hubo cambios considerables en la morfología de las películas delgadas de CdS después del dopaje con Al. Se observó que el dopaje aumenta la concentración de portadores y reduce la conductividad eléctrica. Se describieron las variaciones en el tamaño de grano, la conductividad eléctrica, la movilidad de portadores y la concentración de portadores con un aumento en la concentración de dopaje de Al.

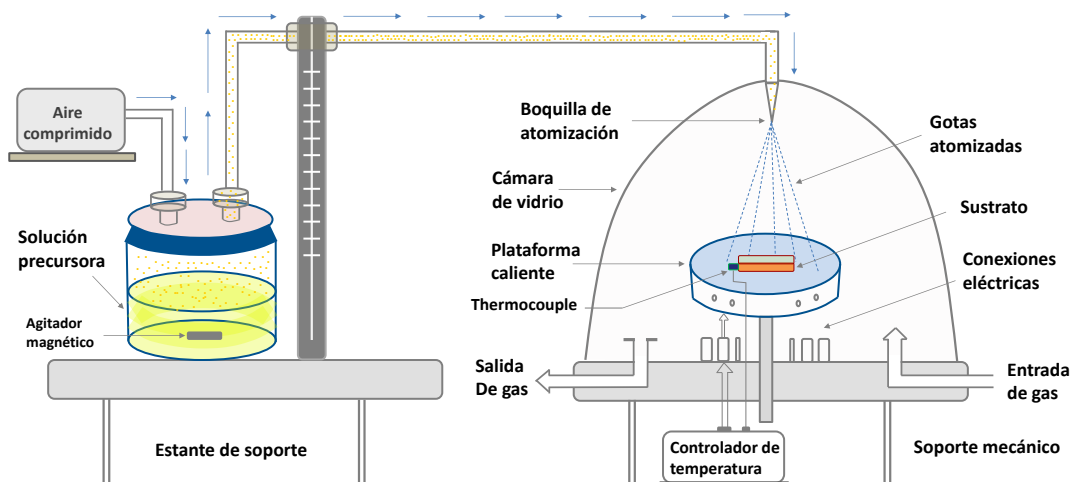


Figura (12). Diagrama esquemático de un sistema de aspersión pirolítica.

En la literatura revisada, se encontraron trabajos que reportan los efectos del dopaje en las propiedades de las partículas de CdS depositadas por SPD. Su et al., reportaron la preparación de películas de CdS dopadas con Cu [71]. Se encontró que el tamaño de grano de las películas depende de la concentración de nitrato metálico en la solución precursora. Se observó que el tamaño del grano disminuye constantemente con el aumento de la concentración de dopaje de Cu. Se observó que el ancho de la banda prohibida del Cd aumentaba después del dopaje con Cu, lo cual se atribuyó al llenado de vacantes intrínsecas que mejoran la cristalinidad del compuesto. Dado que la técnica de deposición SPD está basada en soluciones químicas, la naturaleza de las soluciones juega un papel importante en la determinación de la calidad de los materiales depositados. Recientemente, Kerimova y colaboradores prepararon películas nano-cristalinas de CdS utilizando la técnica SPD con diferentes valores de pH de la solución a depositar [72]. Las películas depositadas a valores de pH de 6.7 y 9.5 eran de estructura cristalina de wurtzita, mientras que las películas cultivadas a un valor de pH de 10.2 eran casi amorfas. En base a las caracterizaciones estructurales y ópticas realizadas, se concluyó que la cristalinidad y el tamaño de grano de las películas depositadas disminuyen con el aumento del valor de pH de la solución utilizada.

Recientemente, se llevó a cabo un estudio de preparación de nano-cristales de CdS utilizando la técnica SPD a temperaturas de sustrato variables [73]. Se encontró una gran dependencia de la tasa de deposición con la temperatura del sustrato. Se observó que el espesor de las películas

depositada disminuye constantemente con el aumento de la temperatura del sustrato. Este hallazgo se interpretó teniendo en cuenta el tamaño de la gota cuando alcanza la superficie del sustrato. El tamaño de la gota que alcanza el sustrato es inversamente proporcional a la temperatura del sustrato. Además, se encontró que el tamaño del cristal es directamente proporcional a la temperatura del sustrato. A temperaturas de sustrato más altas, los granos de las películas se convirtieron en grupos muy densos de grano. La medición de las propiedades ópticas reveló el aumento en el ancho de la banda prohibida con el aumento en la temperatura del sustrato. También se han estudiado los efectos de los parámetros de deposición sobre la calidad de las películas de CdSe depositadas por PSD. Yadav y colaboradores depositaron películas de nano-granos de CdSe utilizando la técnica PSD a diferentes temperaturas [74]. Se observó que la cristalinidad de las películas depositadas disminuía con el aumento de la temperatura hasta 300 ° C. Las películas depositadas tenían una cobertura densa y uniforme de nano-granos sin grietas. Las propiedades ópticas y eléctricas de las películas se encontraron ser dependientes de la temperatura del sustrato.

La técnica SPD también se ha utilizado para depositar  $\text{Cd}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{Se}$  nano-cristales en sustratos de vidrio [75]. Se encontró que las películas depositadas eran porosas, de estructura hexagonal y contienen granos en forma de nano-tubos y nano-discos distribuidos de manera uniforme y densa. Se encontró que las propiedades de las películas depositadas dependen de la cantidad de solución utilizada para la pulverización. Los granos en forma de nano-cables se obtuvieron para una solución de 15 ml, mientras que la forma de los granos se transformó en nano-discos con un aumento en la cantidad de solución. El espesor de la película y el ancho de la banda prohibida disminuyeron mientras que el tamaño del grano en las películas aumentó con el aumento de la cantidad de solución. Esta técnica también se ha utilizado para la deposición de películas delgadas nano-cristalinas de CdTe para diferentes propósitos. Nikale y colaboradores reportaron la preparación por SPD de películas de CdTe tipo p con granos nano-cristalinos para aplicaciones foto-electroquímicas [76]. Las películas fueron depositadas en vidrio recubierto con FTO bajo diferentes condiciones, incluida la temperatura del sustrato, así como el pH, la concentración y la cantidad de la solución. Se descubrió que la calidad cristalina de las películas aumenta con el aumento de la concentración de la solución, lo que demuestra la dependencia de la tasa de

crecimiento de la concentración. El tamaño del grano aumentó con la concentración en solución hasta un valor de 10 ml, después de lo cual se redujo el tamaño. Adicionalmente, el tamaño del grano mostro clara dependencia de la temperatura del sustrato y se observó el tamaño más pequeño ha temperatura de 250 ° C. Con el fin de investigar el rendimiento foto-electroquímico, la película se preparó usando el CdTe tipo p. Se observó que los valores de corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto de la celda aumentan con el aumenta del pH hasta un valor de 10.5, después de lo cual estos valores disminuyen. Las películas nano-cristalinas de CdTe se depositaron sobre vidrio utilizando la técnica SPD y nitrógeno como gas portador [77]. El tamaño promedio de las películas cristalinas fue de 32 nm con una orientación cristalina de [3 1 1] y [5 1 1]. El ancho de la banda prohibida medido para las películas fue de 1,44 eV con naturaleza directa, mientras que el valor máximo de absorbancia fue de 0.94. La naturaleza de las películas depositada era un semiconductor de tipo p que tenía una resistividad de aproximadamente 2.228  $\Omega$ /cm. Los autores encontraron que el método SPD es una ruta simple y de bajo costo para la deposición de películas de telurio de cadmio.

Películas de nano-cristalina de CdO se ha depositado sobre vidrio utilizando SPD y se ha caracterizado con mediciones ópticas [78]. Las películas depositadas eran policristalinas con un tamaño medio de grano de 24.4 nm y un ancho de la banda prohibida directa de 3.46 eV. También se ha reportado la preparación de películas de CdO nano-cristalinas utilizando la técnica SPD. Bari y colaboradores estudiaron los efectos del tiempo de deposición en la calidad de los nano-cristales de CdO depositados con SPD en sustrato de vidrio [79]. Los autores observaron un aumento en el tamaño del cristalito y el grosor de la película cuando aumentaba el tiempo de deposición durante el proceso de crecimiento. Señala que la calidad cristalina de las películas crecidas es proporcional al tiempo de deposición. Las películas depositadas también se probaron para determinar las propiedades eléctricas y la detección de varios gases. La respuesta de detección de gas en el caso de los gases LPG y CO<sub>2</sub> se encontró más alta que otros gases, incluyendo H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, NO y H<sub>2</sub>S. El mismo grupo reporto otro trabajo realizado utilizando la técnica SPD para la deposición de nano-estructuras de CdO dopadas con Zn para desarrollar un sensor para gas LPG [80]. Las películas depositadas contenían granos mixtos de formas esféricas y cúbicas cuyo tamaño aumentaba con el aumento de la concentración de dopaje de Zn. El

espectro óptica de las películas dopadas mostró una tendencia constante de aumento a medida que la concentración de dopaje aumentaba. Basándose en los resultados obtenidos en la detección de gases, los autores reportaron que el nano-material de Zn:CdO con una concentración de dopaje del 5% es el mejor sensor para gas LPG.

SPD es una técnica tan simple capaz de producir películas adecuadas para dispositivos y otras aplicaciones, pero la revisión bibliográfica muestra un número significativo de artículos de investigación sobre la preparación de nano-materiales que contienen Cd utilizando esta técnica. Los parámetros de crecimiento relacionados con la deposición de nano-materiales de CdS, CdSe, CdTe y CdO utilizados por diferentes trabajadores se muestra en la Tabla (4).

**Tabla (4)** Parámetros de deposición utilizados para preparar películas de Cd utilizando SPD

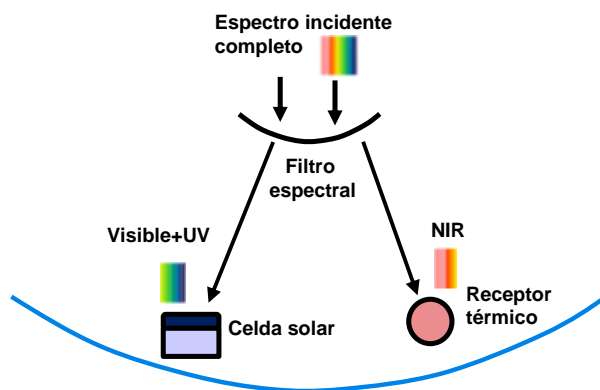
Material depositado	Sustrato	Temperatura del sustrato °C	Precursor	Taza de aspersion ml/min	Referencia
CdS NCs	Vidrio-ITO	400	CdCl <sub>2</sub> ·2.5H <sub>2</sub> O,	2.5	Hiie et al. 2006, [99]
CdS NCs	Vidrio-ITO	275, 300, 325 and 350	CdCl <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	3	Yadav et al. (2010a) [69]
CdS NCs	Vidrio	300	Cd(COOCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	Rubel et al. (2011) [70]
CdS NCs	Vidrio	250	CdCl <sub>2</sub> /Thiourea	3	Marathe (2011) [100]
CdS/Pb NCs	Vidrio	400	CdCl <sub>2</sub> /(SC(NH)) <sub>2</sub>	-	Anbarasi et al. (2016) [101]
CdS NCs	Vidrio	400	CdAC <sub>2</sub> , (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CS	-	Kerimova et al. (2017) [72]
CdSe NCs	Vidrio	275, 300, 325 and 350	CdCl <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	3	Yadav et al. (2010b)[74]
Cd <sub>0.5</sub> Fe <sub>0.5</sub> Se NCs	Vidrio	573	CdCl <sub>2</sub> , SeO <sub>2</sub>	6	Ibrahim and Ubale (2014) [75]
p-CdTe NCs	Vidrio	225 - 300	CdCl <sub>2</sub> ·Te <sub>2</sub> O	1.5	Nikale et al. (2011) [76]
p-CdTe NCs	Vidrio	350	CdCl <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	5	Gunjal (2014) [77]
CdO NCs	Vidrio	300	(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> Cd	7	Bari and Patil (2014) [79]
Zn:CdO	Vidrio	300	Cd acetate	7	Bari et al. (2016) [80]

## Capítulo 2

### Planteamiento del problema

#### 2.1 Justificación del problema

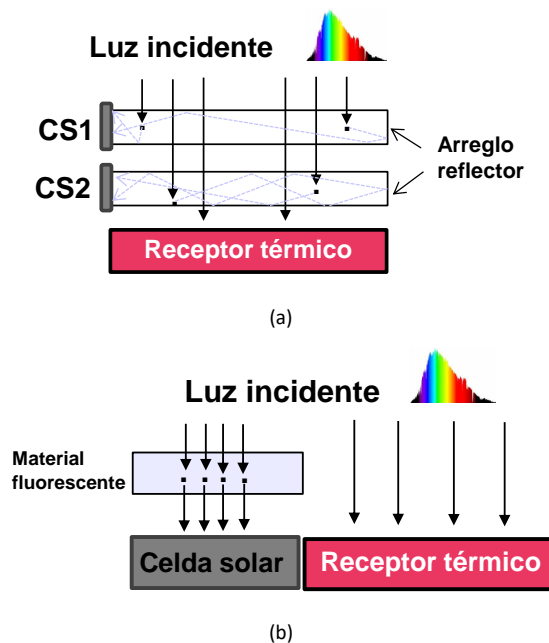
Los aumentos en la temperatura de operación de las celdas solares reducen la eficiencia de conversión eléctrica, la potencia de salida [81 – 83] y la expectativa de vida [84, 85]. Para minimizar los efectos negativos en las celdas solares provocados por el incremento en la temperatura de operación se han propuesto diferentes métodos y tecnologías. Los dos métodos más utilizados son la recuperación de calor residual (WHR) y la división espectral de la luz incidente (SBS). En un sistema WHR, la celda solar es montada encima de un enfriador térmico, que puede ser un tubo por el cual circula un fluido frío. El enfriador térmico absorbe el calor generado por la celda solar trabajando como un sistema de enfriamiento [86]. En un sistema SBS, se utiliza un filtro espectral para separar el espectro de radiación solar entrante. Las longitudes de onda de la luz solar incidente con menor carga térmica son dirigidas a la celda solar para la producción de electricidad, y las longitudes de onda con mayor carga térmica, por ejemplo, el espectro infrarrojo cercano (NIR), se desvían de la celda solar, como se muestra en la **figura (13)** [87]. Según Imenes y Mills [88], las tecnologías SBS se pueden clasificar en base a la técnica de división del espectro, por ejemplo, filtrado absorbente-refractivo, filtrado transmisivo-reflexivo, filtrado holográfico y filtrado luminiscente.



**Figura (13).** Esquema de un sistema de división espectral de la luz incidente (SBS).

En el caso del filtrado fotoluminiscente, se coloca un material fluorescente dentro de una placa concentradora transparente plana para absorber la luz solar dentro de un rango de frecuencia  $f_1$  y retransmitirla dentro de un rango de frecuencia  $f_2$ . Para la implementación de este esquema, se han explorado dos métodos. En el primero método, la luz de fluorescencia queda atrapada dentro de un

concentrador debido a la reflexión interna total y es guiada hacia los bordes de la placa, donde puede convertirse en calor o electricidades mediante absorbentes térmicos o celdas solares, como se muestra en la **figura (14a)** [89]. En el segundo método, la luz de fotoluminiscencia del material fluorescente se desvía hacia las celdas solares para la generación de energía eléctrica, como se muestra en la **figura (14b)** [90]. Sin embargo, para estos métodos de enfriamiento, los efectos en las celdas solares debidos a la mitigación de los incrementos de temperatura aún no se han reportado de manera sistemática y exhaustiva. Por lo tanto, cualquier estudio que se centre en los efectos positivos o negativos de la mitigación de los incrementos de temperatura en las celdas solares es beneficioso comunidad dedicada a este giro.

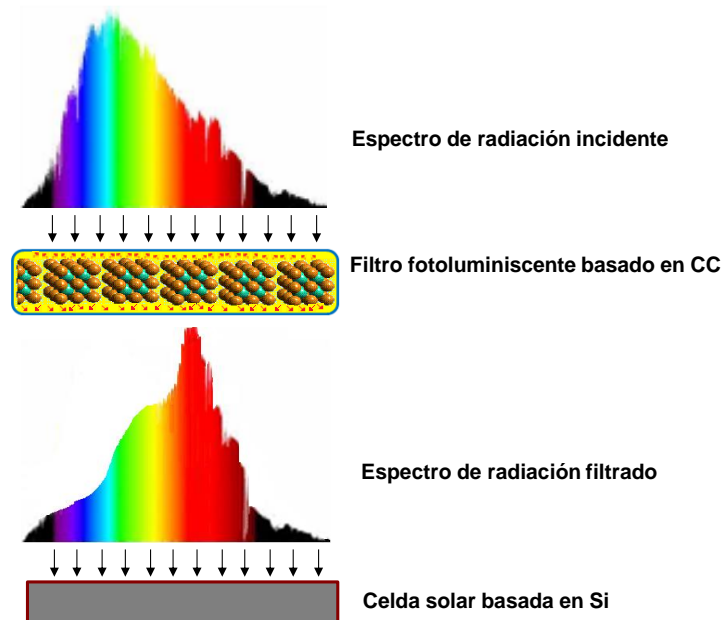


**Figura (14).** Esquema de un sistema de filtrado fotoluminiscente, (a) la luz es guiada hacia las CS, (b) la luz es desviada hacia las CS.

Por otro lado, en la última década, la comunidad científica dedicada al desarrollo de celdas solares ha centrado su atención en el desarrollo de aplicaciones de semiconductores basados en calcogenuros de cadmio. Esta atención se debe a las propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas, químicas y físicas que son únicas en estos materiales. Por ejemplo, el coeficiente de extinción y las longitudes de onda efectivas de absorción y emisión de fotones se pueden ajustar desde longitudes de onda del rango visible hasta el NIR controlando su tamaño, forma y composición de las partículas [91 - 94]. Por ejemplo, el CdS es un semiconductor binario de los grupos II-VI con una banda prohibida ( $E_g$ ) de 2.42 eV [95]. El CdS se está estudiando en

varios campos y aplicaciones, tales como emisión láser, fotoluminiscencia (PL), fotocátalisis y celdas solares [96, 97]. Aunque el CdS se ha utilizado en varias aplicaciones prácticas, pocas referencias presentan su potencial en el filtrado espectral para sistemas SBS. Por lo tanto, en este trabajo de tesis, para reducir el efecto del incremento térmico en celdas solares basadas en silicio causado por el espectro de luz incidente e incrementar la eficiencia de conversión de las celdas, se propone estudiar y utilizar compuestos binarios CC como filtros fotoluminiscentes que absorban la energía de longitudes de onda que la celda absorba débilmente y que a su vez aumentan la temperatura de la celda y la retransmitan en longitudes de onda que si sean absorbida fuertemente por la celda.

Los materiales binarios CC se depositarán en el vidrio frontal de celdas basadas en silicio para obtener filtros fotoluminiscentes [FL]. La **figura (15)** muestra el sistema solar FL-Celda Solar propuesto. El sistema propuesto consta de un FL basado en CC depositado en el parte frontal seguido de una celda solar basada en silicio. El filtro FL basado en CC absorberá parte del espectro de luz solar incidente (parte del UV y parte del rango visible) evitando que este espectro incida en las celda solar y lo retransmitirá en el rango visible aumentando la absorción de fotones de la celda. La funcionalidad mencionada anteriormente del FL reduce la radiación UV que es más energética pero menos absorbida por las celdas solares y la retransmite en el rango visible que es menos energética pero más fácilmente absorbida por las celdas solares basadas en silicio



**Figura (15).** Sistema solar FL-Celda Solar propuesto.

## 2.2 Objetivos

### 2.2.1 Objetivo general

Debido a las temperaturas a las cuales las celdas solares son expuestas en aplicaciones prácticas, que van desde 15 °C hasta más de 50 °C, sus parámetros de desempeño (corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y eficiencia de conversión (PCE)) se ven fuertemente afectados. En especial para celdas solares basadas en silicio se ha reportado que si la temperatura de operación de la celda supera los 270 °C el porcentaje de PCE cae a cero. Para reducir el efecto causado por la temperatura en celdas solares y aumentar los niveles de recolección de energía eléctrica, en este trabajo de tesis se plantea un objetivo general con dos vertientes, la primera diseñar teóricamente filtros foto-luminiscentes (FL) de longitud de onda descendente basados en calcogenuros de cadmio (CC) que sean capaces de absorber del espectro incidente estándar AM1.5 la parte que más energía térmica aporta (parte del rango ultravioleta) y la retransmita en el rango visible, que es el espectro que mejor absorbe las celdas basadas en silicio. En segunda instancia caracterizar los cambios en los parámetros de desempeño  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  y PCE de celdas solares basadas en silicio, debidos a la implementación, sobre el vidrio frontal de la celda, de los filtros FL de longitud de onda descendente diseñados en la primera vertiente.

### 2.2.2 Objetivos específicos

Para el logro del objetivo general de este trabajo de tesis se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Estudiar los perfiles de absorbanza y fotoluminiscencia de los compuestos binarios basados en calcogenuros de cadmio (CC) CdS, CdSe y CdTe para identificar la fiabilidad de utilizarlos como filtros foto-luminiscentes (FL) de longitud de onda descendente.
2. Utilizar la técnica de la matriz lineal de transferencia óptica, así como las ecuaciones básicas para análisis de uniones pn, para caracterizar teóricamente los parámetros de desempeño ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  y PCE) de celdas solares basadas en silicio sin y con filtros (FL) de longitud de onda descendente basados en CC.
3. Utilizar la técnica de aspersión pirolítica para implementar prácticamente filtros FL de longitud de onda descendente de CdS, CdSe y CdTe en el vidrio frontal de celdas solares basadas en silicio.

4. Caracterizar prácticamente, utilizando como fuente de radiación lumínica una lámpara de emisión del estándar AM1.5G, el desempeño de las celdas solares basadas en silicio sin y con filtros FL de longitud de onda ascendente basados en CC, mediante la medición de la curva de densidad de corriente vs voltaje (JV), el  $V_{oc}$ , la  $J_{sc}$ , la  $R_{MaxPot}$ , el filtro FL y la PCE.
5. Comparar los resultados obtenidos de la caracterización teórica con los resultados obtenidos de la caracterización realizada a partir de mediciones prácticas de las celdas solares de silicio sin y con los filtros FL.

### 2.3 Hipótesis

La hipótesis de este trabajo de tesis tiene las siguientes dos vertientes. La primera, utilizando la técnica de la matriz lineal de transferencia óptica y las ecuaciones básicas para caracterizar el desempeño de dispositivos de unión pn, se puede estudiar teóricamente los efectos en la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la eficiencia de conversión ( $\eta$ ) en celdas solares de silicio causados por la colocación de filtros luminiscentes basados en CC en la parte frontal de las celdas. La segunda vertiente, utilizando la técnica de aspersion pirolítica se pueden depositar filtros fotoluminiscentes de CC en la parte frontal de las celdas que sirvan para caracterizar de manera práctica los efectos mencionados en la primera vertiente.

# Capítulo 3

## DISEÑO TEÓRICO

### 3.1 Estimación del perfil de absorbanza de los calcogenuros de cadmio (CdS, CdSe, CdTe, CdTe<sub>0.4</sub>Se<sub>0.6</sub>)

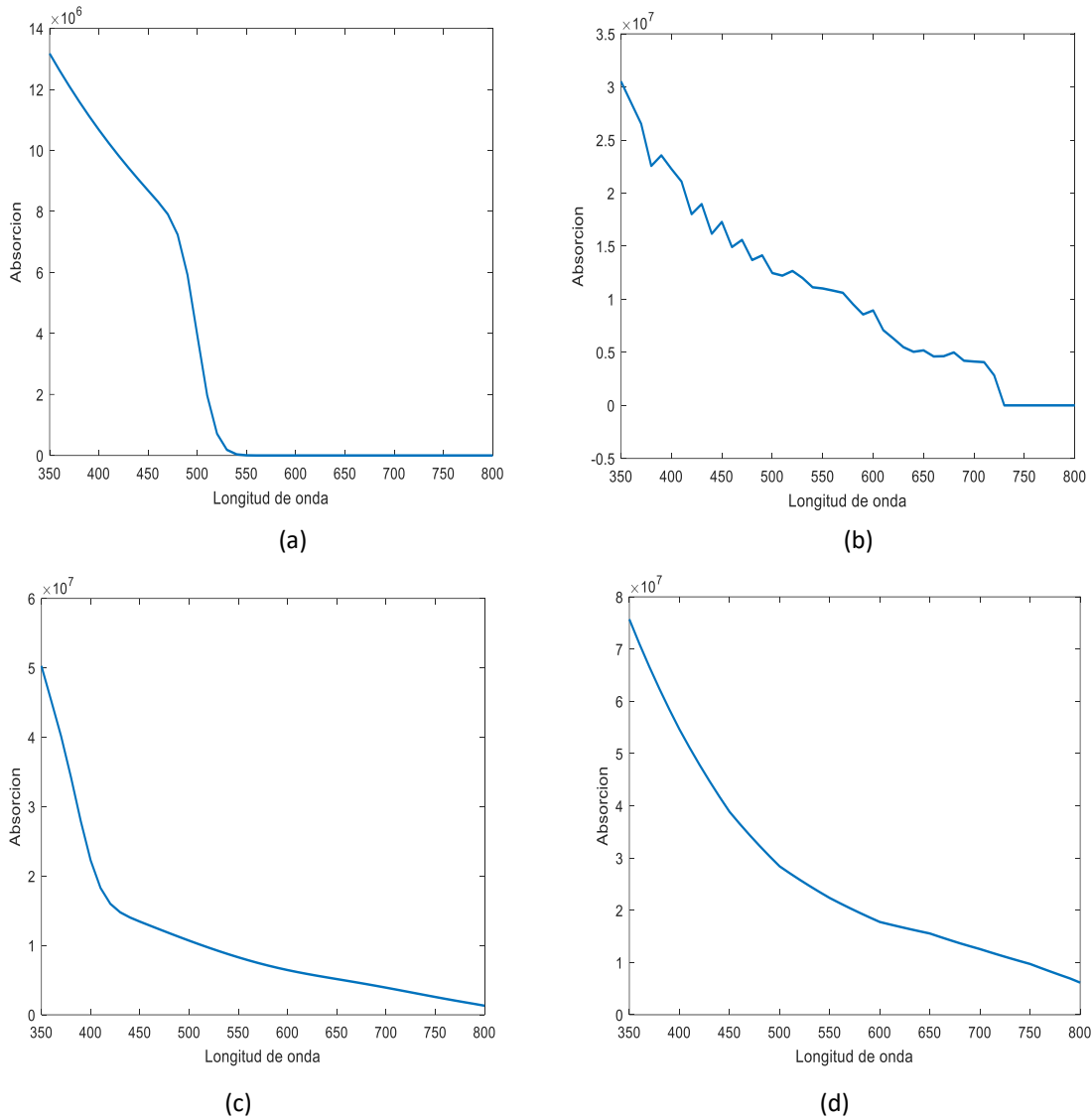
Uno de los puntos más importantes para el diseño de dispositivos de ensanchamiento térmico para módulos fotovoltaicos o celda solares es la selección del material que se utilizara para hacer la conversión ascendente o descendente de longitud de onda. Debido a que en este trabajo de tesis se utilizan celdas solares de Silicio, el cual absorbe mayoritariamente el espectro visible, se desea que el material seleccionado absorba la energía proveniente en las longitudes de onda menores a 400nm (Ultravioleta) que son las que aporta fotones con mayor energía pero son las menos absorbidas por el Si y la retransmita en las longitudes entre 500 a 700 nm (Espectro visible) que es donde el Si tiene mayor absorbanza. Por lo tanto, utilizando la **ecuación (5) [98]**, se estimaron de manera teórica los perfiles de los coeficientes de absorción vs energía del fotón de los CC binarios CdS, CdSe, CdTe y del ternario CdSe<sub>0.4</sub>Te<sub>0.6</sub>.

$$\alpha(\lambda) = 4\pi * \frac{k_j(\lambda)}{\lambda} \quad (5)$$

donde  $k_j(\lambda)$  es el coeficiente de extinción del material que depende de la longitud de onda  $\lambda$ .

Para la estimación teórica de los perfiles de los coeficientes de absorción vs energía del fotón se desarrolló un programa en Matlab que considera el rango de longitudes de onda de 350 a 800 nm el cual abarca la parte central del rango de luz incidente solar. Los  $k_j(\lambda)$  utilizados para cada CC y cada longitud de onda se muestran en el **anexo I** y fueron obtenidos de la base datos especificada en dicho anexo. La **figura (16)** muestra los perfiles obtenidos para cada CC. De manera específica la **figura (16a)** muestra el perfil para el CdS el cual tiene una alta absorbanza para longitudes de onda menores a 500 nm y una caída a cero relativamente abrupta entre 500 y 520 nm. Para el caso del CdSe mostrado en la **figura (16b)** se puede observar que tienen alta absorbanza para longitudes menores a 500 nm pero su caída en longitudes de onda mayores es lenta y va más allá de los 750 nm. La **figura (16c)** muestra el perfil para el CdTe el cual tiene una alta absorbanza para longitudes de onda menores a 400 nm con una caída lenta que se extiende hasta longitudes de onda mayores a 800 nm. Para el caso del CdSe<sub>0.4</sub>Te<sub>0.6</sub> mostrado en la **figura**

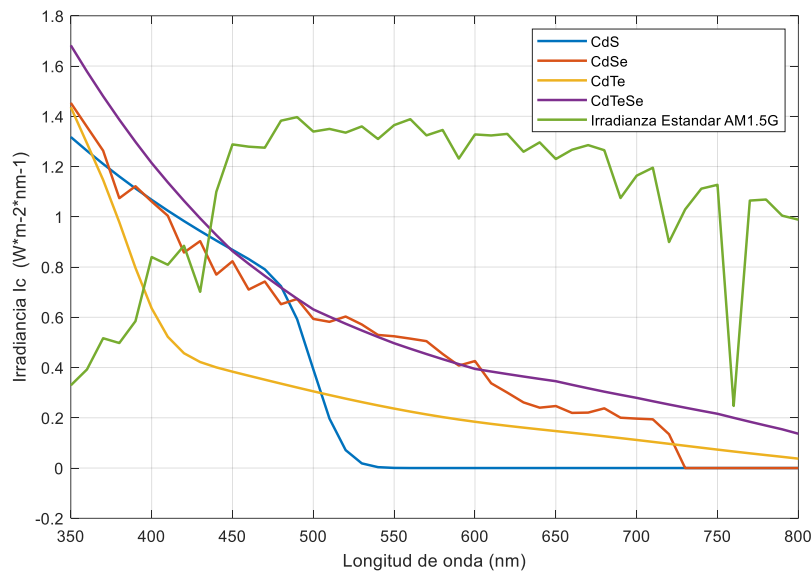
(16d) se puede observar que tiene alta absorbancia para longitudes menores a 500 nm pero su caída en longitudes de onda mayores es más lenta que el resto de los CC y se extiende hasta longitudes de onda mayores a los 800 nm.



**Figura (16).** Perfil del coeficiente de absorción vs energía del fotón, (a) CdS, (b) CdSe, (c) CdTe y (d) CdSe<sub>0.4</sub>Te<sub>0.6</sub> para las longitudes de onda de 350 nm a 800nm.

En la **figura (17)** se muestra una comparación de los perfiles de los coeficientes de absorción vs energía del fotón de cada CC con el estándar de irradiación solar AM1.5G. En los perfiles mostrados en la **figura (17)** se puede observar que los cuatro CC tienen alta absorbancia por debajo de los 400 nm, sin embargo el CdS muestra una caída a cero relativamente abrupta entre 500 y 520 nm. Esta caída abrupta en absorbancia que muestra el CdS lo convierte en el

mejor candidato para el propósito de este trabajo de tesis. Esto es debido a que se busca un material que preferente o únicamente absorba la energía de las longitudes de onda menores a 450 nm y la retransmita en longitudes de onda entre 500 y 700 nm. Sin embargo, para hacer la selección definitiva del material más adecuado también se requiere estimar el perfil de fotoluminiscencia del CdS debido a que dicho perfil muestra el rango de longitudes de onda donde retransmite la energía absorbida. En el siguiente apartado se realiza la estimación de dicho perfil para confirmar si se encuentra en el rango de longitudes de onda deseado.



**Figura (17).** Comparación de los perfiles de los coeficientes de absorción vs energía del fotón de cada CC (CdS, CdSe, CdTe y CdSe<sub>0.4</sub>Te<sub>0.6</sub>) con el estándar de irradiación solar AM1.5G.

### 3.2 Estimación del perfil de fotoluminiscencia del filtro CdS

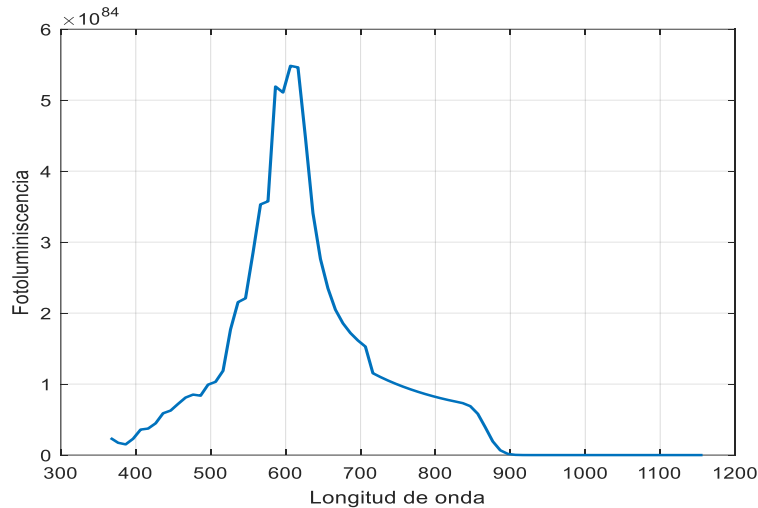
Para estimar el perfil de fotoluminiscencia del CdS se utilizó la relación de van Roosbroeck Shockley [98]. Esta relación se muestra en la **ecuación (6)** y relaciona la fotoluminiscencia con el coeficiente de absorción del material. En esta ecuación  $n$  es el índice de refracción del material el cual es dependiente de  $\lambda$ ,  $\hbar\omega = E_c - E_v$  es la energía de transición entre bandas donde  $E_c$  y  $E_v$  son la frontera de la banda de conducción y de la banda de valencia respectivamente,  $\hbar$  es la constante de Planck testada,  $c$  es la velocidad de la luz,  $\alpha(\hbar\omega)$  es el coeficiente de absorción y  $k_j$  el coeficiente de extinción del material. Los parámetros  $f_c$  y  $f_v$  se estiman utilizando las **ecuaciones (7)** y **(8)** respectivamente.  $E_f^c$  el nivel cuasi Fermi en la banda de conducción,  $E_f^v$  el nivel cuasi Fermi en la banda de valencia,  $K_B$  la constante de Boltzman y  $T$  la temperatura en  $K$ .

$$\mathfrak{J}(\hbar\omega) = \frac{n^2[\hbar\omega]^2}{\pi^2\hbar^3c^2} \alpha(\hbar\omega) \frac{f_c(1-f_v)}{f_v-f_c} \quad (6)$$

$$f_c = \left[ e^{\frac{E_c - E_{f^c}}{k_B T}} + 1 \right]^{-1} \quad (7)$$

$$(1 - f_v) = \left[ e^{\frac{E_{f^v} - E_v}{k_B T}} + 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

La **figura (18)** muestra el perfil de fotoluminiscencia obtenido para el CdS. En este perfil se observa una distribución de fotoluminiscencia gaussiana que inicia de manera débil en los 400 nm y va aumentando hasta alcanzar un máximo alrededor de los 610 nm, posteriormente empieza a disminuir extendiéndose hasta 900 nm. Este perfil de fotoluminiscencia satisface el requerimiento planteado en este trabajo de tesis. Esto es debido a que este perfil demuestra que el CdS retransmite en el espectro entre 500 y 700 nm la energía absorbida de longitudes de onda por debajo de los 400 nm.

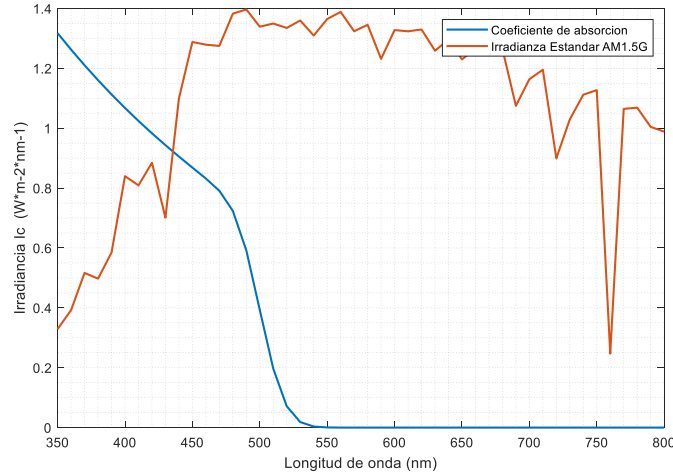


**Figura (18).** Perfil de fotoluminiscencia obtenido para el CC binario CdS.

### 3.3 Espectro incidente en la celda solar con filtro CdS.

Antes de estimar el efecto que el filtro fotoluminiscente (FL) genera en el rendimiento de la celda solar se requiere conocer la modificación que este provoca al espectro de radiación solar incidente (estándar AM1.5G). Para obtener la modificación que el filtro FL provoca al espectro de radiación solar incidente se debe retirar para cada longitud de onda de dicho espectro (de manera proporcional) la radiación absorbida por el filtro y agregar para cada longitud de onda la radiación

emitida por el filtro. La **figura (19)** muestra el perfil de absorbancia del CdS sobrepuesto en el perfil de radiación del estándar AM1.5G. De esta figura se puede observar que el CdS absorbe el 100% de la radiación proveniente en las longitudes de onda de 350 hasta 448 nm y de ahí en adelante absorbe de manera proporcional hasta 530 nm. La **tabla (5)** muestra para las longitudes de onda de 450 a 540 nm con incrementos de diez en diez la relación fraccional de la radiación absorbida por el material CdS. En la primera columna se muestra la longitud onda, en la segunda y tercera columnas se muestran el porcentaje absorbido (fracción) y el porcentaje no absorbido (1-Fracción), ambos normalizados a uno. En la columna cuatro [Irradiación (W/m<sup>2</sup>)] se muestran la irradiación incidente (AM1.5G), en la cinco la irradiación no absorbida o remanente, esta columna se calcula multiplicando la columna tres por columna cuatro. En las columnas seis y siete se muestra la temperatura promedio retirada por el filtro FL en grados Kelvin y centígrados, respectivamente. Para estimar esta temperatura se utilizó la columna cinco y la **ecuación (7)** que representa la temperatura absoluta promedio de un cuerpo si se conoce la radiación del espectro de incidencia (ley de Wien).



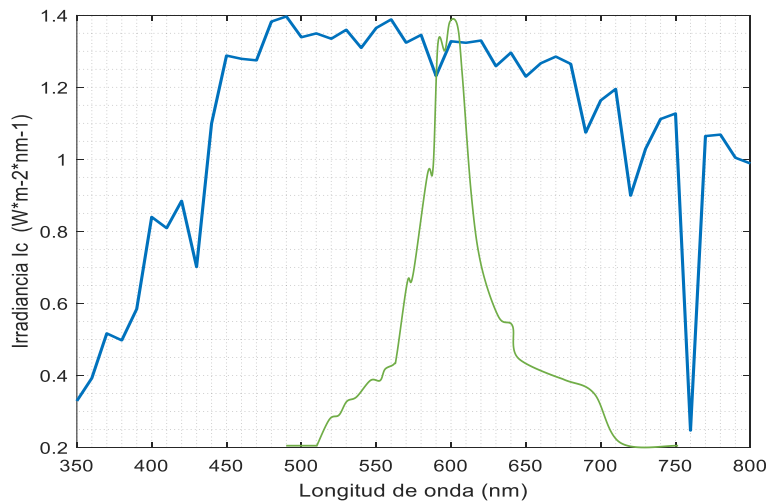
**Figura (19).** Perfil absorbancia del CdS sobrepuesto en el perfil de radiación del estándar AM1.5G.

**Tabla (5).** Relación fraccional de la radiación absorbida por el material CdS.

Longitud de onda ( $\lambda$ ) nm	Fracción	1- Fracción	Irradiación (W/m <sup>2</sup> )	Irradiación *(1-Fracción)	Temperatura (°K)	Temperatura (°C)
450	0.72	0.28	1.2881	0.360668	854.3553	581.2053
460	0.70	0.30	1.2791	0.383730	839.6386	566.4886
470	0.60	0.40	1.2749	0.509960	830.5118	557.3618
480	0.58	0.42	1.3825	0.580050	818.4061	545.2561
490	0.40	0.60	1.3968	0.838080	812.1503	539.0003

500	0.25	0.75	1.3391	1.004325	802.1634	529.0134
510	0.12	0.88	1.3497	1.187736	792.3624	519.1764
520	0.08	0.92	1.3349	1.228108	779.9483	506.7983
530	0.05	0.95	1.3598	1.291810	768.3906	495.2406
540	0.02	0.98	1.3096	1.283408	756.0215	482.8715

La **figura (20)** muestra el perfil de luminiscencia del CdS sobrepuesto en el perfil de radiación del estándar AM1.5G. De esta figura se puede observar que el CdS tiene un perfil de emisión gaussiano que por encima de  $0.2 \text{ W/m}^2$  va desde 480 nm hasta 750 nm con un máximo de irradiación alrededor de los 610 nm. La **tabla (6)** muestra para las longitudes de onda de 450 a 600 nm con incrementos de diez en diez la relación fraccional de la radiación emitida por el material CdS, la tabla completa se muestra en el **anexo II**. En la primera columna se muestra la longitud onda, en la segunda el porcentaje de irradiación que el filtro FL retransmite y sumara a los valores de irradiación provenientes del estándar AM1.5G en cada longitud de onda (Fracción), en la tercera columna el factor de multiplicación con el cual se obtiene para cada longitud de onda el valor de irradiación retransmitida ( $1+\text{Fracción}$ ), este factor se obtiene sumando uno a la columna dos. En la columna cuatro se muestran la irradiación incidente (AM1.5G), en la cinco la irradiación multiplicada por el factor ( $1+\text{Fracción}$ ) de la columna tres. En las columnas seis y siete se muestra la temperatura promedio suministrada por el filtro FL en grados Kelvin y centígrados, respectivamente. Para estimar esta temperatura se utilizó la columna cinco y la **ecuación (7)**.

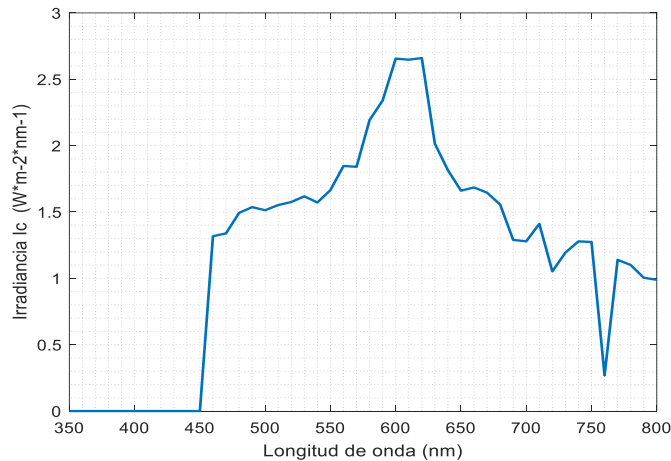


**Figura (20).** Perfil luminiscencia del CdS sobrepuesto en el perfil de radiación del estándar AM1.5G.

**Tabla (6).** Relación fraccional de la radiación emitida por el material CdS.

Longitud de onda ( $\lambda$ ) nm	Fracción	1+ Fracción	Irradiación (W/m <sup>2</sup> )	Irradiación *(1+Fracción)	Temperatura (°K)	Temperatura (°C)
460	0.03	1.03	1.2791	1.317473	868.39	592.24
470	0.05	1.05	1.2749	1.338645	852.84	579.69
480	0.08	1.08	1.3825	1.493100	840.09	566.94
490	0.10	1.10	1.3968	1.536480	825.99	552.85
500	0.13	1.13	1.3391	1.513183	811.43	538.28

Tal como se mencionó en los apartados anteriores, para estimar el efecto que el filtro FL genera en el rendimiento de la celda solar se requiere conocer la modificación que este provoca al espectro de radiación solar incidente. Esta modificación se obtiene retirado de cada longitud de onda del espectro incidente la radiación absorbida por el filtro y agregando para cada longitud de onda la radiación emitida por el filtro. La **figura (21)** muestra el espectro de radiación posterior al filtro FL el cual es resultante de la absorción y retransmisión del CdS. Este espectro representa la modificación que el filtro FL provoco al espectro de radiación solar incidente y es el nuevo espectro que impactara a la celda solar de silicio. En la **figura (21)** se puede observar que el filtro FL absorbió casi en su totalidad la irradiación proveniente en longitudes de onda por debajo de los 450 nm, mientras que a partir de los 460 nm hasta los 780 nm la irradiación empieza a aumentar y en especial en el rango de 600 a 620 nm alcanza casi el doble de su valor original.

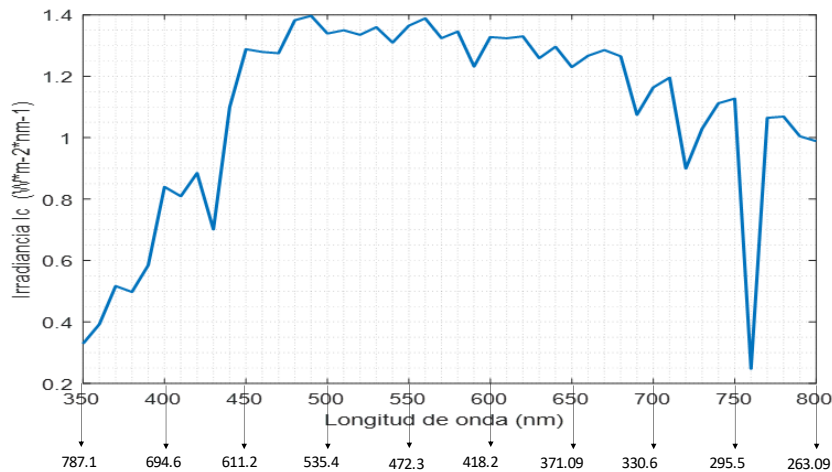


**Figura (21).** Espectro de radiación posterior al filtro FL (impacta a la celda solar de silicio), el cual es resultante de la absorción y retransmisión del filtro de CdS.

### 3.4 Estimación promedio de la temperatura retirada por el material semiconductor CdS.

Para estimar la temperatura absoluta promedio retirada por el filtro FL de CdS, primero se calcula la temperatura absoluta promedio del espectro de irradiación solar incidente (AM1.5G),

posteriormente se calcula la temperatura absoluta promedio del espectro posterior al filtro que es el espectro que impacta a la celda solar de Si y es resultante de la absorción y retransmisión del CdS, **figura (21)**. Para calcular la temperatura absoluta promedio del espectro de irradiación solar incidente se consideró el rango de longitudes de onda 350 a 800 nm con incrementos de diez en diez y los valores de irradiación ( $W/m^2$ ) para cada longitud de onda mostrado en la **tabla (7)**, posteriormente se aplicó la **ecuación (7)**. La **figura (22)** muestra el estándar de irradiación incidente AM1.5G sin filtro FL mostrando algunos ejemplos de las temperaturas promedio absolutas resultantes. Una vez calculadas todas las temperaturas se obtuvo el promedio aritmético. La **tabla (4)** muestra algunos ejemplos de la temperatura resultante y de igual forma muestra el promedio de la temperatura absoluta final obtenida, el cual es de  $472.82\text{ }^{\circ}C$ . Esta temperatura promedio es la temperatura que suministra el espectro de irradiación considerado al filtro.



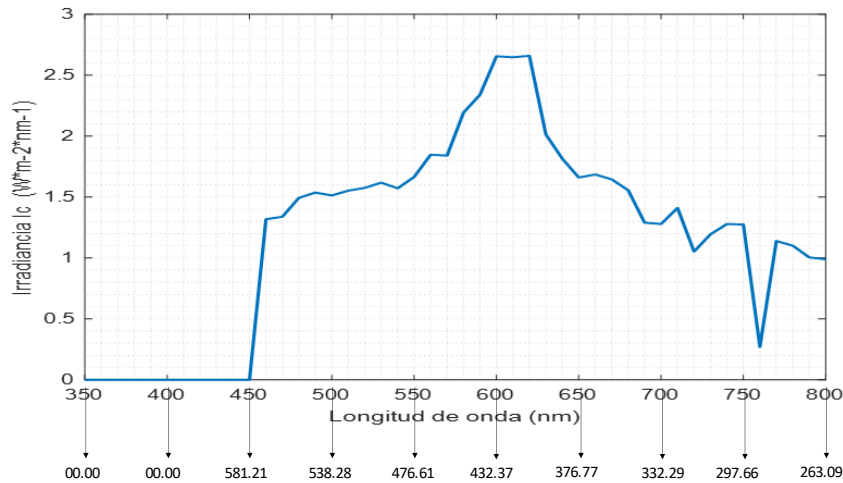
**Figura (22).** Ejemplos de las temperaturas estimadas en el espectro de radiación AM1.5G.

**Tabla (7).** Ejemplo de las temperaturas estimadas para el espectro de irradiación AM1.5 G.

Temperatura (Sin CdS)			
Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}C$ )	Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}C$ )
350	787.11	650	371.09
450	611.28	750	295.59
550	472.36	800	263.09
<b>Temperatura promedio = <math>471.82\text{ }^{\circ}C</math></b>			

Para estimar la temperatura absoluta promedio del espectro posterior al filtro se consideró el espectro mostrado en la **figura (23)** en conjunto con la **ecuación (7)**. Adicionalmente esta figura muestra algunos ejemplos de las temperaturas promedio absolutas resultantes. Una vez

calculadas todas las temperaturas para este nuevo espectro se obtuvo el promedio aritmético. La **tabla (8)** muestra algunos ejemplos de la temperatura resultante y de igual forma muestra el promedio de la temperatura absoluta final obtenida, el cual es de 322.71 °C. Esta temperatura promedio que suministra a la celda solar de Si el espectro de irradiación posterior al filtro.



**Figura (23).** Ejemplos de las temperaturas estimadas en el espectro posterior al filtro de CdS.

**Tabla (8).** Ejemplo de las temperaturas estimadas para el espectro de irradiación posterior al filtro.

Temperatura (Absorbancia + Fotoluminiscencia del CdS)			
Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
350	000.00	650	376.77
450	581.21	750	297.66
550	476.61	800	263.09
<b>Temperatura promedio = 322.71 °C</b>			

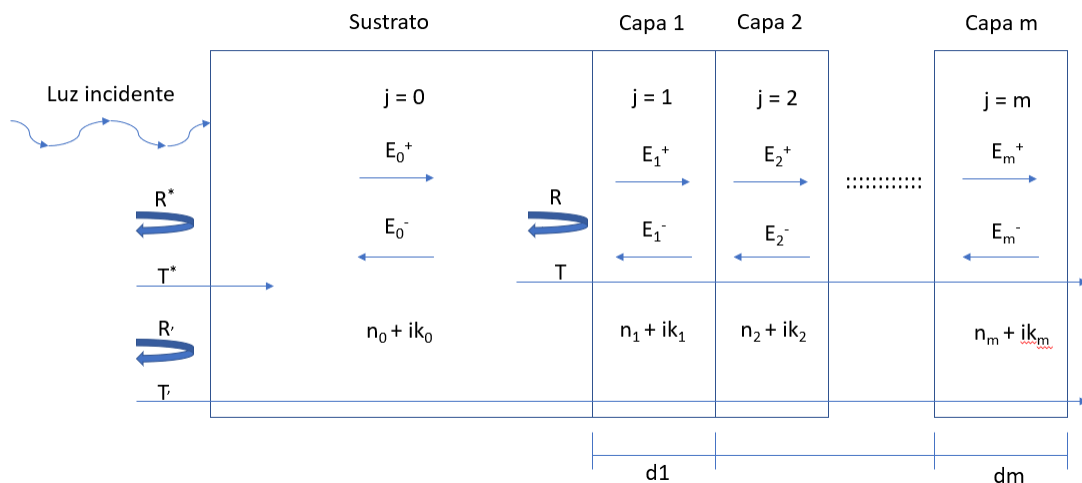
Al comparar las temperaturas promedio de la **tabla (7)** y la **tabla (8)** se observa que hay una diferencia de 149.11 °C en las temperaturas promedio, lo que equivale al 31.6%. Esto significa que dicha estimación, teóricamente prevé que con la utilización de un filtro de conversión descendente del material CdS un incremento en el calentamiento de la celda de Si del 31.6% en la temperatura absoluta promedio.

### 3.5. Cálculo de la tasa de generación de excitones (GT) en la celda solar de Si sin filtro CdS.

Para obtener las características de desempeño de una celda solar de manera teórica es necesario obtener la tasa de generación de excitones  $G_t(x,\lambda)$ , la cual representa el número de pares electrón-hueco generados por unidad de tiempo en el dispositivo. En este trabajo para obtener  $G_t$  se utilizó el método de la matriz de transferencia óptica en una dimensión. Este es un método lineal utilizado en el área de la óptica para estudiar la distribución del campo eléctrico y la

disipación de este en las películas que componen una estructura multicapa, como es el caso de un dispositivo fotovoltaico. Este método está basado en los coeficientes de transmisión y reflexión de Fresnel (los cuales describen los fenómenos de transmisión y reflexión de la radiación incidente en la interfaz entre diferentes medios) para formar matrices en las que se considera que una parte de la radiación es transmitida hacia uno de los medios y la parte restante es reflejada.

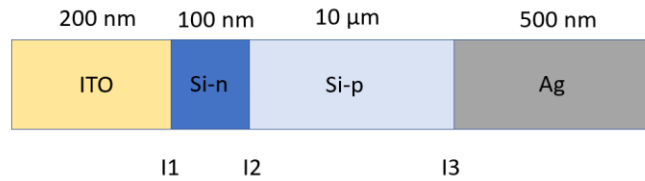
Partiendo de una estructura multicapa tal como la mostrada en la **figura (24)**, Las capas son numeradas empezando con 0 para el aire, 1 para el sustrato y así sucesivamente con un ancho de la capa definido por  $d$ . El índice de refracción es una cantidad compleja, el cual se escribe de la forma convencional  $\tilde{n} = n + ik$ , donde  $n$  es el índice de refracción y  $k$  el coeficiente de extinción. Inicialmente se asume que los procesos ocurridos en la propagación del campo eléctrico óptico son puramente lineales debido a que el medio es homogéneo y las interfaces puramente paralelas. Para encontrar la distribución del campo eléctrico óptico en una película  $j$ , se divide la estructura multicapa en dos partes; un apilado de capas anteriores a la capa  $j$  el cual tendrá una matriz característica  $M_j$  y un apilado de capas posteriores a la capa  $j$  el cual tendrá una matriz característica  $M_j'$ . Ambas tienen sus coeficientes de transmisión y reflexión asociados. Posteriormente, se utilizan las ecuaciones que se describirán en los siguientes apartados.



**Figura (24).** Representación de una estructura multicapa.

Para ilustrar el procedimiento seguido en el método de la matriz de transferencia óptica, consideraremos la estructura de la celda solar ITO/Si-N/Si-P/Ag y los anchos de cada capa tal

como se muestran en la **figura (25)**. Para el primer nanómetro de una capa de Si-P (capa activa) con un ancho total de 10,000 nm, a continuación, se ejecutara paso a paso dicho procedimiento para la longitud de onda de 350 nm. Los índices de refracción compleja de los materiales que componen la celda para la longitud de onda de 350 nm se muestran en le **tabla (9)**.



**Figura (25).** Estructura de la celda solar de Si considerada.

**Tabla (9).** Índice de refracción complejo para  $\lambda = 350$  nm de cada material que compone la celda solar de Si-P.

Material	Índice de refracción complejo ( $\lambda=350$ nm)
ITO	$2.2106 + j0.05851$
Si-N	$5.1000 + j3.013668$
Si-P	$5.2020 + j3.013668$
Ag	$0.11436 + j1.3196$

#### □ Cálculo de las matrices de interface

En un sistema multicapa una interface se define como el límite o unión de dos capas delgadas o medios. La matriz de interface describe el efecto que sufre un campo electromagnético incidente cuando este impacta en dicha interface. La matriz de interface se representa a través de la **ecuación (8)**. Para expresar esta ecuación se utilizan los índices de refracción complejos de cada material de la interface para calcular los coeficientes de transmisión y reflexión de Fresnel representados en las **ecuaciones (9) y (10)**, respectivamente.

$$I = \frac{1}{t_{ij}} * \begin{bmatrix} 1 & r_{ij} \\ r_{ij} & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$r_{ij} = \frac{(n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)} \quad (9)$$

$$t_{ij} = 1 + r_{ij} \quad (10)$$

#### □ Interface 1 (ITO/Si-N)

La primera interface de la estructura multicapa de la celda solar de Si es entre la capa de material ITO y la capa de material Si-N. Sustituyendo los valores para la longitud de onda  $\lambda = 350$  nm mostrados en la **tabla (9)** en las ecuaciones previamente descritas resulta la matriz de interface  $I_1$  mostrada a continuación.

$$r_{ij} = \frac{((5.1000 + j3.013668) - (2.2106 + j0.05851))}{((5.1000 + j3.013668) + (2.2106 + j0.05851))} = 0.4854 + j0.1975$$

$$t_{ij} = 1 + 0.4854 + j0.1975 = 1.4854 + j0.1975$$

$$I_1 = \frac{1}{1.4854 + j0.1975} \begin{bmatrix} 1 & 0.4854 + j0.1975 \\ 0.4854 + j0.1975 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} 0.6615 - j0.0880 & 0.3385 + j0.0880 \\ 0.3385 + j0.0880 & 0.6615 - j0.0880 \end{bmatrix}$$

#### □ Interface 2 (Si-N/Si-P)

La segunda interface es entre la capa de material Si-N y la capa de material Si-p. Similar que en el caso anterior sustituyendo valores de la **tabla (9)** en las ecuaciones correspondientes resulta la matriz de interface  $I_2$  mostrada a continuación.

$$r_{ij} = \frac{((5.2020 + j3.013668) - (5.1000 + j3.013668))}{((5.2020 + j3.013668) + (5.1000 + j3.013668))} = -0.0074 + j0.0043$$

$$t_{ij} = 1 + -0.0074 + j0.0043 = 0.9926 + j0.0043$$

$$I_2 = \frac{1}{0.9926 + j0.0043} \begin{bmatrix} 1 & -0.0074 + j0.0043 \\ -0.0074 + j0.0043 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} 1.0074 - j0.0044 & -0.0074 + j0.0044 \\ -0.0074 + j0.0044 & 1.0074 - j0.0044 \end{bmatrix}$$

#### □ Interface 3 (Si-P/Ag)

La tercera interface es entre la capa de material Si-P y la capa de material Ag. Sustituyendo valores correspondientes en las ecuaciones previamente descritas resulta la matriz de interface  $I_3$  mostrada a continuación.

$$r_{ij} = \frac{((0.11436 + j1.3196) - (5.2020 + j3.013668))}{((0.11436 + j1.3196) + (5.2020 + j3.013668))} = -0.7253 + j0.2778$$

$$t_{ij} = 1 + -0.7253 + j0.2778 = 0.2747 + j0.2778$$

$$I_3 = \frac{1}{0.2747 + j0.2778} \begin{bmatrix} 1 & -0.7253 + j0.2778 \\ -0.7253 + j0.2778 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1.7996 - j1.8198 & -0.7996 + j1.8198 \\ -0.7996 + j1.8198 & 1.7996 - j1.8198 \end{bmatrix}$$

#### □ Matrices de propagación

La matriz de propagación describe el efecto que sufre el campo incidente al propagarse en a través de las capas que conforman la estructura. La matriz de propagación se representa a través

de la **ecuación (11)**. Para expresar esta ecuación se utilizan los índices de refracción complejos de cada material de la interface para calcular la constante de propagación  $\beta_j$  representada en la **ecuación (12)**.

$$P = \begin{bmatrix} e^{j(\beta_j)} & 0 \\ 0 & e^{-j(\beta_j)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\beta_j = \frac{2\pi d}{\lambda} n_j \cos \theta_i \quad (12)$$

□ **Matriz de propagación en la capa ITO.**

La primera propagación del campo incidente a la estructura multicapa de la celda solar de Si es en la capa de material ITO. Sustituyendo los valores para la longitud de onda  $\lambda = 350$  nm mostrados en la **tabla (9)** en las ecuaciones previamente descritas resulta la matriz de interface  $P_1$  mostrada a continuación.

$$\beta_j = \frac{2\pi(200)}{(350)} (2.2106 + j0.05851) \cos(0) * \frac{\pi}{180} = 0.1385 + j0.0037$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} e^{j(0.1385+j0.0037)} & 0 \\ 0 & e^{-j(0.1385+j0.0037)} \end{bmatrix}$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.9868 + j0.1376 & 0 \\ 0 & 0.9941 + j0.1386 \end{bmatrix}$$

□ **Matriz de propagación en la capa Si-P.**

La segunda propagación es en la capa de material Si-P. Similar que en el caso anterior sustituyendo valores de la **tabla (9)** en las ecuaciones correspondientes resulta la matriz de propagación  $P_2$  mostrada a continuación.

$$\beta_j = \frac{2\pi(300)}{(350)} (5.2020 + j3.013668) \cos(0) * \frac{\pi}{180} = 0.4890 + j0.2833$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} e^{j(0.4890+j0.2833)} & 0 \\ 0 & e^{-j(0.4890+j0.2833)} \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.6650 + j0.3538 & 0 \\ 0 & 1.1719 - j0.6235 \end{bmatrix}$$

□ **Matriz de propagación en la capa Ag.**

La tercera propagación es en la capa de material Ag. Sustituyendo valores correspondientes en las ecuaciones previamente descritas resulta la matriz de interface  $P_3$  mostrada a continuación.

$$\beta_j = \frac{2\pi(500)}{(350)} (0.11436 + j1.3196) \cos(0) * \frac{\pi}{180} = 0.1792 + j2.0673$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} e^{j(0.1792+j2.0673)} & 0 \\ 0 & e^{-j(0.1792+j2.0673)} \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0.1245 + j0.0225 & 0 \\ 0 & 7.7769 - j1.4084 \end{bmatrix}$$

□ **Matriz característica del sistema  $M'_j$ .**

Una vez determinadas las matrices de interface y propagación de todo el sistema, se determina las matrices características correspondientes al paquete de capas previas a la capa activa ( $M'_j$ ) y al paquete de capas posteriores a la capa activa ( $M''_j$ ) utilizando las **ecuaciones (13)** y **(14)**, respectivamente.

$$M_j = P_x I_x P_{x+1} I_{x+1} P_{x+2} I_{x+2} \dots I_{x+n} \quad (13)$$

$$M''_j = I_y P_y \quad (14)$$

$$M_j = P_1 I_1 P_2 I_2$$

$$M_j = \begin{bmatrix} 0.9868 + j0.1376 & 0 \\ 0 & 0.9941 + j0.1386 \end{bmatrix}^*$$

$$\begin{bmatrix} 0.6615 - j0.0880 & 0.3385 + j0.0880 \\ 0.3385 + j0.0880 & 0.6615 - j0.0880 \end{bmatrix}^*$$

$$\begin{bmatrix} 0.6650 + j0.3538 & 0 \\ 0 & 1.1719 - j0.6235 \end{bmatrix}^*$$

$$\begin{bmatrix} 1.0074 - j0.0044 & -0.0074 + j0.0044 \\ -0.0074 + j0.0044 & 1.0074 - j0.0044 \end{bmatrix}$$

$$M_j = \begin{bmatrix} 0.4418 + j0.2403 & 0.4593 - j0.0466 \\ 0.2177 + j0.1578 & 0.6445 - j0.6199 \end{bmatrix}$$

$$M''_j = I_3 P_3$$

$$M''_j = \begin{bmatrix} 1.7996 - j1.8198 & -0.7996 + j1.8198 \\ -0.7996 + j1.8198 & 1.7996 - j1.8198 \end{bmatrix}^*$$

$$\begin{bmatrix} 0.1245 + j0.0225 & 0 \\ 0 & 7.7769 - j1.4084 \end{bmatrix}$$

$$M''_j = \begin{bmatrix} 0.2651 - j0.1860 & -3.6554 + j15.2783 \\ -0.1406 + j0.2085 & 11.4323 - j16.6867 \end{bmatrix}$$

□ **Coefficientes de transmisión y reflexión de la capa activa**

Una vez determinadas las matrices características correspondientes al paquete de capas previas a la capa activa ( $M'_j$ ) y al paquete de capas posteriores a la capa activa ( $M''_j$ ) se determinan el

coeficiente de transmisión y reflexión de a capa activa utilizando las **ecuaciones (15), (16), (17) y (18)**, respectivamente.

$$t_j' = \frac{1}{M_{j11}'} \quad (15)$$

$$r_j' = -\frac{M_{j12}'}{M_{j11}'} \quad (16)$$

$$t_j^+ = \frac{t_j'}{1 - r_j' * r_j'' * e^{j2\xi_j d_j}} \quad (17)$$

$$r_j'' = \frac{M_{j21}''}{M_{j11}''} \quad (18)$$

donde  $\xi = (2\pi d/\lambda)n_j$ , evaluando para  $d = 10,000$  nm se obtienen los siguientes valores:

$$t_j' = \frac{1}{0.4418 + j0.2403}$$

$$t_j' = 1.7469 - j0.95$$

$$r_j' = -\frac{0.4593 - j0.0466}{0.4418 + j0.2403}$$

$$r_j' = -0.7581 + j0.5178$$

$$r_j'' = \frac{-0.1406 + j0.2085}{0.2651 - j0.1860}$$

$$r_j'' = -0.7253 + j0.2778$$

$$\xi = \frac{2\pi(5.10 + j3.013668)}{350} * \frac{\pi}{180}$$

$$\xi = 0.0016 + j0.0009$$

$$e^{j2\xi_j d_j} = e^{j[2*(0.0016+j0.0009)*10000]}$$

$$e^{j2\xi_j d_j} = 5.3828 * 10^{-9} + j3.2470 * 10^{-9}$$

$$t_j^+ = \frac{1.7469 - j0.95}{1 - 0.7581 + j0.5178} * (-0.7253 + j0.2778) * (5.3828 * 10^{-9} + j3.2470 * 10^{-9})$$

$$t_j^+ = 1.7469 - j0.9500$$

Con la obtención de estos coeficientes se puede realizar el cálculo del campo eléctrico  $E_j(x)$ .

#### □ **Campo eléctrico en la capa activa**

Para el cálculo del campo eléctrico se utiliza la **ecuación (19)** con los parámetros obtenidos anteriormente. Donde  $E_o^+$  es el espectro de irradiación para la longitud de onda correspondiente

(para este ejemplo 350 nm) y  $d_j$  es el ancho de la película o capa activa.

$$E_j(x) = t_j^+ \left[ e^{i\xi_j x} + r_j'' e^{i\xi_j (2d_j - x)} \right] E_o^+ \quad (19)$$

$$E_j(x) = 1.7469 - j0.9500[(0.999099126 + j0.00159855) + (-0.7253 + j0.2778) \\ * (5.3828 * 10^{-9} + j3.2470 * 10^{-9})](0.32913)(0.8)$$

$$absE_j(x) = 0.5231 E \left( \frac{V}{m^2} \right)$$

□ **Disipación del campo eléctrico en la capa activa.**

Una vez obtenido el campo eléctrico se procede a obtener la energía promedio disipada utilizando la **ecuación** (20), donde  $c = 3 * 10^8 m/s$  es la velocidad de la luz,  $\epsilon_0 = 8.85 * 10^{-12} F/m$  es la permitividad eléctrica en el vacío y el coeficiente de absorción en el Si-P para la longitud de onda 350 nm está dado por  $\alpha_j = 4\pi k/\lambda = 4\pi(3.013668)/350 = 0.1082$ .

$$Q_j(x, \lambda) = \frac{1}{2} c \epsilon_0 \alpha_j \tilde{n}_j |E_j(x)|^2 \quad (20)$$

$$Q_j(x, \lambda) = \frac{1}{2} [(3 * 10^8)(8.85 * 10^{-12})(0.1082)(5.2020)|0.5231|^2]$$

$$Q_j(x, \lambda) = 2.0446 * 10^{-4} W/m^3$$

□ **Tasa de generación de excitones.**

La tasa de generación de excitones se obtiene utilizando la **ecuación** (21). Para obtener la contribución total de excitones se debe integrar en el rango de longitudes del espectro incidente que generalmente se considera de 350 a 800 nm. Para el caso de  $\lambda = 350$  nm, considerando la eficiencia de fotones absorbidos que generan un exciton  $\eta = 1$  y la constante de Plank  $h = 6.62606952 * 10^{-34} J/s$  el cálculo de la tasa de generación excitones es el que muestra enseguida.

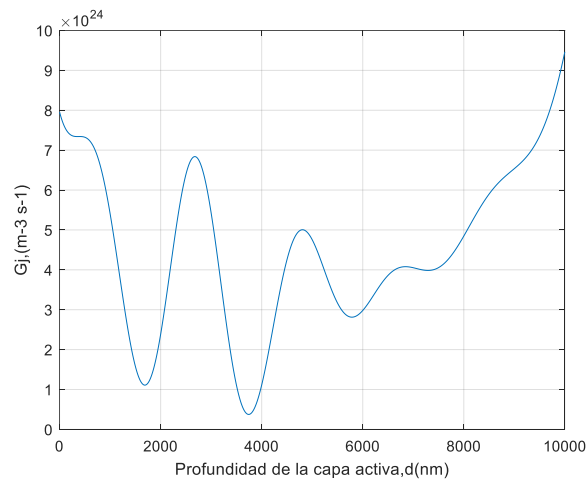
$$G_t(x) = \eta \int_{350}^{800} \frac{\lambda}{hc} Q(x, \lambda) d\lambda \quad (21)$$

$$G_t(x) = (1) \frac{350}{(6.62606952 * 10^{-34})(3 * 10^8)} (2.0446 * 10^{-4})$$

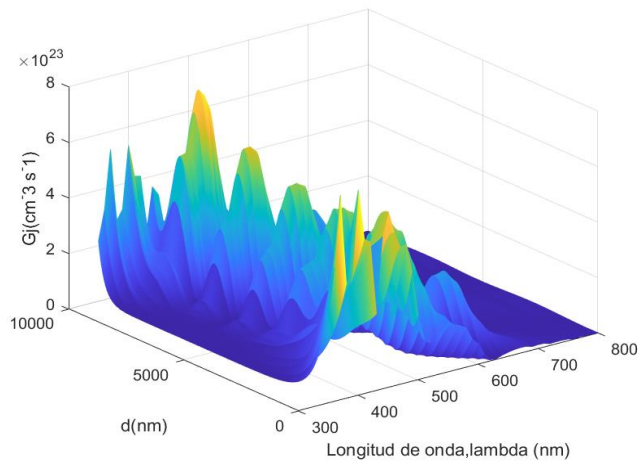
$$G(x) = 3.6 * 10^{23} m^{-3} s^{-1}$$

La **figura** (26a) muestra el perfil de  $G_t$  obtenido para la capa Si-P de la celda solar de silicio considerada desde el nanómetro uno hasta el nanómetro 10000 para  $\lambda = 350$  nm. De esta figura se puede observar que  $G_t$  tiene una generación oscilante en decadencias hasta los 6000 nm y posteriormente aumenta. Este comportamiento se puede atribuir a los efectos de reflexión e

interferencia constructiva de los fotones que impactan la interface de esta capa con la capa de Ag. De la misma manera la **figura (26b)** muestra el perfil de  $G_t$  obtenido para la capa Si-P de la celda solar de silicio considerada desde el nanómetro uno hasta el nanómetro 10000 pero ahora par  $\lambda = 350$  nm hasta  $\lambda = 800$  nm. En esta grafica se puede observar que existe una alta tasa de generación de excitones en el rango de longitudes de onda de 480 a 600 nm, este comportamiento se atribuye a que el espectro de irradiación incidente (AM1.5G) en este rango es donde tiene mayor irradiación. La **tabla (10)** muestra la  $G_t = 4.5374 * 10^{28} m^{-3} s^{-1}$  obtenida aplicado la **ecuación (21)** a todo rango de longitudes de onda desde 350 hasta 850 nm.



(a)



(b)

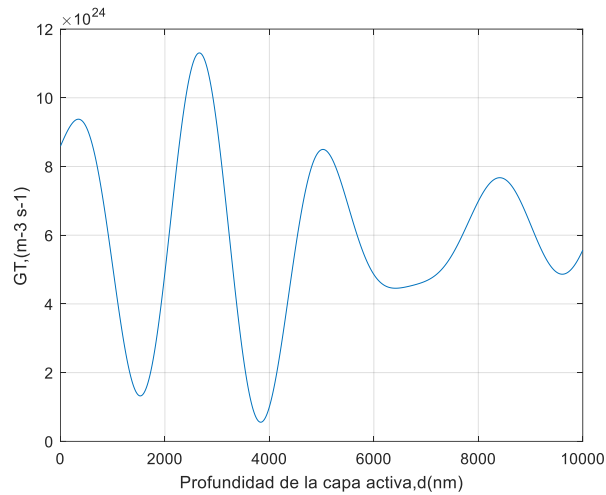
**Figura (26)**  $G_t$  en la capa activa Si-P para el espectro incidente (AM1.5G). (a) Perfil  $G_t$  vs Profundidad en la capa para  $\lambda = 350$  nm, (b) perfil de  $G_t$  considerada desde el nm uno hasta el nm 10000 par  $\lambda = 350$  nm hasta  $\lambda = 800$  nm

**Tabla (10)**.  $G_t$  obtenida para el espectro incidente AM1.5G y el rango de longitudes de onda desde el 350 a 850 nm

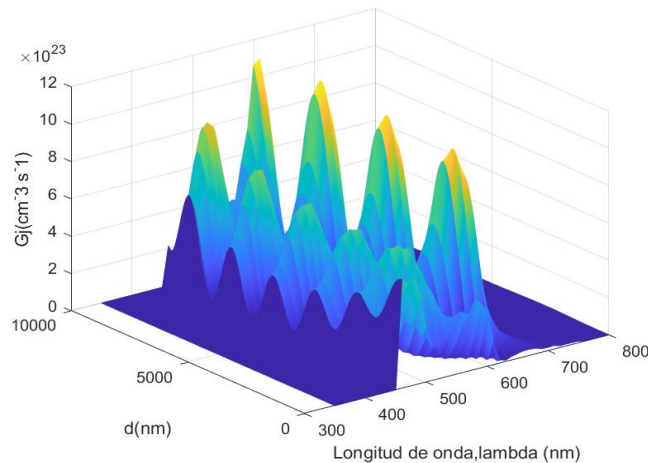
Tasa de generación de excitones total	
$G_t$	$4.5374 * 10^{28} m^{-3} s^{-1}$

### 3.6. Cálculo de la tasa de generación de exítones (GT) en la celda solar de Si con filtro CdS.

Para calcular  $G_t$  en la celda solar de Si sin el filtro de CdS se consideró el espectro de irradiación de la **figura (21)**. La **figura (27a)** muestra el perfil de  $G_t$  obtenido considerando desde el nm uno hasta el nm 10000 para  $\lambda = 350$  nm. De esta figura se puede observar que  $G_t$  tiene una generación oscilante en decadencias en todo el ancho de la capa. De la misma manera la **figura (27b)** muestra el perfil de  $G_t$  pero ahora para  $\lambda = 350$  nm hasta  $\lambda = 800$  nm. En esta gráfica se puede observar que existe una alta tasa de generación de excitones en el rango de longitudes de onda de 480 a 600 nm. La **tabla (11)** muestra la  $G_t = 5.8639 \times 10^{28} m^{-3} s^{-1}$  obtenida aplicando la **ecuación (21)** a todo el rango de longitudes de onda desde el nm hasta el nm 10000.



(a)



(b)

**Figura (27)**  $G_t$  en la capa activa Si-P para el espectro posterior al filtro FL de CdS. (a) Perfil  $G_t$  vs Profundidad en la capa para  $\lambda = 350$  nm, (b) perfil de  $G_t$  considerada desde el nm uno hasta el nm 10000 para  $\lambda = 350$  nm hasta  $\lambda = 800$  nm.

**Tabla (11).**  $G_t$  obtenida para el espectro posterior al filtro FL de CdS y el rango  $\lambda$  desde el 350 a 850 nm.

Tasa de generación de excitones total con filtro de CdS.	
$G_{jt}$	$5.8639 * 10^{28} m^{-3} s^{-1}$

Comparando los resultados mostrados en la **tabla (10)** y la **tabla (11)**, se puede observar que hay un incremento en la tasa de generación de excitones cuando se utiliza el espectro de irradiación posterior al filtro de CdS. Esto se atribuye a que el filtro de CdS absorbe mayoritariamente la energía proveniente en las longitudes de onda menores a 400nm (Ultravioleta) que son las que aporta fotones con mayor energía, pero son las menos absorbidas por el Si y la retransmita en las longitudes entre 500 a 700 nm (Espectro visible) que es donde el Si tiene mayor absorbanza. Esto se puede observar en el espectro de irradiación posterior al filtro que tiene sus máximos alrededor de los 600 nm. Por este motivo existe un incremento en  $G_t$  utilizando el filtro comparado con no utilizarlo.

### 3.7. Cálculo de las características de desempeño de las celdas solares.

Para calcular los parámetros de desempeño de la celda solar de Si sin utilizar el filtro de CdS y utilizándolo, se consideró una densidad de potencia incidente de 100 mW/cm<sup>2</sup> en base al estándar AM 1.5G. De igual forma, se consideró como patrón de referencia una celda solar de 100 mm \* 100 mm =10000 mm<sup>2</sup> donde la potencia incidente es de 10 Watts, Los parámetros seleccionados se muestran en la **tabla (12)**.

**Tabla (12).** Lista de parámetros de desempeño para la celda solar de Si con y sin el filtro FL de CdS.

$V_{oc}$	Voltaje de circuito abierto
$J_{sc}$	Densidad de corriente de corto circuito
$V_{max}$	Voltaje a máxima potencia
$J_{max}$	Densidad de corriente a máxima potencia
$FF$	Fill Factor (Factor de llenado)
$n_{power}$	Eficiencia de conversión de potencia

Para la obtención de estos parámetros se graficó la curva J-V de la celda solar utilizando las **ecuaciones (22), (23), (24), (25) y (26)**.

$$J_{sc} = J_{ph} = -qG_t(L_p + L_n) \quad (22)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left\{ \frac{J_{sc}}{J_s} + 1 \right\} \quad (23)$$

$$JP_{max} = J_{max}V_{max} \quad (24)$$

$$FF = \frac{V_{max}J_{max}}{V_{oc}J_{sc}} \quad (25)$$

$$\eta_{power} = FF * \frac{V_{oc}J_{sc}}{P_{incidente}} \quad (26)$$

### 3.7.1 Celda solar sin filtro de CdS.

Para la obtención de las características de desempeño de la celda solar sin filtro de CdS se utilizaron los datos mostrados en la **tabla (13)**. Es importante notar que  $G_t$  considerado en este cálculo es el obtenido para la celda solar sin filtro de CdS. Los cálculos y la curva J-V obtenidos son los que muestran enseguida.

**Tabla (13).** Lista de parámetros de desempeño calculados para la celda solar de Si con y sin el filtro FL de CdS.

$kT/q$	0.02585 V
$q$	$1.6 \times 10^{-19} C$
$G_L$	$4.5485 \times 10^{28} m^{-3} s^{-1}$
$J_0$	$130 \mu A/cm^2$
$L_n$	$9.4868 \times 10^{-4} cm$
$L_p$	$9.1214 \times 10^{-5} cm$
$A_T$	$156.25 cm^2$

Obtención de la densidad de corriente de corto circuito  $J_{sc}$ :

$$J_{sc} = J_{ph} = -qG_L(L_p + L_n)$$

$$J_{sc} = -(1.6 \times 10^{-19} A * s)(4.5485 \times 10^{28} m^{-3} s^{-1}(x10^{-6}))(0.000091214 cm + 0.00094868 cm)$$

$$J_{sc} = -7.5679 \frac{A}{cm^2}$$

Una vez obtenida la densidad de corriente de corto circuito se obtiene el voltaje de circuito abierto:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} Ln \left\{ \frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right\}$$

$$V_{oc} = (0.0258 V) Ln \left\{ \frac{7.5679 \frac{A}{cm^2}}{0.00013 \frac{A}{cm^2}} + 1 \right\}$$

$$V_{oc} = 0.2830 V$$

Ya obtenidos el  $V_{oc}$  y la  $J_{sc}$  se puede graficar la curva característica J-V utilizando la **ecuación (27)**. Donde  $J_0$  es la densidad de corriente de saturación,  $G_t$  la tasa de generación de excitones y  $L_p$  y  $L_n$  las distancias de difusión de las cargas en los materiales de la unión pn. Si la

zona de depleción está mayoritariamente en el material p consecuencia del dopado, entonces solo se considera  $L_n$  que es la difusión de los electrones, en caso contrario si la zona de depleción está mayoritariamente en el material p entonces solo se considera  $L_p$  que es la difusión de los huecos. Para obtener la curva característica J-V se dan valores a V desde 0 hasta  $V_{oc}$  con una resolución suficiente para obtener una gráfica uniforme (por ejemplo 100 valores).

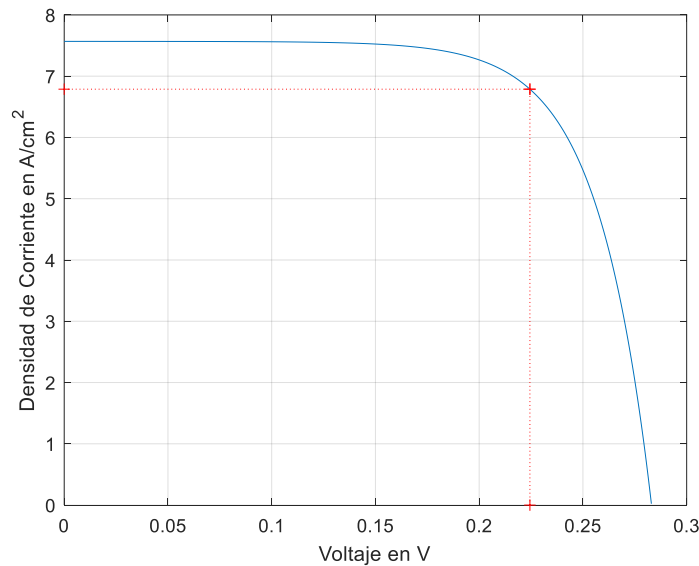
$$J = J_0 \left( e^{\frac{V}{kqT}} - 1 \right) - qG_t(L_p - L_n) \quad (27)$$

Si se considera el área transversal sensitiva de la celda solar la ecuación 27 puede ser representada con la **ecuación (28)**.

$$J = I_0 \left( e^{\frac{V}{kqT}} - 1 \right) - qAG_t(L_p - L_n) \quad (28)$$

Sustituyendo los valores correspondientes a la ecuación (27) se obtiene la curva J-V mostrada en la **figura (28)**.

$$J = 0.00013 \left( e^{\frac{V}{0.025}} - 1 \right) - (1.6638 \times 10^{-22}) G_t$$



**Figura (28)** Curva J-V teórica de la celda solar de Si sin filtro FL de CdS.

Con algunos parámetros de la gráfica se obtienen las siguientes características de desempeño.

$$J_{max} = 6.78778 \frac{A}{cm^2}$$

$$V_{max} = 0.2244 V$$

$$JP_{max} = J_{max}V_{max} = \left(6.78778 \frac{A}{cm^2}\right) (0.2244 V) = 1.5235 \frac{W}{cm^2}$$

$$FF = \frac{V_{max}J_{max}}{V_{oc}J_{sc}}$$

$$FF = \frac{(0.2244)(6.7878)}{(0.2830)(7.5679)}$$

$$FF = 0.7114$$

$$\eta_{power} = FF * \frac{V_{oc}J_{sc}}{P_{incidente}}$$

$$\eta_{power} = (0.7114) * \frac{(0.2830)(7.5679)}{0.1}$$

$$\eta_{power} = 15.23$$

De los resultados obtenidos, se observa que para una  $G_t = 4.5485 \times 10^{28} m^{-3} s^{-1}$  se obtiene una eficiencia de conversión  $\eta_{power} = 15.23$ , que es típica en celdas solares de Si de este modelo.

### 3.8.2 Celda solar con filtro de CdS.

Para la obtención de las características de desempeño de la celda solar con filtro de CdS se utilizaron los datos mostrados en la **tabla (13)** excepto que ahora la tasa de generación de excitones  $G_t = 5.8639 \times 10^{28} m^{-3} s^{-1}$  es la obtenida para el espectro de irradiación con filtro de Cds. Los cálculos y la curva J-V (**figura (29)**) obtenidos son los que muestran enseguida.

$$J_{sc} = J_{ph} = -qG_L(L_p + L_n)$$

$$J_{sc} = -(1.6 \times 10^{-19} A * s)(5.8639 \times 10^{28} m^{-3} s^{-1} (x 10^{-6}))(0.000091214 cm + 0.00094868 cm)$$

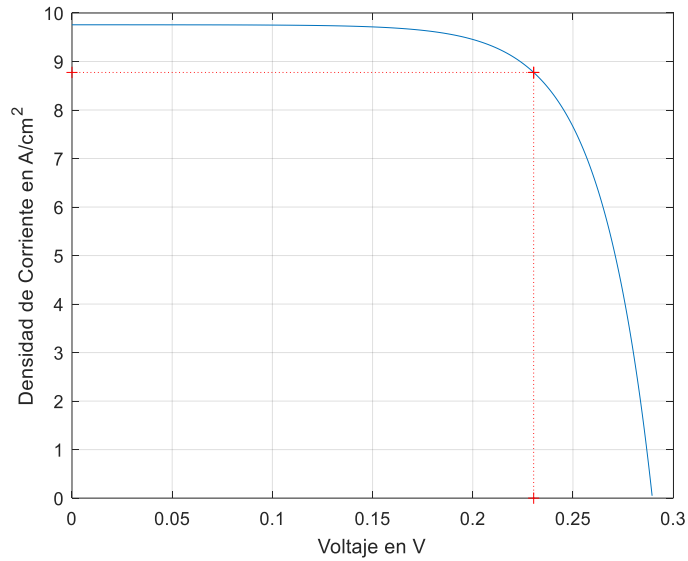
$$J_{sc} = -9.7565 \frac{A}{cm^2}$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left\{ \frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right\}$$

$$V_{oc} = (0.0258 V) \ln \left\{ \frac{9.7565 \frac{A}{cm^2}}{0.00013 \frac{A}{cm^2}} + 1 \right\}$$

$$V_{oc} = 0.2895 V$$

$$J = 0.00013 \left( e^{\frac{V}{0.025}} - 1 \right) - (1.6638 \times 10^{-22}) G_L$$



**Figura (29)** Curva J-V teórica de la celda solar de Si con filtro FL de CdS.

Con algunos parámetros de la gráfica se obtienen las siguientes características de desempeño.

$$J_{max} = 8.7737 \frac{A}{cm^2}$$

$$V_{max} = 0.2303 V$$

$$JP_{max} = J_{max}V_{max} = \left(8.7737 \frac{A}{cm^2}\right) (0.2303 V) = 2.0206 \frac{W}{cm^2}$$

$$FF = \frac{V_{max}J_{max}}{V_{oc}J_{sc}}$$

$$FF = \frac{(0.2303)(8.7737)}{(0.2895)(9.7565)}$$

$$FF = 0.7153$$

$$\eta_{power} = FF * \frac{V_{oc}J_{sc}}{P_{incidente}}$$

$$\eta_{power} = (0.7153) * \frac{(0.2895)(8.7737)}{0.1}$$

$$\eta_{power} = 22.45$$

De los resultados obtenidos, se observa que para una  $G_t = 5.8639 \times 10^{28} m^{-3} s^{-1}$  se obtiene una eficiencia de conversión  $\eta_{power} = 22.45$ , que es mayor a la obtenida sin filtro FL.

### 3.8 Comparación de resultados y observaciones importantes.

La **tabla (14)** muestra un listado de las características de desempeño obtenidas para la celda solar de Si con y sin filtro de Cds. De los resultados mostrados en la tabla se observa que el voltaje de circuito abierto y el factor de llenado incrementan ligeramente mientras que la densidad de corriente y la eficiencia de conversión incrementan sustancialmente debido a la utilización del filtro de Cds. Específicamente, la utilización del filtro de CdS incremento la eficiencia de conversión teórica de la celdas solares en un porcentaje mayor al 7%.

**Tabla (14).** Lista de parámetros de desempeño calculados para la celda solar de Si con y sin el filtro FL de CdS.

Celda solar sin filtro de CdS		Celda solar con filtro de CdS	
$J_{sc}$	$7.5679 \frac{A}{cm^2}$	$J_{sc}$	$9.7565 \frac{A}{cm^2}$
$V_{oc}$	$0.2830 V$	$V_{oc}$	$0.2895 V$
$FF$	$0.7114$	$FF$	$0.7153$
$\eta_{power}$	$15.23$	$\eta_{power}$	$22.45$

## Capítulo 4


### IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA Y EXPERIMENTAL DE LOS FILTROS DE CONVERSION DECENDENTE DE LONGITUD DE ONDA.



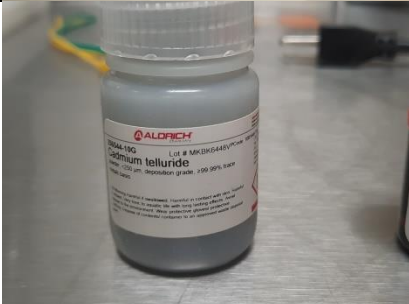

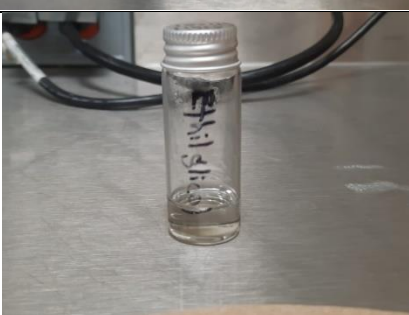
En este capítulo se describen los materiales utilizados y los procesos desarrollados para la implementación de los filtros basados en CC sobre el vidrio frontal de celdas de Si. Para la implantación de los filtros se tomó en consideración el manejo seguro de los materiales, esto debido a que los CC son metales pesados que pueden ser extremadamente tóxicos si entran en contacto con organismos vivos. Para la implementación de cada filtro se utilizó un mínimo de 48 horas, desde la preparación de los materiales hasta la deposición de los mismos en el vidrio frontal de las celdas.

#### 4.1 Materiales utilizados en la fabricación de los módulos de prueba.

En la **tabla (15)** se describen las características principales de los materiales utilizados para la fabricación e implementación de los filtros en el vidrio frontal de las celdas de Si. En orden descendente de la tabla se muestra el sustrato de vidrio soda lima con dimensiones de 6.6 cm de largo, 7.2 cm de ancho y 0.1 cm de espesor obtenidos de la compañía Edmund-Scientific. Posteriormente, se muestran el depósito con CdS con un 98% de pureza obtenido de la compañía Alf-Aesar, el depósito con CdSe con un 99.99% de pureza, el de CdTe con un 99.99% de pureza y el de  $CdSe_{0.4}Te_{0.6}$  con un 99.99% de pureza, los cuales fueron obtenidos de la compañía Sigma-Aldrich. Finalmente, se muestran los depósitos con etilenglicol y etanol obtenidos de la compañía Quiasa, de la resina epóxica del fabricante Sayer y las celdas solares de uso comercial del fabricante Mazava.

**Tabla (15).** Materiales utilizados para la implementación de los filtros FL basados en CC.

<b>Nombre y características.</b>	<b>Imagen.</b>
<b>Sustrato de vidrio soda lima</b>  L 6.6 cm x W 7.2 cm x T 0.1 cm Transmitancia: 90%	

<p><b>Sulfuro de Cadmio (CdS)</b></p> <p>Color: Anaranjado  Apariencia (Forma): Polvo  Pureza: 98%  Peso molecular: 144.46 g/mol  Fabricante: Alfa Aesar</p>	
<p><b>Seleniuro de Cadmio (CdSe)</b></p> <p>Color: Gris claro a negro  Apariencia (Forma): Polvo  Olor: Inoloro  Pureza: 99.99%  Fabricante: Sigma-Aldrich</p>	
<p><b>Teluro de Cadmio (CdTe)</b></p> <p>Color: Negro  Apariencia (Forma): Polvo  Pureza: 99.99%  Peso molecular 240.01 g/mol  Fabricante: Sigma-Aldrich</p>	
<p><b>CC ternario</b>  <math>CdSe_{0.4}Te_{0.6}</math></p> <p>Pureza: 99.99%  Color: Negro  Apariencia (Forma): Polvo  Fabricante: Sigma-Aldrich</p>	
<p><b>Etilenglicol</b></p> <p>Apariencia (Forma): Liquido  Agua (H<sub>2</sub>O) 0.10%  Cloruros (Cl) 0.5%  Hierro (Fe) 0.1ppm</p>	

<p style="text-align: center;"><b>Etanol</b></p> <p style="text-align: center;">Apariencia (Forma): Líquido Agua (H<sub>2</sub>O) 0.20%</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Resina Epóxica y catalizador</b></p> <p style="text-align: center;">Fabricante: Sayer</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Celda solar de silicio</b></p> <p style="text-align: center;">Fabricante: Mazava Voltaje: 0.5V Corriente: 0.5A Potencia: 0.25W</p>	

#### 4.1.1 Equipo utilizado.

En la **tabla (16)** se muestran las imágenes del equipo de seguridad y los instrumentos de laboratorio utilizados para la implementación práctica de los filtros. Para el manejo de los materiales se utilizó el equipo recomendado por las cartas de seguridad de los materiales, las cuales fueron proporcionadas por los fabricantes. Para evitar el contacto directo con los materiales, se estableció como obligatorio el uso de bata de laboratorio, guantes de látex, lentes de protección y mascarilla de doble filtro para gases, vapores y ácidos peligrosos generados durante el proceso de implementación. De la misma manera, se estableció el lavado continuo de manos, así como el lavado de batas y limpieza de lentes y mascarillas después de cada sesión de laboratorio.





**Tabla (16).** Equipos de protección utilizados para la implementación de los filtros FL basados en CC.






<u>Equipo de protección personal</u>	
<b>Nombre y características.</b>	<b>Imagen.</b>
<p style="text-align: center;"><b>Lentes de protección</b></p> <p>Material ligero de fibra de vidrio o mica. Resistentes a altas temperaturas.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Mascarilla de dos filtros para gases, vapores y ácidos</b></p> <p>Fácil de desmontar. Peso mediano. Capacidad de utilizar varios filtros. Multi tallas.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Bata de laboratorio</b></p> <p>Color: Blanco Resistentes a materiales corrosivos. Cubre hasta las rodillas. Fácil de limpiar.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Guantes de látex</b></p> <p>Desechables de un solo uso. Protección frente a sustancias peligrosas. Extremadamente elásticos. Fácil colocación.</p>	

En la **tabla (17)** se muestra el equipo utilizado durante el proceso de implantación práctica de los filtros. En orden descendente se muestra el aerógrafo de doble acción de 30 a 45 PSI modelo eclipse HP-CS de la compañía IWATA, el compresor de 58 PSI máximo de la compañía central-pneumatic, vasos de precipitado de 150 ml, pinzas de laboratorio metálicas, espátulas de

laboratorio metálicas, pipetas de plástico de un solo uso, plancha calefactora de 300 mm de largo por 300 mm de ancho para temperaturas de hasta 450 °C, una báscula de precisión con una capacidad de 4200g, un limpiador ultrasónico con una frecuencia de ultrasonido de 42000Hz y cajas de Petri de plástico. Además, se muestran cables caimanes de punta metálica con una capacidad de 5A, soldadura con un 60% de estaño y 40% de plomo, cautín para soldar de 5 a 40 W con una temperatura máxima de 450°C y por último la cinta para enmascarar con alta resistencia a solventes químicos.

**Tabla (17).** Instrumentos de laboratorio y herramientas utilizados para la implementación de los filtros FL.

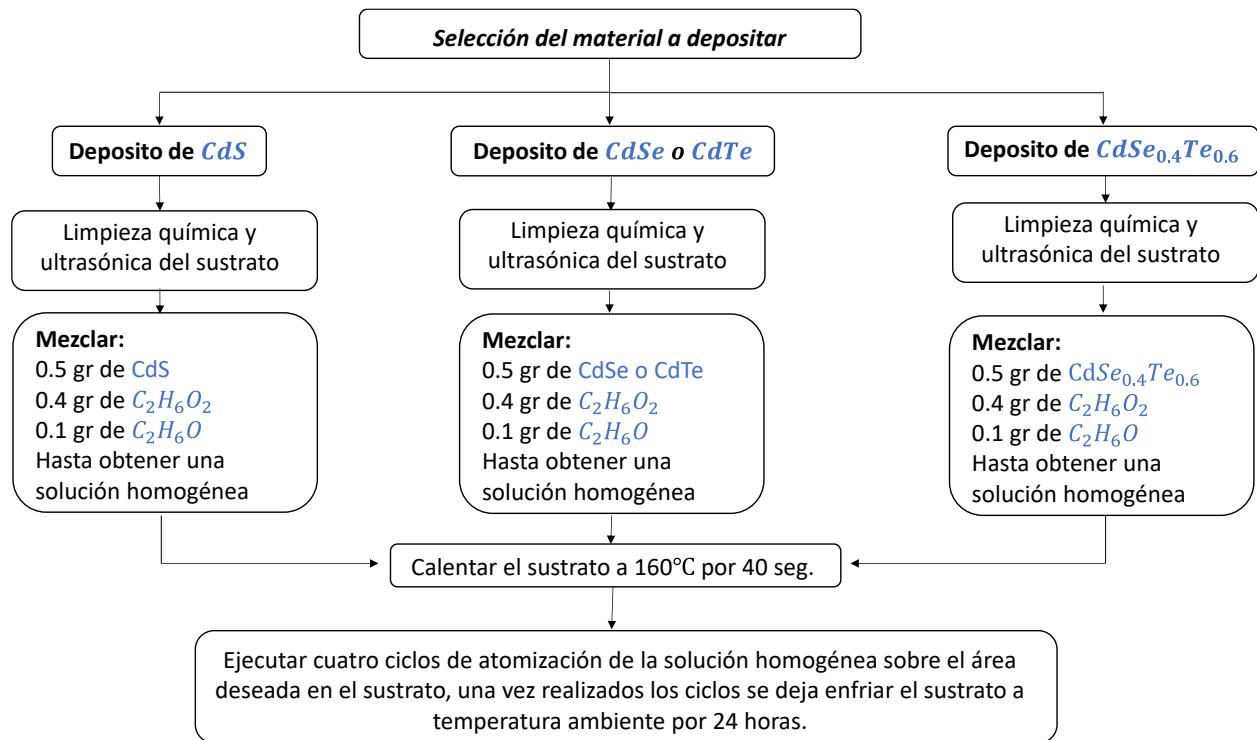
<b>Instrumentos de laboratorio y herramientas.</b>	
<b>Nombre y características.</b>	<b>Imagen.</b>
<p style="text-align: center;"><b>Aerógrafo</b>                      Modelo: eclipse HP-CS                      Doble acción.                      30 PSI – 45 PSI                      Depósito de alimentación por gravedad de 7ml                      Compañía: IWATA</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Compresor</b>                      Marca: Central Pneumatic                      58 PSI Max                      1/5 HP</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Vasos de precipitado</b>                      Material: Vidrio.                      Fácil de limpiar.                      Forma: Cilíndrica.                      Capacidad: 150 ml.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Pinzas</b>                      Material: Metal (comúnmente de aluminio)                      Fácil de manejar.</p>	

<p><b>Espátulas de laboratorio</b></p> <p>Material: Metal (comúnmente de aluminio) Fácil de limpiar.</p>	
<p><b>Pipetas</b></p> <p>Material: Plástico Desechables de un solo uso.</p>	
<p><b>Placa calefactora de laboratorio</b></p> <p>300 mm x 300 mm Base de cerámica resistente al calor. Por lo general alcanzan temperaturas de 450<sup>0</sup>C</p>	
<p><b>Báscula de precisión</b></p> <p>Capacidad 4200 g. Lectura: 0.01g Tiempo de estabilización: 0.3 S</p>	
<p><b>Limpiador Ultrasonico</b></p> <p>Energía de ultrasonidos: Duración 35W Control: Digitales control de 0 a 30 minutos Voltaje de Entrada: AC 100 - 120V, 50 / 60Hz Frecuencia de la onda de ultrasonido: 42 000Hz Material Exterior: Acero inoxidable</p>	

<p><b>Caja Petri estéril</b></p> <p>Material: Plástico. Circular.</p>	
<p><b>Cables Caimán</b></p> <p>Punta metálica. Corriente máxima: 5A Longitud: 10 cm.</p>	
<p><b>Estaño para soldar</b></p> <p>60% estaño y 40% plomo</p>	
<p><b>Cautín para soldar</b></p> <p>Potencia: 5 a 40W Temperatura máxima: 450°C</p>	
<p><b>Cinta para enmascarar</b></p> <p>Fácil desprendimiento. Resistente a la humedad. Alta resistencia a solventes químicos.</p>	

## 4.2 Procedimientos para la implementación de los Filtros FL.

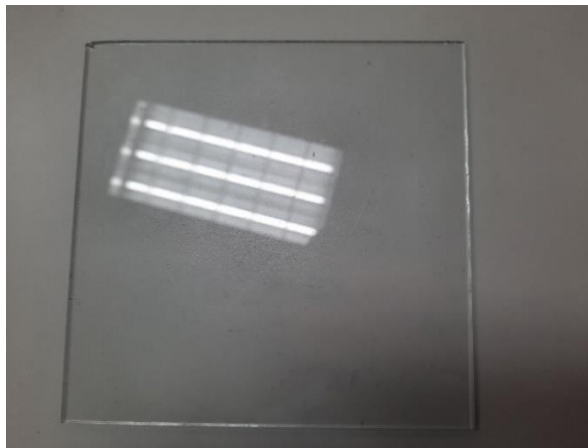
En este apartado se describe paso a paso los procedimientos utilizados para la preparación e implementación de los filtros. La **figura (30)** muestra un diagrama a bloque del procedimiento seguido para la implementación en el sustrato de vidrio de los filtros. La técnica de depósito utilizada se aspersión pirolítica. Independientemente del material a depositar el primer paso consiste en realizar una limpieza química y ultrasónica del sustrato. Enseguida, se genera una mezcla homogénea 50/40/10 del CC a depositar con sus disolventes. Por ejemplo, para el primer calcogenuro se pesan 0.6 gr CdS, 0.5 gr de  $C_2H_6O_2$  (etilenglicol), y 0.1 gr de  $C_2H_6O$  (etanol), posteriormente se mezclan hasta formar una solución homogénea. Se calienta el sustrato a  $160^\circ C$  por 40 s. Sobre el sustrato caliente se realizan cuatro ciclos de atomización de la solución homogénea sobre el área deseada en el sustrato. Finalmente se deja enfriar el sustrato a temperatura ambiente por 24 horas. Este procedimiento se repite para cada CC, y en los siguientes apartados se explican los detalles de cada paso.



**Figura (30)** Diagrama a bloques del procedimiento seguido para implementar los filtros FL.

#### 4.2.1 Preparación del sustrato.

El sustrato utilizado es un vidrio soda-lima de 6.6 cm de largo, 7.2 cm de ancho y 0.1 cm de espesor, el cual tiene una transmitancia del 90% al estándar AM1.5G, tal como el mostrado en la **figura (31)**. Antes de utilizar el sustrato es necesario limpiarlo cuidadosamente. El proceso de limpieza consiste en enjuagarlo con agua desionizada y jabón, posteriormente se sumerge en un vaso de precipitado con agua o acetona y se colocan en un limpiador ultrasónico. Se realizan uno o dos ciclos de 5 minutos en el limpiador ultrasónico. Una vez que termina el ciclo de limpieza en el equipo ultrasónico, se retira cuidadosamente el sustrato con unas pinzas y se seca con aire comprimido. Una vez que el sustrato se encuentra limpio se coloca en una caja Petri mientras se preparan los materiales a ser depositados.

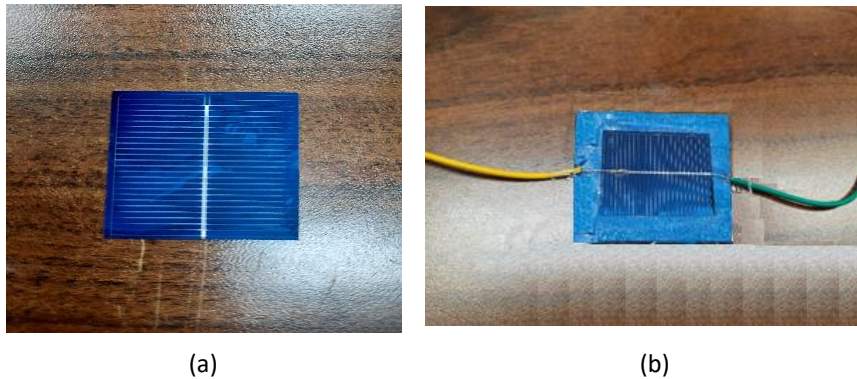


**Figura (31)** Sustrato de vidrio soda-lima utilizado.

#### 4.2.2 Preparación de la celda solar.

La **figura (32a)** y **(32b)** muestran la celda solar utilizada, tal como se recibió del fabricante y con las terminales soldadas, respectivamente. Es una celda de Silicio de la compañía Mazava, genera un  $V_{oc}$  de 0.5 V y una  $I_{sc}$  0.5 A y es capaz de suministrar 0.25 W de potencia de salida. Para utilizarla fue necesario soldar las terminales de la celda. Procurando no engrasar la parte frontal de la celda con los dedos de las manos se sujetó y utilizando un cautín y la soldadura de estaño soldaron cables con punta caimán a las terminales positivo y negativo. Una vez soldadas las terminales, se guarda en un recipiente con cubierta para protegerla hasta que se requiera su uso. Hay que enfatizar que este proceso se realizó con extremo cuidado ya que las celdas solares son

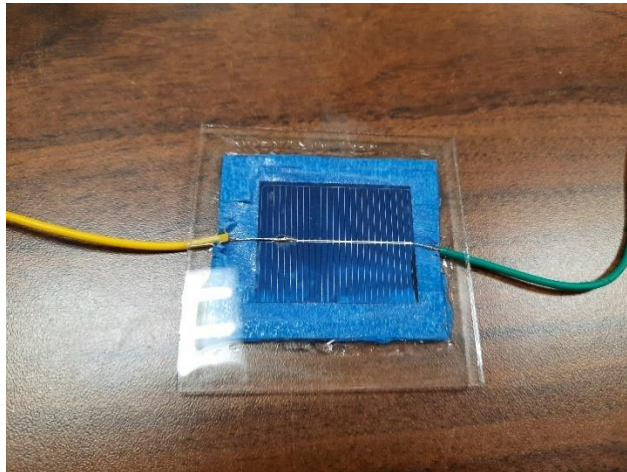
demasiado frágiles y cualquier movimiento brusco o presión sobre la celda puede dañarla e incluso destruirla.



**Figura (32)** Celda solar utilizada, (a) celda tal y como se adquirió del fabricante, (b) soldado de terminales.

#### 4.2.3 Preparación celda solar sin filtro o de referencia.

Se implementó una celda solar con vidrio soda-lima en la parte frontal, la cual se utilizó como referencia para estimar los cambios en los parámetros de desempeño provocados una vez que se adhirieran los filtros a su correspondiente celda. La **figura (33)** muestra el combo de la celda solar de Si adherida al vidrio soda-lima. En esta figura se puede observar la necesidad de sellar o pegar la celda al vidrio para facilitar el manejo. El proceso de sellado se describe en el siguiente apartado



**Figura (33)** Combo de la celda solar de Si adherida al vidrio soda-lima.

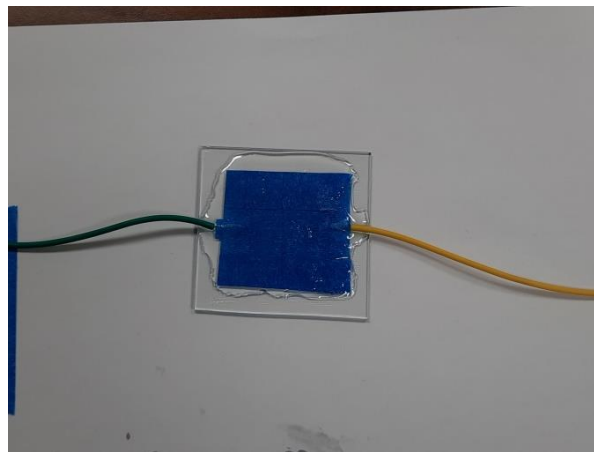
##### 4.2.3.1 Encapsulado de la celda solar.

Con motivo de poder manejar de manera segura la celda de referencia sin filtro, esta fue encapsulada utilizando resina epóxica. La resina epóxica utilizada consiste en E-3000/A que es la

resina y el catalizador E-3000/B de la compañía Sayer. Para prepararse, se genera una mezcla resina-catalizador con proporción 50/50, es decir 50% de resina y 50% de catalizador que posteriormente se mezclan hasta tener un compuesto uniforme. La cantidad de resina y catalizador necesaria depende del área que se desea cubrir con la resina. La **ecuación (29)** se utiliza para este propósito y es recomendada por la compañía Sayer. Para el caso del encapsulado de la celda de referencia se tomó en consideración las medidas del sustrato utilizado.

$$\text{Cantidad de resina} = \text{Base} * \text{Altura} * \frac{0.08}{2} \quad (29)$$

El sustrato de vidrio utilizado en este trabajo mide 6.6 cm de ancho por 7.2 de largo. Por lo tanto, utilizando la **ecuación (29)** se encontró que era necesario realizar una mezcla de 2 ml de resina con 2 ml del catalizador. Posteriormente se mezclaron agitándolos durante 10 minutos hasta que la mezcla se vea transparente. Después se dejó la mezcla por un periodo entre 30 a 60 minutos. Mientras que la resina se encontraba en reposo, la celda se colocó sobre el sustrato y con cinta para enmascarar se cubrió completamente pegando la celda al vidrio. Esto se realizó para que al momento adherir la resina esta no se infiltra entre la parte posterior de la celda y el sustrato y prevenir el mal funcionamiento de la celda. Una vez transcurrido el periodo de reposo de la resina este se adhirió al combo celda-vidrio y se esparció con una peque espátula para cubrir el área deseada tal como de muestra en la **figura (34)**.

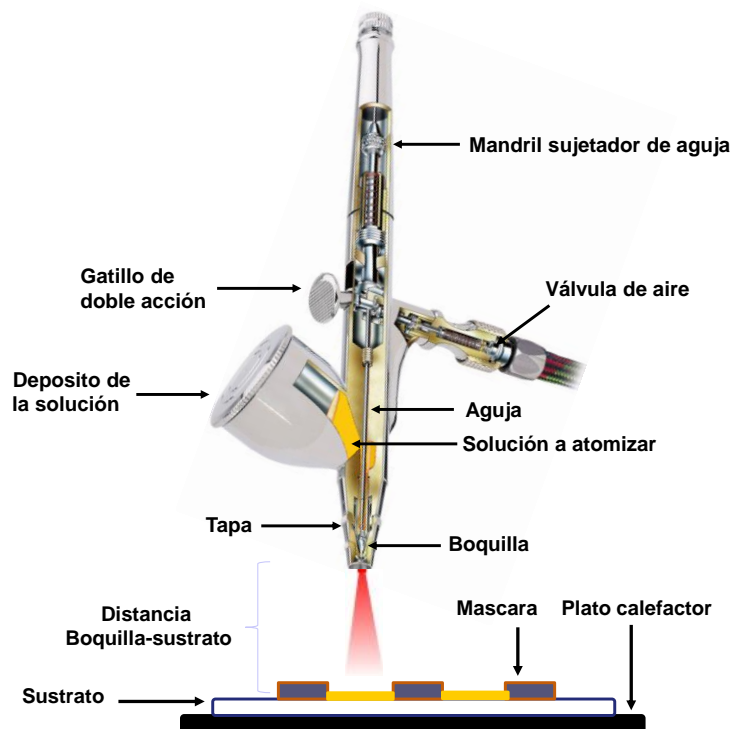


**Figura (34)** Combo de la celda solar de Si adherida al vidrio soda-lima,

Una vez que se termina de esparcir la resina se coloca el combo celda-vidrio en un recipiente seguro y se deja reposar por tiempo que ve entre 24 a 48 horas para que la resina se seque.

#### 4.2.4 Herramienta principal para la deposición de los filtros FL basados en CC.

La herramienta principal utilizada para depositar los CC en el sustrato de vidrio es un micro aerógrafo accionado con aire el cual rocía una solución líquida sobre una superficie por atomización o nebulización. Los aerógrafos estándar usan rociado de chorro de aire presurizado para la atomización. La **figura (35)** muestra una imagen de una micropistola aerógrafo comercial. La mayoría de las micropistolas de aerógrafo comerciales se alimentan por gravedad con doble acción y mezcla interna. Otras se alimentan por succión o se alimentan lateralmente, lo que permite al usuario trabajar en diferentes ángulos, como apuntar hacia arriba; sin embargo, esto no es necesario para la deposición uniforme de una sola capa. La doble acción se activa mediante el gatillo de doble acción, que permite controlar la cantidad de aire de salida y la solución de forma independiente. El patrón de rociado definido como la figura que se ve en la forma de la sección transversal del rociado se establece por el tamaño de la boquilla y la aguja. Algunos micro aerógrafos comerciales vienen con algunos juegos de boquillas y agujas de diferentes calibres; por lo tanto, el usuario puede cambiar el tamaño del patrón de rociado según el área a depositar.



**Figura (35)** Pistola micro aerógrafo y sus principales componentes.

En este trabajo de tesis, se desarrolló e implementó el procedimiento para depositar con una micro pistola aerógrafo películas delgadas de CC, mostrado en la **figura (30)**. Los CC

depositados fueron CdS, CdSe, CdTe y CdSeTe. El aerógrafo utilizado emplea un chorro de aire a presión de doble acción con una boquilla de 0.35 mm para rociar la solución sobre un sustrato. Un análisis exhaustivo de las propiedades ópticas y eléctricas de los dispositivos obtenidos confirmó la sencilla funcionalidad del procedimiento de fabricación desarrollado.

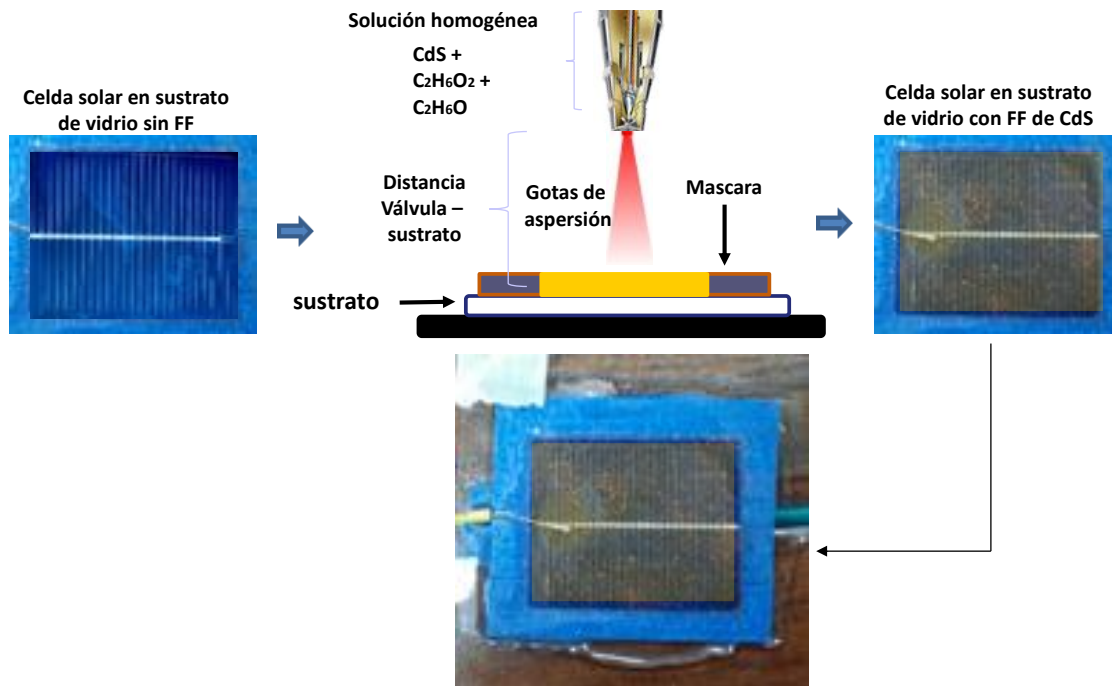
#### 4.2.4.1 Implementación práctica del filtro FL de CdS.

Antes de realizar el depósito del CdS sobre el sustrato de vidrio se realizó el sellado de la celda solar sobre el sustrato con resina epóxica. Se colocó la celda solar sobre el sustrato cuidando de no realizar movimientos bruscos que podría dañar la celda. Las celdas adquiridas son demasiado frágiles por no traer de fábrica sustrato de vidrio adherido. Posteriormente, se cubrió la celda con la cinta para enmascarar y se vertió la resina encima para encapsularla. Se volvió a colocar la celda en un recipiente y se deja reposar entre 24 horas.

La implementación práctica del filtro de CdS se realizó siguiente el procedimiento descrito en la **figura (30)**. Se realizó la limpieza química y ultrasónica del sustrato iniciando por un lavado con jabón y agua desionizada, posteriormente se sometió a un ciclo de 5 minutos de limpieza ultrasónica en alcohol isopropílico. Para prepara la solución a depositar, en un pequeño vaso de precipitado se vierte 1 gr de CdS, 0.8 gr de Etilenglicol y 0.2 gr de Etanol. Después, se mezcló hasta obtener una solución homogénea con una viscosidad necesaria para que el aerógrafo pudiera atomizar la solución en el sustrato. Cuando la mezcla queda demasiado espesa se agregar 0.2 gr más de Etanol a la solución para volverla más líquida. Una vez que la solución esta lista, se vertió en el depósito del aerógrafo.

Antes de realizar la deposición se calentó el sustrato en una placa calefactora durante 30 segundos a una temperatura entre 160°C. Una vez cumplido el tiempo de calentamiento del sustrato, este se colocó dentro de una campana de extracción para evitar el contacto directo con el vapor presurizado del atomizador. Posteriormente se realizaron cuatro ciclos de atomización sobre el área deseada del sustrato. Una vez realizad la deposición, el sustrato se coloca dentro de la caja Petri y se deja reposar durante 24 horas para que el material depositado se adhiera a la superficie del sustrato. La **figura (36)** muestra el proceso de aspersion realizado. En esta figura se puede observar que en el producto final una pequeña capa de CdS sobre el sustrato de vidrio,

también se pueden observar pequeños grumos de CdS los cuales se pueden atribuir a la falta de uniformidad en la atomización de la solución.



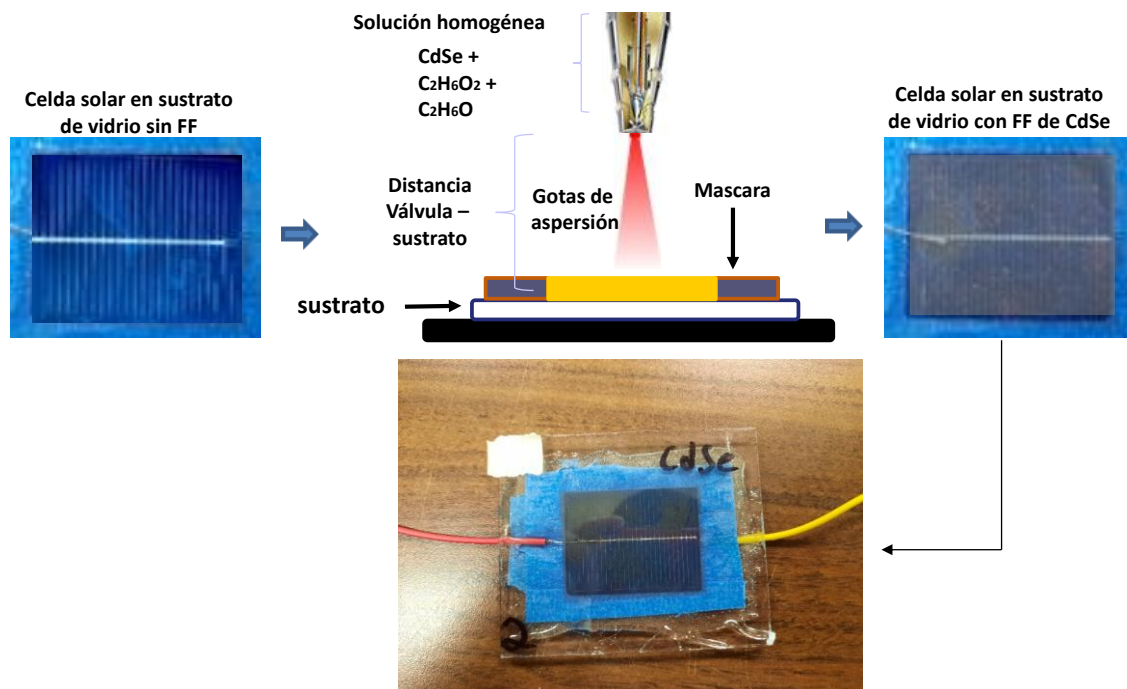
**Figura (36)** Proceso de depósito del CdS sobre el sustrato de vidrio utilizando aspersión.

#### 4.2.4.2 Implementación práctica del filtro FL de CdSe.

De manera similar que, en el caso anterior, antes de realizar el depósito del CdSe sobre el sustrato de vidrio se realizó el sellado de la celda solar sobre el sustrato con resina epóxica. Se colocó la celda solar sobre el sustrato, se cubrió la celda con la cinta para enmascarar y se vertió la resina encima para encapsularla. Se volvió a colocar la celda en un recipiente y se deja reposar entre 24 horas.

La implementación práctica del filtro de CdSe se realizó siguiente el procedimiento descrito en la **figura (30)**. Se realizó la limpieza química y ultrasónica del sustrato. Posteriormente se prepara la solución a depositar, en un pequeño vaso de precipitado se vierte 1 gr de CdSe, 0.8 gr de Etilenglicol y 0.2 gr de Etanol. Después, se mezcló hasta obtener una solución homogénea con una viscosidad necesaria para que el aerógrafo pudiera atomizar la solución en el sustrato. Una vez que la solución está lista, se vertió en el depósito del aerógrafo. Después, se calentó el sustrato en una placa calefactora durante 30 segundos a una temperatura entre 160°C. Una vez cumplido el tiempo de calentamiento del sustrato, este se colocó dentro de una campana de

extracción para evitar el contacto directo con el vapor presurizado del atomizador. Posteriormente se realizaron cuatro ciclos de atomización sobre el área deseada del sustrato. Una vez realizada la deposición, el sustrato se coloca dentro de la caja Petri y se deja reposar durante 24 horas para que el material depositado se adhiera a la superficie del sustrato. La **figura (37)** muestra el proceso de aspersión realizado. En esta figura se puede observar que en el producto final una pequeña capa de CdSe sobre el sustrato de vidrio, también se pueden observar que a diferencia del caso anterior no se observan grumos de CdSe lo cual se pueden atribuir a una mejor viscosidad lograda en la mezcla de los componentes.



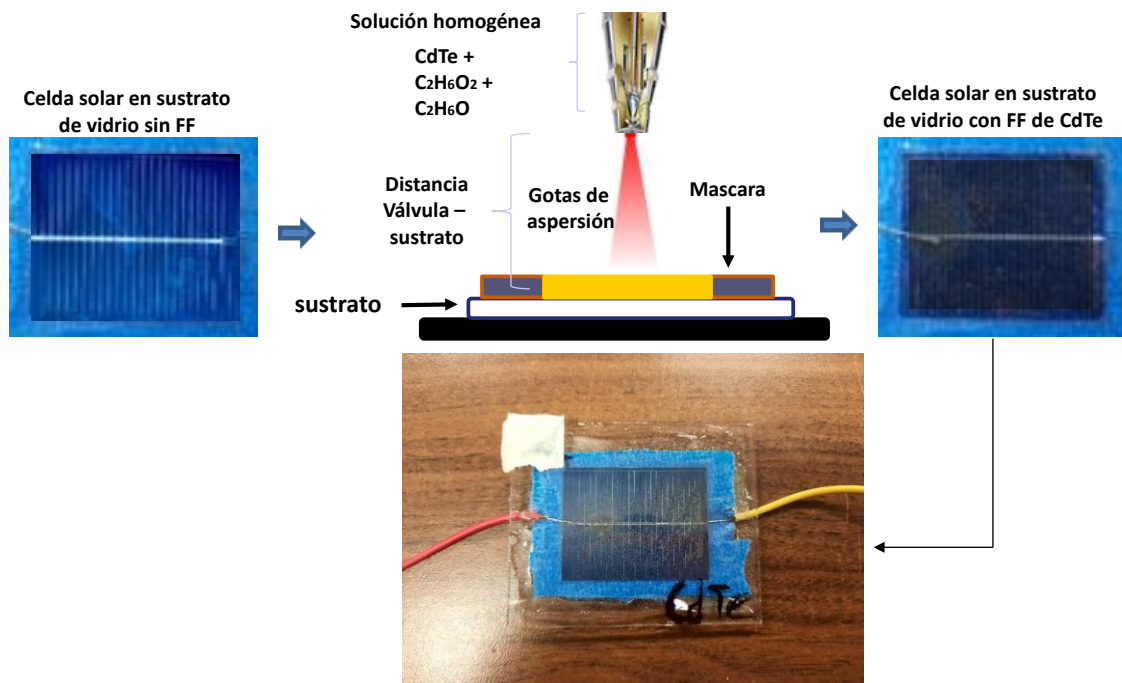
**Figura (37)** Proceso de depósito del CdSe sobre el sustrato de vidrio utilizando aspersión.

#### 4.2.4.3 Implementación práctica del filtro FL de CdTe.

De manera similar que los dos casos anteriores, antes de realizar el depósito del CdTe sobre el sustrato de vidrio se realizó el sellado de la celda solar sobre el sustrato con resina epóxica. Se colocó la celda solar sobre el sustrato, se cubrió la celda con la cinta para enmascarar y se vertió la resina encima para encapsularla. Se volvió a colocar la celda en un recipiente y se deja reposar entre 24 horas.

La implementación práctica del filtro de CdTe se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la **figura (30)**. Se realizó la limpieza química y ultrasónica del sustrato. Posteriormente

se prepara la solución a depositar, en un pequeño vaso de precipitado se vierte 1 gr de CdTe, 0.8 gr de Etilenglicol y 0.2 gr de Etanol. Después, se mezcló hasta obtener una solución homogénea con una viscosidad necesaria para que el aerógrafo pudiera atomizar la solución en el sustrato. Una vez que la solución esta lista, se vertió en el depósito del aerógrafo. Después, se calentó el sustrato en una placa calefactora durante 30 segundos a una temperatura entre 160°C. Una vez cumplido el tiempo de calentamiento del sustrato, este se colocó dentro de una campana de extracción para evitar el contacto directo con el vapor presurizado del atomizador. Posteriormente se realizaron cuatro ciclos de atomización sobre el área deseada del sustrato. Una vez realizad la deposición, el sustrato se coloca dentro de la caja Petri y se deja reposar durante 24 horas para que el material depositado se adhiriera a la superficie del sustrato. La **figura (38)** muestra el proceso de aspersión realizado. En esta figura se puede observar que en el producto final una pequeña capa de CdTe sobre el sustrato de vidrio, también se pueden observar que de manera similar al depósito de CdSe no se observan grumos de CdTe lo cual se pueden atribuir a una mejor viscosidad lograda en la mezcla de los componentes.



**Figura (38)** Proceso de depósito del CdTe sobre el sustrato de vidrio utilizando aspersión.

#### 4.2.4.4 Implementación práctica del filtro FL de $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$

Para el caso de la implementación del filtro con el material ternario se procedió de manera similar a los casos anteriores. Antes de realizar el depósito del  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$  sobre el sustrato de vidrio se realizó el sellado de la celda solar sobre el sustrato con resina epóxica. Se colocó la celda solar sobre el sustrato, se cubrió la celda con la cinta para enmascarar y se vertió la resina encima para encapsularla. Se volvió a colocar la celda en un recipiente y se deja reposar entre 24 horas.

La implementación práctica del filtro de  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$  se realizó siguiente el procedimiento descrito en la **figura (30)**. Se realizó la limpieza química y ultrasónica del sustrato. Posteriormente se prepara la solución a depositar, en un pequeño vaso de precipitado se vierte 1 gr de  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ , 0.8 gr de Etilenglicol y 0.2 gr de Etanol. Después, se mezcló hasta obtener una solución homogénea con una viscosidad necesaria para que el aerógrafo pudiera atomizar la solución en el sustrato. Una vez que la solución esta lista, se vertió en el depósito del aerógrafo. Después, se calentó el sustrato en una placa calefactora durante 30 segundos a una temperatura entre  $160^{\circ}\text{C}$ . Una vez cumplido el tiempo de calentamiento del sustrato, este se colocó dentro de una campana de extracción para evitar el contacto directo con el vapor presurizado del atomizador. Posteriormente se realizaron cuatro ciclos de atomización sobre el área deseada del sustrato. Una vez realizad la deposición, el sustrato se coloca dentro de la caja Petri y se deja reposar durante 24 horas para que el material depositado se adhiera a la superficie del sustrato. La **figura (39)** muestra el proceso de aspersión realizado. En esta figura se puede observar que en el producto final una pequeña capa de  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$  sobre el sustrato de vidrio, también se pueden observar que de manera similar al depósito de CdSe y CdTe no se observaron grumos de  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$  lo cual se pueden atribuir a una mejor viscosidad lograda en la mezcla de los componentes.

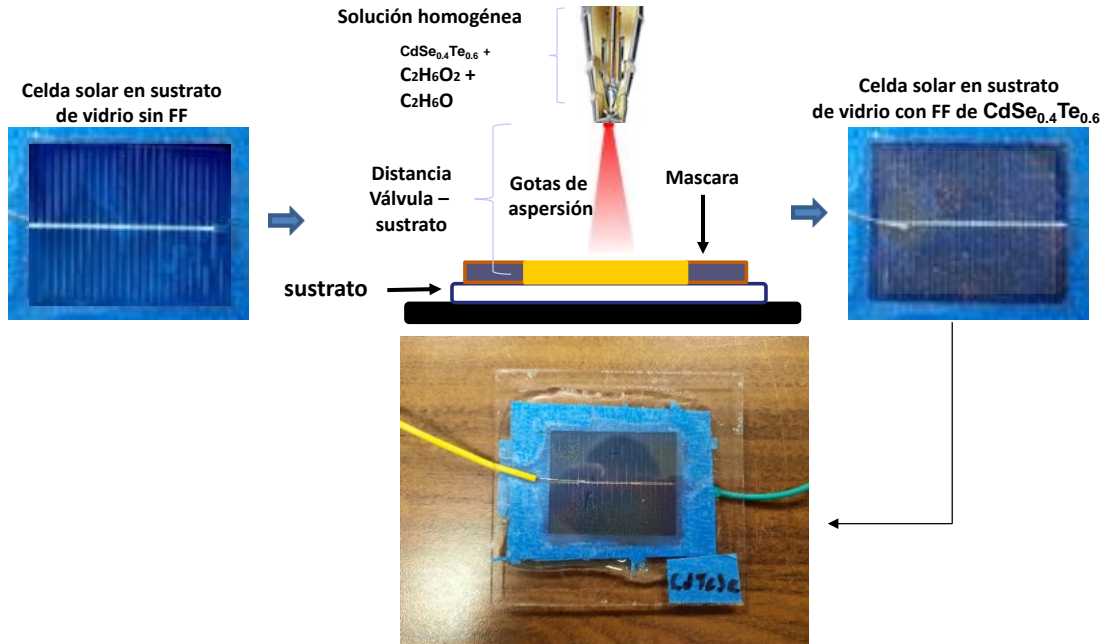


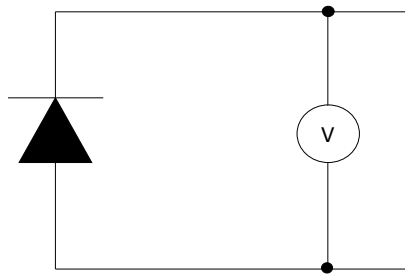
Figura (39) Proceso de depósito del  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$  sobre el sustrato de vidrio utilizando aspersión.

#### 4.3 Pruebas de caracterización del desempeño.

Para encontrar el efecto que cada uno de los filtros tiene en los parámetros de desempeño de la celda solar de Si, se realizaron mediciones prácticas del  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y se obtuvo la curva I-V de cada implementación para encontrar la eficiencia de conversión. En los siguientes apartados se describen las pruebas realizadas.

##### 4.3.1 Pruebas de circuito abierto.

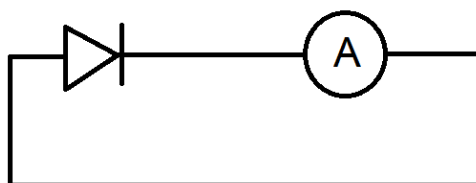
Esta prueba se le realizó a la implementación de celda solar con su correspondiente filtro. Para realizar la prueba se utilizó un multímetro de alta resolución de marca Hewlett Packard, modelo 3458A y una lámpara de alógeno simuladora del estándar AM1.5G de 140  $\text{watts/m}^2$  de densidad potencia de marca Bayco. Se configuró el multímetro para medir voltaje y se conectó en paralelo a la celda solar con filtro, tal como se muestra en la **figura (40)**. Se iluminó la celda con el filtro con la lámpara a una distancia promedio de 1 metro y se midió el voltaje generado. Este voltaje es conocido como voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y teóricamente representa el voltaje máximo generado por la celda lo cual ocurre cuando la corriente es cero.



**Figura (40)** Circuito de conexión para la prueba de voltaje de circuito abierto.

#### 4.3.2 Pruebas de corto circuito.

De la misma manera que en el caso de pruebas de circuito abierto, esta prueba se le realizó a la implementación de celda solar con su correspondiente filtro. Para realizar la prueba se utilizó un multímetro de alta resolución de marca Hewlett Packard y modelo 3458A y una lámpara de alógeno simuladora del estándar AM1.5G de 140 watts/m<sup>2</sup> de densidad de potencia de marca Bayco. Se configuro el multímetro para medir corriente y se conectó en serie a la celda solar con filtro, tal como se muestra en la **figura (41)**. Se ilumino la celda solar con la lámpara a una distancia promedio de 1 metro y se midió la corriente generada. Esta corriente es conocida como corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ) y teóricamente representa la máxima generada por la celda lo cual ocurre cuando el voltaje es cero.

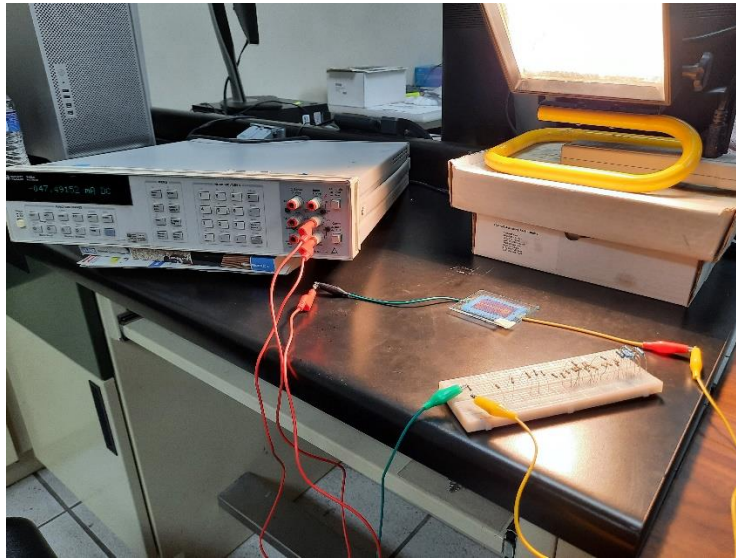


**Figura (41)** Circuito de conexión para la prueba de corriente de corto circuito.

#### 4.3.3 Obtención de las curvas I-V de las implementaciones prácticas.

Esta prueba se le realizó a la implementación de celda solar con su correspondiente filtro. Para realizar la prueba se utilizó un multímetro de alta resolución de marca Hewlett Packard y modelo 3458A y una lámpara de alógeno simuladora del estándar AM1.5G de 140 watts/m<sup>2</sup> de densidad de potencia de marca Bayco y un conjunto de 31 resistencias de ¼ de watts. El conjunto de

resistencia varía entre  $1 \Omega$  y  $10 \text{ M}\Omega$ . Cada resistencia fue conectada en paralelo (carga) con la celda solar. Posteriormente, se ilumino la celda con la lámpara de alógeno a una distancia promedio de 1 metro y se realizó la medición del voltaje en la celda solar y la corriente en la maya formada por dicha conexión, tal como se muestra en **figura (42)**.



**Figura (42)** Circuito de conexión para la obtención de la curva I-V.

# Capítulo 5

## RESULTADOS OBTENIDOS

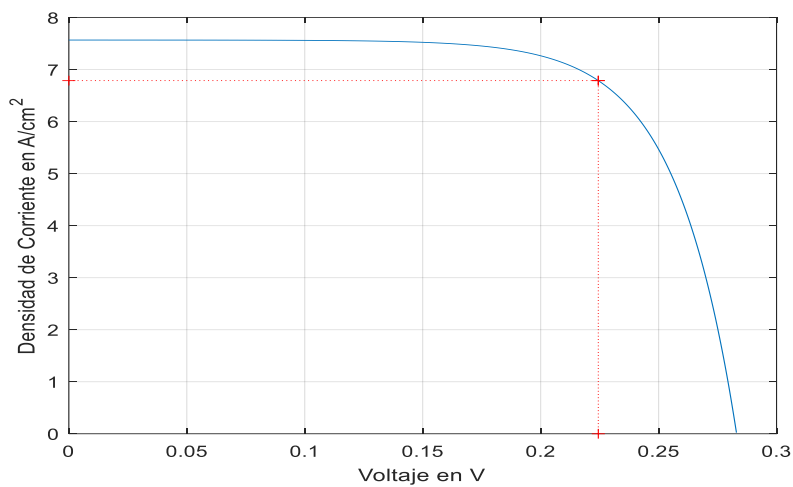
En el capítulo 3 se demostró teóricamente que el filtro FL de CdS muestra las mejores características de absorbanza y emisión para el propósito de este trabajo de tesis. Esto es considerando que el espectro de irradiación incidente el estándar AM1.5G y que se requiere un material que preferentemente o únicamente absorba la energía de las longitudes de onda menores a 450 nm y la retransmita en longitudes de onda entre 500 y 700 nm. En el caso especial de CdS tiene una alta absorbanza para longitudes de onda menores a 500 nm y una caída a cero relativamente abrupta entre 500 y 520 nm. Adicionalmente, el CdS tiene una fotoluminiscencia con distribución gaussiana que inicia de manera débil en los 400 nm y va aumentando hasta alcanzar un máximo alrededor de los 610 nm, posteriormente empieza a disminuir extendiéndose hasta 900 nm. Estas dos características de absorbanza y fotoluminiscencia satisfacen el requerimiento planteado para este trabajo.

Por lo tanto, en este capítulo, especialmente para la celda solar de Si sin filtro y la celda solar con filtro de CdS se presentan los resultados obtenidos de manera teórica, así como los resultados obtenidos de mediciones realizadas durante la implementación práctica. Adicionalmente, se presentan los resultados obtenidos durante la implementación práctica de los filtros de CdSe, CdTe y CdSe<sub>0.4</sub>Te<sub>0.6</sub>. Se realiza una comparación entre las características de desempeño obtenidas para cada caso y se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson para discutir la correlación lineal de cada parámetro de desempeño con la eficiencia de conversión, así como la correlación lineal entre los resultados teóricos y los encontrados de mediciones prácticas.

### 5.1 Resumen de los resultados obtenidos en el diseño teórico.

En la **figura (43)** se muestra la curva característica J-V de la celda solar de Si sin filtro obtenida de manera teórica. Para obtener esta grafica primero se calcularon los valores de  $J_{sc}$  y  $V_{oc}$  utilizando las **ecuaciones (22)** y **(23)**, respectivamente. Posteriormente, para el rango de voltajes de 0 volts a  $V_{oc}$  se asignaron 100 valores igualmente espaciados. Después, utilizando la **ecuación (27)** para cada valor de voltaje se encontró su densidad de corriente correspondiente. La curva J-V es resultado de graficar los voltajes vs las densidades de corriente. De la curva J-V se obtienen los

valores de voltaje máximo ( $V_{max}$ ) y densidad de corriente máxima ( $J_{max}$ ) que a su vez suministran la máxima potencia, los cuales están marcados con línea puntada en rojo. Utilizando las **ecuaciones (29)** y **(39)** y los parámetros  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{max}$  y  $J_{max}$  se encontraron el factor de llenado y la eficiencia de conversión ( $\eta_{power}$ ) respectivamente. En la **tabla (18)** se puede observar los valores de  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{max}$ ,  $J_{max}$ , factor de llenado y  $\eta_{power}$  obtenidos. En esta tabla se puede observar que la celda solar tiene una  $J_{sc}$  de  $7.5679 \text{ A/cm}^2$ , un  $V_{oc}$  de  $0.2830 \text{ V}$ , un factor de llenado de  $0.7114$  y una  $\eta_{power}$  de  $15.23\%$ . Estos valores teóricos son típicos de celdas solares de Si caracterizada en laboratorio bajo condiciones ideales.



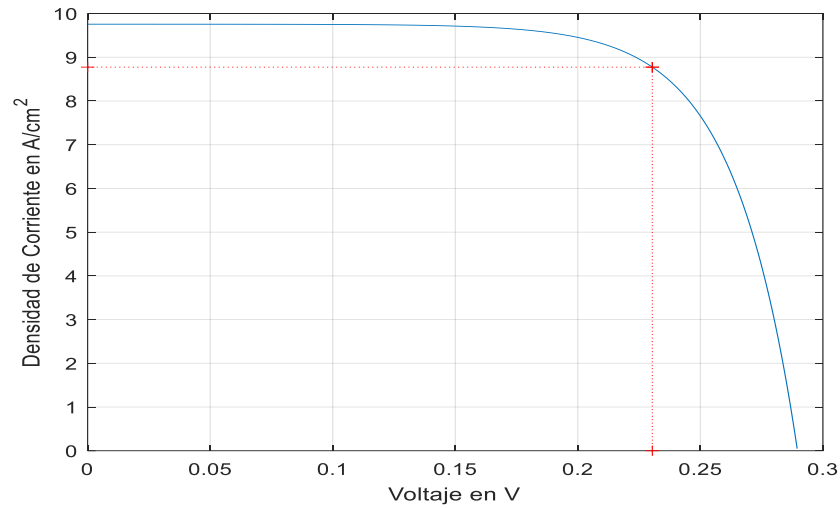
**Figura (43)** Curva característica J-V teórica de una celda solar de Si sin filtro.

**Tabla (18)** Resultados de la caracterización teórica de la celda solar de Si sin filtro FL.

Parámetro	Valor obtenido
$J_{sc}$	$7.5679 \text{ A/cm}^2$
$V_{oc}$	$0.2830 \text{ V}$
$J_{max}$	$6.8878 \text{ A/cm}^2$
$V_{max}$	$0.2244 \text{ V}$
Factor de llenado	$0.7114$
$\eta_{power}$	$15.23\%$

En la **figura (44)** se muestra la curva característica J-V de la celda solar de Si con filtro de CdS obtenida de manera teórica. Para obtener esta grafica se siguió el mismo procedimiento que en el caso anterior con la diferencia de que la tasa de generación de excitones utilizada es la resultante para el espectro posterior al filtro de CdS. Los valores de  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{max}$ ,  $J_{max}$ , Factor de

llenado y  $\eta_{power}$  se obtuvieron utilizando las ecuaciones (22), (23), (29) y (39). En la tabla (19) se puede observar los valores obtenidos. En esta tabla se puede observar que la celda solar tiene una  $J_{sc}$  de  $9.7565 \text{ A/cm}^2$ , un  $V_{oc}$  de  $0.7153$ , un factor de llenado de  $0.7153$  y una  $\eta_{power}$  de  $22.45\%$ . En esta tabla se puede observar que la densidad  $J_{sc}$  aumenta con el filtro lo que provoca que aumente la  $\eta_{power}$  un  $7\%$  comparada con la celda sin el filtro de CdS. Este resultado sugiere que el uso del filtro FL de CdS mejorar la eficiencia de conversión de una celda de Si.



**Figura (44)** Curva característica J-V teórica de una celda solar de Si con filtro FL de CdS.

**Tabla (19)** Resultados de la caracterización teórica de la celda solar de Si con filtro FL de CdS.

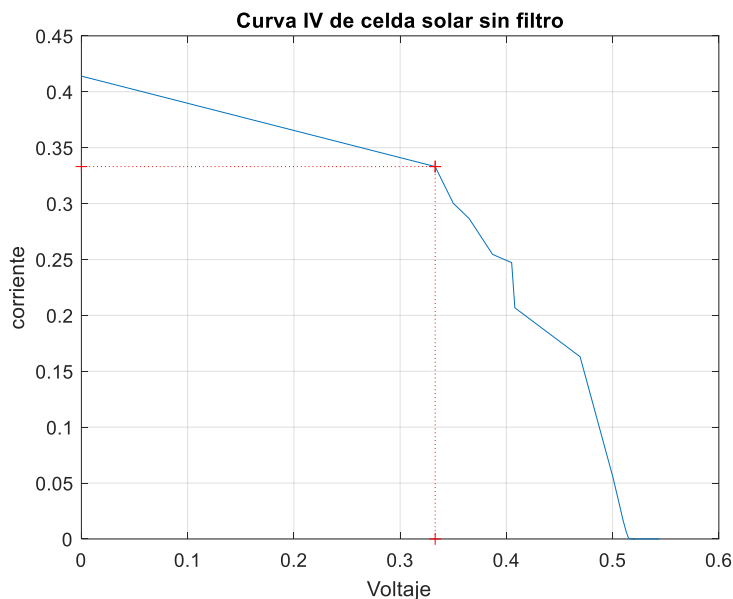
Parámetro	Valor obtenido
$J_{sc}$	$9.7565 \text{ A/cm}^2$
$V_{oc}$	$0.2895 \text{ V}$
$J_{max}$	$8.7740 \text{ A/cm}^2$
$V_{max}$	$0.2304 \text{ V}$
Factor de llenado	$0.7153$
$\eta_{power}$	$22.45\%$

## 5.2 Resumen de los resultados obtenidos en la implementación práctica.

Como se describió en el capítulo 4, se implementaron y probaron los filtros basados en CC sobre el vidrio frontal de celdas de Si. Para la implementación de cada filtro se utilizó un mínimo de 48 horas, desde la preparación de los materiales hasta la deposición y secado de los mismos en el vidrio frontal de las celdas. Y para las pruebas y mediciones prácticas se utilizó el equipo y procedimiento descrito en el capítulo 4. En especial, en este apartado se describen los resultados

obtenidos de mediciones realizadas durante la implementación práctica de la celda solar sin filtro así como con filtro FL de CdS, CdSe, CdTe y CdSe<sub>0.4</sub>Te<sub>0.6</sub>.

En la **figura (45)** se puede observar la curva característica I-V de la celda solar sin filtro. Esta curva fue obtenida tras realizar las mediciones de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y de voltajes y corrientes para cada una de las 31 resistencias utilizadas como carga. En esta curva se puede observar una morfología típica de la curva I-V de una celda solar acepto que la curva tiene irregularidades en la parte descendente. Esto se debe a que a diferencia de la curva encontrada teóricamente, donde se utilizaron 100 valores de voltaje en el rango entre 0 volts y  $V_{oc}$ , aquí solo se utilizaron 31 resistencia que dan 31 valores en el mismo rango, lo que provoca estos cambios bruscos en la curva. En la **tabla (20)** se puede observar los valores de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ , factor de llenado y  $\eta_{power}$  obtenidos. En esta tabla se puede observar que la celda solar tiene una  $I_{sc}$  de 0.414 A, un  $V_{oc}$  de 0.544 V, un factor de llenado de 0.493 y una  $\eta_{power}$  de 12.3%. Estos valores teóricos son típicos de celdas solares de Si caracterizada en laboratorio bajo condiciones ideales. Estos valores son muy cercanos a los proveídos por el fabricante en las especificaciones de la celda utilizada.

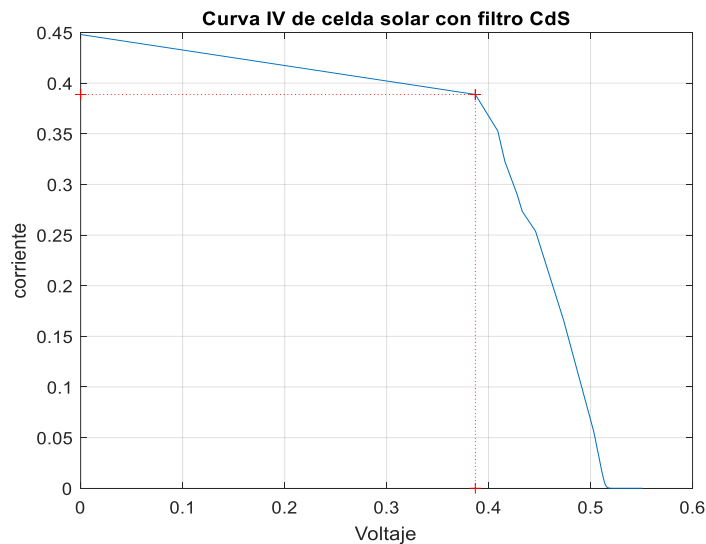


**Figura (45)** Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si sin filtro FL.

**Tabla (20)** Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si sin filtro FL.

Parámetro	Valor obtenido
$I_{sc}$	0.414 A
$V_{oc}$	0.544 V
$I_{max}$	0.3330 A
$V_{max}$	0.333 V
Factor de llenado	0.493
$\eta_{power}$	12.3%

En la **figura (46)** se puede observar la curva característica I-V de la celda solar con filtro de CdS obtenida de mediciones prácticas. Igual que en el caso anterior, esta curva fue obtenida tras realizar las mediciones de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y de voltajes y corrientes para cada una de las 31 resistencias utilizadas como carga. En esta curva se puede observar también una morfología típica de la curva I-V de una celda solar excepto que a diferencia de la anterior esta no cuenta con tantas irregularidades en la parte descendente de la curva. Esto se puede deber a la compensación de voltaje y corriente que suministra la fotoluminiscencia del filtro. En la **tabla (21)** se puede observar los valores de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ , factor de llenado y  $\eta_{power}$  obtenidos. En esta tabla se puede observar que la celda solar con filtro de CdS tiene una  $I_{sc}$  de 0.448 A, un  $V_{oc}$  de 0.5509 V, un factor de llenado de 0.609 y una  $\eta_{power}$  de 16.7%. También se puede observar que el dispositivo con filtro de CdS tiene un incremento considerable en la eficiencia de conversión en comparación con el dispositivo sin filtro, hasta un 4.4%. Esto muestra que el CdS cumple con la función de mejorar la eficiencia de la celda tal como se predijo teóricamente.



**Figura (46)** Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si con filtro FL de CdS.

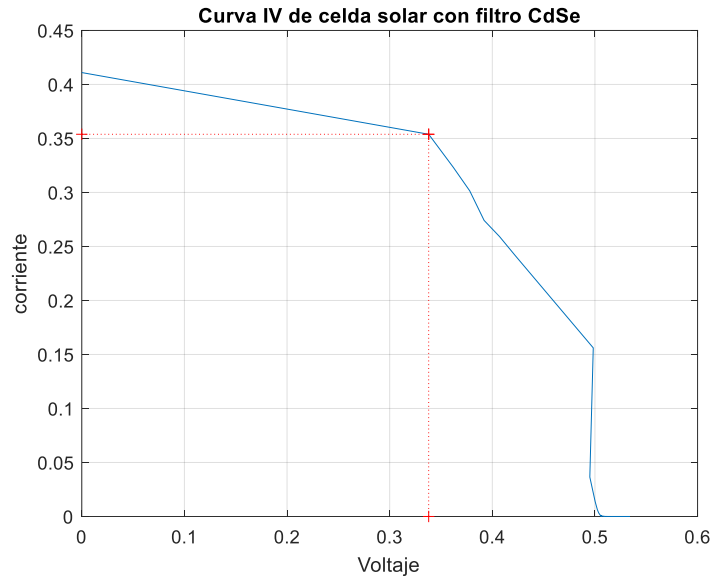
**Tabla (21)** Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si con filtro de CdS.

Parámetro	Valor obtenido
$I_{sc}$	0.448 A
$V_{oc}$	0.5509 V
$I_{max}$	0.3887 A
$V_{max}$	0.387 V
Fill factor	0.609
$\eta_{power}$	16.7%

En la **figura (47)** se observa la curva característica I-V de la celda solar con filtro de CdSe obtenida de mediciones prácticas. Igualmente, a los casos anteriores con las celdas sin filtro y filtro de CdS, esta curva fue obtenida tras realizar las mediciones de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y de voltajes y corrientes para cada una de las 31 resistencias utilizadas como carga. En esta curva se observa una morfología típica de la curva I-V de una celda solar excepto que a diferencia de la celda anterior esta vuelve a presentar irregularidades en la parte descendente de la curva. Esto es debido a la cantidad de mediciones realizadas, por lo que la resolución en este rango es baja, provocando estos cambios bruscos en la curva. En la **tabla (22)** se puede observar los valores de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ , factor de llenado y  $\eta_{power}$  obtenidos. En esta tabla se puede observar que la celda solar con filtro de CdSe tiene una  $I_{sc}$  de 0.411 A, un  $V_{oc}$  de 0.5341 V, un fill factor de 0.545 y una  $\eta_{power}$  de 13.3%. También se puede observar que el dispositivo con filtro de CdSe tiene un incremento del 1% en la eficiencia de conversión en comparación con el dispositivo sin filtro y un 3.4% menor en comparación al dispositivo con filtro de CdS. Esto demuestra que el CdSe cumple con la función de mejorar la eficiencia de la celda, pero es opacado en comparación con el filtro de CdS.

**Tabla (22)** Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si con filtro de CdSE.

Parámetro	Valor obtenido
$I_{sc}$	0.411 A
$V_{oc}$	0.5341 V
$I_{max}$	0.3538 A
$V_{max}$	0.338 V
Factor de llenado	0.545
$\eta_{power}$	13.3%

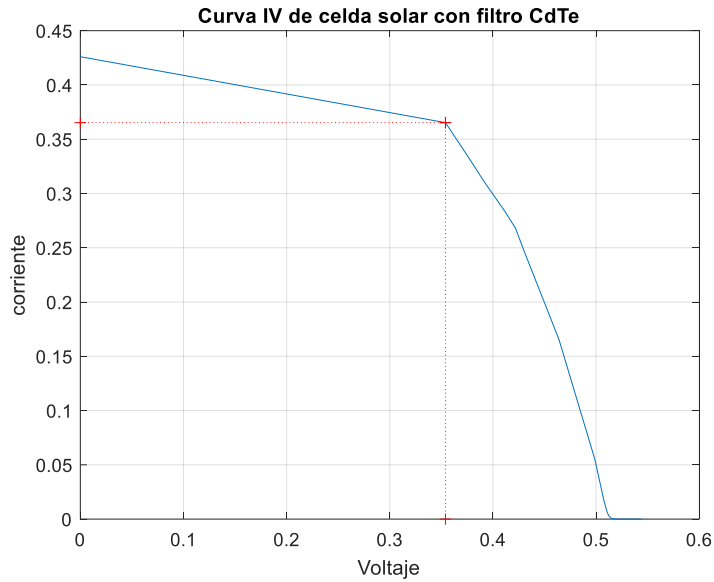


**Figura (47)** Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si con filtro de CdSE.

En la **figura (48)** se puede observar la curva característica I-V de la celda solar con filtro de CdTe obtenida de mediciones prácticas. Igual que en los casos anteriores, esta curva fue obtenida tras realizar las mediciones de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y de voltajes y corrientes para cada una de las 31 resistencias utilizadas como carga. En esta curva se puede observar también una morfología típica de la curva I-V de una celda solar. En la **tabla (23)** se puede observar los valores de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ , factor de llenado y  $\eta_{power}$  obtenidos. En esta tabla se puede observar que la celda solar con filtro de CdTe tiene una  $I_{sc}$  de 0.426 A, un  $V_{oc}$  de 0.5440 V, un factor de llenado de 0.558 y una  $\eta_{power}$  de 14.4%. Se observa que el dispositivo con filtro de CdTe tiene un incremento en la eficiencia de conversión del 2.1% en comparación con el dispositivo sin filtro. Esto demuestra que el CdTe efectivamente cumple con la función de mejorar la eficiencia de la celda.

**Tabla (23)** Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si con filtro FL de CdTe.

Parámetro	Valor obtenido
$I_{sc}$	0.426 A
$V_{oc}$	0.5440 V
$I_{max}$	0.3652 A
$V_{max}$	0.354 V
Factor de llenado	0.558
$\eta_{power}$	14.4%

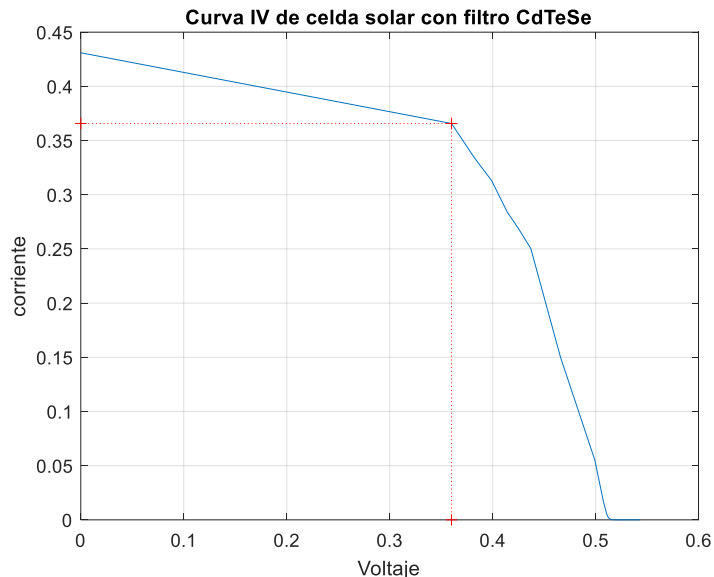


**Figura (48)** Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si con filtro FL de CdTe.

En la **figura (49)** se puede observar la curva característica I-V de la celda solar con filtro de  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.4}$  obtenida de mediciones prácticas. Al igual que en los casos anteriores, esta curva fue obtenida tras realizar las mediciones de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y de voltajes y corrientes para cada una de las 31 resistencias utilizadas como carga. En esta curva se observa la morfología típica de la curva I-V de una celda solar. En la **tabla (24)** se puede observar los valores de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ , factor de llenado y  $\eta_{power}$  obtenidos. En esta tabla se puede observar que la celda solar con filtro de CdSeTe tiene una  $I_{sc}$  de 0.431 A, un  $V_{oc}$  de 0.5431 V, un factor de llenado de 0.562 y una  $\eta_{power}$  de 14.6%. También se puede observar que el dispositivo con filtro de CdSeTe filtro de sulfuro tiene un incremento en la eficiencia de conversión del 2.3% en comparación con el dispositivo sin filtro, lo que demuestra que el  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.4}$  cumple con la función de mejorar la eficiencia de la celda solar.

**Tabla (24)** Resultados de la caracterización obtenidos de mediciones prácticas de la celda solar de Si con filtro FL de  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ .

Parámetro	Valor obtenido
$I_{sc}$	0.431 A
$V_{oc}$	0.5431 V
$I_{max}$	0.3657 A
$V_{max}$	0.36 V
Factor de llenado	0.562
$\eta_{power}$	14.6%



**Figura (49)** Curva I-V característica obtenida de mediciones prácticas en la celda solar de Si con filtro FL de  $\text{CdSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ .

### 5.3 Comparación y correlación de los resultados teóricos y prácticos.

En la **tabla (25)** se muestra un resumen de los parámetros de desempeño  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ , factor de llenado y  $\eta_{power}$  obtenidos de manera teórica mientras que la **tabla (26)** muestra estos mismos parámetros obtenidos a través de mediciones prácticas para la celda solar de Si sin filtro y las celdas solares con filtro de CdS, CdSe, CdTe y CdSeTe. Para el caso de los resultados obtenidos teóricamente se puede observar que existe un pequeño incremento en todos los valores de las características de desempeño en la celda con filtro comparada con los de la celda sin filtro. En especial, es importante notar que la eficiencia de conversión teórica incremento de 15.23 a 22.45%. Este incremento se puede atribuir al aumento en la tasa de generación de exítones que experimenta la celda solar con filtro. Este incremento de  $G_t$  es debido al incremento en irradiación del espectro que impacta la celda después del filtro, causado por la retransmisión del espectro absorbido por el filtro. Por otro lado, para el caso de los resultados obtenidos de mediciones prácticas también se observa un pequeño incremento en todos los valores de las características de desempeño en la celda con filtro comparadas con los de la celda sin filtro. Y en especial la eficiencia de conversión medida prácticamente incremento de 12.3 a 16.7% para la celda solar con el filtro de CdS, el cual demostró ser el mejor de los 4 materiales utilizados en

este trabajo. Este incremento también es atribuible al aumento en la tasa de generación de excitones que experimenta la celda solar con filtro.

**Tabla (25)** Comparación de los resultados teóricos de las celdas con filtro y sin filtro de CdS.

Parámetro	Teórico	
	Sin filtro	Filtro de CdS
$V_{oc}$	0.2830 V	0.2895 V
$I_{sc}$	0.3027 A	0.39026 A
$V_{max}$	0.2244 V	0.2304 V
$I_{max}$	0.2755 A	0.35096 A
$J_{sc}$	7.5679 A/cm <sup>2</sup>	9.7565 A/cm <sup>2</sup>
Factor de llenado	0.7114	0.7153
$\eta_{power}$	15.23 %	22.45 %

**Tabla (26)** Comparación de los resultados prácticos de la celda sin filtro, así como las celdas con filtros de CdS, CdSe, CdTe y CdSeTe.

Parámetro	Practico				
	Sin filtro	Filtro de CdS	Filtro de CdSe	Filtro de CdTe	Filtro de CdSe <sub>0.4</sub> Te <sub>0.6</sub>
$V_{oc}$	0.544 V	0.5509 V	0.5341 V	0.5440 V	0.5431 V
$I_{sc}$	0.414 A	0.448 A	0.411 A	0.426 A	0.431 A
$V_{max}$	0.333 V	0.387 V	0.338 V	0.354 V	0.36 V
$I_{max}$	0.3330 A	0.3887 A	0.3538 A	0.3652 A	0.3657 A
$J_{sc}$	10.35 A/cm <sup>2</sup>	11.2 A/cm <sup>2</sup>	10.27 A/cm <sup>2</sup>	10.65 A/cm <sup>2</sup>	10.775 A/cm <sup>2</sup>
Factor de llenado	0.493	0.609	0.545	0.558	0.562
$\eta_{power}$	12.3 %	16.7 %	13.3 %	14.4 %	14.6 %

En el caso de la comparación entre los resultados obtenidos teóricamente y los obtenidos de mediciones prácticas, primero para el caso de la celda sin filtro se observa incrementos en  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $V_{max}$  y  $I_{max}$  y decrementos en  $\eta_{power}$ . Este decremento en  $\eta_{power}$  es atribuido al decremento en el factor de llenado encontrado en las medianas prácticas. Y este decremento en el factor de llenado resultante de las mediciones prácticas es atribuido a un número menor de puntos (31 resistencias) de voltaje y corriente en las medianas prácticas comparado con el número de puntos considerados para la curva teórica (100 puntos). En segundo, para el caso de la celda con filtro de CdS se observa también incrementos significativos en  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $V_{max}$  y  $I_{max}$  y un decrementos significativos en  $\eta_{power}$  de 22.45 a 16.7%. Este decremento en  $\eta_{power}$  también es atribuido al decremento en factor de llenado, de 0.7153 a 0.609%, encontrado en las medianas prácticas que a su vez es atribuido a un número menor de puntos de voltaje y corriente en las

medianas prácticas comparado con el número de puntos considerados para la curva teórica. Comparando los resultados obtenidos de las mediciones práctica de  $\eta_{\text{power}}$  para las celdas con filtro, se puede observar que la celda con filtro de CdS tiene un incremento del 4.4% en comparación a la celda sin filtro, mientras que las celdas con filtro de CdSe, CdTe y CdSeTe tienen un incremento del 1%, 2.1% y 2.3% respectivamente. Esto confirma que el CC que da mejor resultado al aumentar la eficiencia de conversión de una celda solar de Si es el material binario CdS.

Para identificar cuál de los parámetros de desempeño de la celda solar esta linealmente más ligado o tiene más influencia en el cambio en la eficiencia de conversión obtenida por la utilización de los filtros, así como la correlación lineal entre los resultados teóricos y los encontrados de mediciones prácticas, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson ( $\rho$ ). Este coeficiente varía entre +1 y -1, la obtención de un valor de -1 indica una perfecta correlación negativa, la obtención de un valor de +1 indica una perfecta correlación positiva, mientras que un valor de 0 significa que no hay influencia o relación entre el movimiento de las dos variables. Para calcular el coeficiente de correlación de Pearson ( $\rho_{xy}$ ) entre las variables x y y, se utiliza la **ecuación (32)**. En esta ecuación  $Cov(x,y)$  es la covarianza entre dos variables y se calcula utilizando la **ecuación (33)** mientras que  $Var(x)$  es la varianza de una variable y se calcula utilizando la **ecuación (34)** donde  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son las medias aritméticas de las variables x y y, respectivamente.

$$\rho_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{\sqrt{Var(x) \cdot Var(y)}} \quad (32)$$

$$Cov(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (33)$$

$$Var(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (34)$$

La **tabla (27)** muestra los parámetros teóricos de la celda solar con y sin filtro de CdS y sus coeficientes de correlación de Pearson con  $\eta_{\text{power}}$ . En esta tabla se puede observar que la  $I_{sc}$ ,  $I_{\text{max}}$  y  $J_{sc}$  tienen un  $\rho$  igual a 1, lo que demuestra una influencia lineal positiva muy fuerte en  $\eta_{\text{power}}$ . Si cualquiera de estos parámetros aumenta  $\eta_{\text{power}}$  aumentará y si cualquiera de estos parámetros disminuye  $\eta_{\text{power}}$  disminuirá. Adicionalmente, esta alta correlación de los parámetros de corriente

y densidad de corriente confirma lo que se aprecia por sentido común en las ecuaciones (27) y (28). En estas ecuaciones se aprecia que al aumentar  $G_t$  aumentara la densidad de corriente y la corriente generada por la celda. Y dado que  $G_t$  aumenta al colocar el filtro de CdS, entonces se provocan aumentos en los parámetros de corrientes y densidad de corriente. También en esta tabla se observa que el  $V_{oc}$  tiene una alta correlación con  $\eta_{power}$  mientras que  $V_{max}$  y el factor de llenado tiene una correlación casi nula.

**Tabla (27)** Parámetros de desempeño teóricos de las celdas con filtro y sin filtro de CdS y su correlación con  $\eta_{power}$ .

Parámetro	Teórico		Parámetros de correlación			
	Sin FL	FL de CdS	$\bar{x}$	$Var(x)$	$Cov(x, \eta_{power})$	$P(x, \eta_{power})$
$V_{oc}$ (V)	0.2830	0.2895	0.28625	$1.0563 \times 10^{-5}$	0.0117	0.9972
$I_{sc}$ (A)	0.3027	0.39026	0.34638	0.0019	0.1580	1
$V_{max}$ (V)	0.2244	0.2304	0.22740	$9.0 \times 10^{-6}$	0.0108	0.0003
$I_{max}$ (A)	0.2755	0.35096	0.31323	0.0014	0.1362	1
$J_{sc}$ (A/cm <sup>2</sup> )	7.5679	9.7565	8.6622	1.1975	3.9504	1
Factor de llenado	0.7114	0.7153	0.71335	$3.8025 \times 10^{-6}$	0.0070	0.0003
$\eta_{power}$ (%)	15.23	22.45	18.84	13.0321	13.0321	1

La tabla (28) muestra los parámetros de desempeño medidos prácticamente de la celda sin filtro y las celdas con filtros de CdS, CdSe, CdTe y CdSeTe y su correlación con  $\eta_{power}$ . De la misma manera que para los parámetros obtenidos de manera teórica, en esta tabla se puede observar una alta correlación ( $>0.95$ ) de  $\eta_{power}$  con los parámetros de corriente, lo cual se debe a la dependencia de estos de  $G_t$ , ya que al aumentar  $G_t$  por la colocación de los filtros también aumenta la corriente fotogenerada. También en esta tabla se observa que los parámetros  $V_{max}$  y el factor de llenado tiene una alta correlación con  $\eta_{power}$ , esto se puede atribuir a la utilización de solo 31 puntos de voltaje y corriente para obtener la curva característica I-V. A diferencia de la correlación con los datos teóricos, para este caso se observa que el  $V_{oc}$  tiene una baja correlación con  $\eta_{power}$ , esto se puede atribuir a la poca dependencia observada entre los cambios sufridos por  $\eta_{power}$  del parámetro  $V_{oc}$ .

**Tabla (28)** Parámetros de desempeño medidos prácticamente de la celda sin filtro y las celdas con filtros de CdS, CdSe, CdTe y CdSeTe y su correlación con  $\eta_{power}$ .

Parámetro	Practico					Parámetros de correlación			
	Sin FL	FL-CdS	FL-CdSe	FL-CdTe	FL-CdSeTe	$\bar{y}$	$Var(y)$	$Cov(y, \eta_{power})$	$P(y, \eta_{power})$
$V_{oc}$ (V)	0.544	0.5509	0.5341	0.5440	0.5431	0.5432	$2.8678 \times 10^{-5}$	0.0052	0.6592
$I_{sc}$ (A)	0.414	0.448	0.411	0.426	0.431	0.42600	$1.756 \times 10^{-4}$	0.0187	0.9579
$V_{max}$ (V)	0.333	0.387	0.338	0.354	0.36	0.35440	$3.6424 \times 10^{-4}$	0.0278	0.9887
$I_{max}$ (A)	0.3330	0.3887	0.3538	0.3652	0.3657	0.36130	$3.2849 \times 10^{-4}$	0.0263	0.9850
$J_{sc}$ (A/cm <sup>2</sup> )	10.35	11.2	10.27	10.65	10.775	10.6490	0.1105	0.4675	0.9546
Factor de llenado	0.493	0.609	0.545	0.558	0.562	0.5534	0.0014	0.0531	0.9633
$\eta_{power}$ (%)	12.3	16.7	13.3	14.4	14.6	14.26	2.1704	2.1704	1

# Capítulo 6

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo se describen las conclusiones principales en la realización de este trabajo de tesis y se plantean trabajos futuros que complementarían de manera positiva los logros obtenidos.

### 6.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se propuso e implemento una estrategia novedosa que reduce el efecto térmico causado por el espectro de luz incidente y aumenta la eficiencia de conversión en celdas solares basadas en silicio. Su aportación principal consiste en la presentación detallada del diseño teórico y la implementación práctica de filtros fotoluminiscentes de conversión descendente de longitud de onda para mejorar la eficiencia de conversión de celdas solares de silicio. El diseño teórico está basado en el cálculo de los perfiles de absorbanza y fotoluminiscencia, el espectro incidente, la temperatura promedio retirada por el filtro y dos procesos básicos en el análisis de celdas solares; el cálculo de la tasa de generación de excitones  $G(x)$  utilizando la técnica de la matriz lineal de transferencia óptica en un solo eje y la caracterización del desempeño de la celda unitaria mediante el cálculo de el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la densidad de corriente de corto circuito ( $J_{sc}$ ), la curva de densidad de corriente ( $J$ - $V$ ), el factor de llenado  $FF$  y la eficiencia de conversión ( $\eta_{power}$ ) utilizando las ecuaciones básicas para dispositivos con unión PN.

La implementación práctica está basada en el depósito de múltiples filtros de diferentes materiales calcogenuros sobre sustratos de vidrio soda-lima utilizando la técnica de aspersion y el sellado en resina epoxica de estas con una celda solar de silicio de grado comercial para formar un dispositivo de celda solar con filtro fotoluminiscente. Estas técnicas fueron seleccionadas por su sencillas, efectividad y bajo costo. Se realizo la fabricación práctica de 5 módulos de prueba; el primer módulo que solo incluye una celda solar sin filtro depositado sobre el sustrato en el que esta se encapsulo; su función principal es servir como referencia para las demás celdas con filtro implementado. Para los módulos 2,3,4 y 5 se depositó una capa delgada de los materiales CdS, CdSe, CdTe y  $CdSe_{0.4}Te_{0.6}$  respectivamente y cada uno se selló sobre una celda solar de silicio. Por último, a cada uno de los módulos se les realizo las mediciones básicas como lo es la prueba de corto circuito, circuito abierto y la obtención de su curva I-V característica de una celda solar.

Los resultados teóricos obtenidos fueron comparados con las mediciones prácticas realizadas a los módulos fabricados. Utilizando el método estadístico del coeficiente de correlación de Pearson se comprobó que los parámetros que más influyen en la eficiencia son la  $I_{sc}$ ,  $I_{max}$  y la  $J_{sc}$ . Para una celda sin filtro en la teoría se obtuvo un valor de 0.3027 A en la  $I_{sc}$ , 0.2755 A en  $I_{max}$ , 7.5679 A/cm<sup>2</sup> en  $J_{sc}$  y una  $\eta_{power}$  de 15.23%, mientras que en la práctica se obtuvo una  $I_{sc}$  de 0.414 A,  $I_{max}$  de 0.333 A, 10.35 A/cm<sup>2</sup> en  $J_{sc}$  y una  $\eta_{power}$  de 12.3%. Aunque en la práctica las  $I_{sc}$ ,  $I_{max}$  y  $J_{sc}$  son mayores, la  $\eta_{power}$  es menor en comparación con la teórica, hasta un 2.93%. Esto se le atribuye al decremento en el factor de llenado encontrado en las mediciones prácticas. Este decremento en el factor de llenado es atribuido a un número menor de puntos (31 resistencias) de voltaje y corriente en las medianas prácticas comparado con el número de puntos considerados para la curva teórica (100 puntos). Por otro lado, para una celda con filtro de CdS en la teoría se obtuvieron los valores de 0.39026 A en  $I_{sc}$ , 0.35096 A en  $I_{max}$ , 9.7565 A/cm<sup>2</sup> en  $J_{sc}$  y una  $\eta_{power}$  de 22.45%. Mientras que en la práctica se obtuvo una  $I_{sc}$  de 0.448 A,  $I_{max}$  de 0.3887 A, 11.2 A/cm<sup>2</sup> en  $J_{sc}$  y una  $\eta_{power}$  de 16.7%. Al igual que la celda sin filtro en la práctica las  $I_{sc}$ ,  $I_{max}$  y  $J_{sc}$  son mayores, mientras que la  $\eta_{power}$  es menor en comparación con la teórica en un 5.75%. Y esto también se le puede atribuir al decremento en el factor de llenado encontrado en las mediciones prácticas.

## 6.2 Trabajo futuro.

En un trabajo futuro se plantea mejorar la técnica de deposición de los filtros fotoluminiscentes sobre los sustratos de vidrio soda-lima utilizando técnicas como la electrodeposición, el cual es un proceso por el cual un recubrimiento metálico es aplicado sobre una superficie a través de una corriente eléctrica, esto para crear capas más uniformes de filtros sobre los sustratos en la parte frontal de la celda.

Otro posible trabajo futuro sería la utilización de los filtros solares sobre celdas de segunda generación como son las celdas de Si amorfo o celdas de materiales como el CdS/CdTe, o celdas de tercera generación como son las celdas fotovoltaicas con Perovskite.

## REFERENCIAS

- [1] Organización de las naciones unidas (ONU), “Renewables 2022 Global Status Report”. (2022). <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
- [2] Sze SM, Ng KK. In: Physics of Semiconductor Devices: Sensors. 3rd ed. NY, USA: John Wiley & Sons, 743-772. (1981).
- [3] Carullo A, Vallan A., “Outdoor experimental laboratory for long-term estimation of photovoltaic-plant performance”, *IEEE Transactions on Instrument and Measurement*, 61 (5), 1307–1314 (2012). [doi:10.1109/TIM.2011.2180972](https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2180972)
- [4] Landis G, Raffaele R, Merritt D., “High temperature solar cell development”, *19th European Photovoltaic Science and Engineering Conference*; Paris France, 7–11 (2004).
- [5] Ando B, Baglio S, Pistorio A, Tina GM, Ventura C. Sentinella, “Smart monitoring of photovoltaic systems at panel level”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64 (8), 2188–2199 (2015). [doi:10.1109/TIM.2014.2386931](https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2386931)
- [6] Hart, G.W., Raghuraman, P., “Simulation of thermal aspects of residential photovoltaic systems”, NASA STI/Recon Technical Report N, MIT (1982).
- [7] Garg, H.P., Agarwal, R.K., “Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells”, *Energy Conversion and Management* 36, 87–99 (1995). [doi:10.1016/0196-8904\(94\)00046-3](https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)00046-3)
- [8] Evans, D.L., Florschuetz, L.W., “Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration”, *Solar Energy* 19, 255–262 (1977). [doi:10.1016/0038-092X\(78\)90139-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90139-1)
- [9] Zondag, H.A., “Flat-plate PV-thermal collectors and systems – a review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2007). [doi:10.1016/j.rser.2005.12.012](https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.012)
- [10] Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M., Poggi, P., “Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences”, *Applied Thermal Engineering* 25, 2854–2877 (2005). [doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.02.008](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.02.008)
- [11] Evans, D.L., “Simplified method for predicting photovoltaic array output”, *Solar Energy* 27, 555–560 (1981). [doi:10.1016/0038-092X\(81\)90051-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90051-7)
- [12] Majid, A., Arshad, H., & Murtaza, S., “Synthesis and characterization of Cr doped CdSe NPs”, *Superlattices and Microstructures*, 85, 620–623 (2015).
- [13] Ranjithkumar, R., Irudayaraj, A. A., Jayakumar, G., Raj, A. D., Karthick, S., & Vinayagamoorthy, R., “Synthesis and properties of CdO and Fe doped CdO NPs”, *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 1378–1382 (2016).
- [14] Willardson, R. K., & Beer, A. C., “Semiconductors and semimetals (Vol. 12)”, Cambridge: Academic Press (1977).
- [15] Zhu, L., Li, C., Li, Y., Feng, C., Li, F., Zhang, D., et al., “Visible-light photodetector with enhanced performance based on a ZnO@ CdS heterostructure”, *Journal of Materials Chemistry C*, 3(10), 2231–2236 (2015).

- [16] Xu, H., Mo, R., Cheng, C., Ai, G., Chen, Q., Yang, S., et al., "ZnSe/CdS/CdSe triple-sensitized ZnO nanowire arrays for multi-bandgap photoelectrochemical hydrogen generation", *RSC Advances*, 4(88), 47429–47435 (2014).
- [17] Zhang, Y., Wang, L. W., & Mascarenhas, A., "Quantum coaxial cables" for solar energy harvesting", *Nano Letters*, 7(5), 1264–1269 (2007).
- [18] Kamat, P. V., "Quantum dot solar cells. Semiconductor NCs as light harvesters", *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(48), 18737–18753 (2008).
- [19] Yu, H., Li, J., Loomis, R. A., Lin-Wang, W., & Buhro, W. E., "Two-versus three-dimensional quantum confinement in indium phosphide wires and dots", *Nature Materials*, 2(8), 517 (2003a).
- [20] Yu, W. W., Qu, L., Guo, W., & Peng, X., "Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS NCs", *Chemistry of Materials*, 15(14), 2854–2860 (2003b).
- [21] Nozik, A. J., "Quantum dot solar cells", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1), 115–120 (2002).
- [22] Harrell, S. M., McBride, J. R., & Rosenthal, S. J., "Synthesis of ultrasmall and magic-sized CdSe NCs", *Chemistry of Materials*, 25(8), 1199–1210 (2013).
- [24] Salem, A., Saion, E., Al-Hada, N. M., Kamari, H. M., Shaari, A. H., Abdullah, C. A. C., et al., "Synthesis and characterization of CdSe NPs via thermal treatment technique", *Results in Physics*, 7, 1556–1562 (2017).
- [25] Zhu, Y., Mendelsberg, R. J., Zhu, J., Han, J., & Anders, A., "Dopant-induced band filling and bandgap renormalization in CdO: In films", *Journal of Physics. D. Applied Physics*, 46(19), 195102 (2013).
- [26] Wageh, S., Higazy, A. A., & Algradee, M. A., "optical properties and activation energy of a novel system of CdTe NPs embedded in phosphate glass matrix", *Journal of Modern Physics*, 2 (08), 913 (2011).
- [27] Goldstein, A. N., Echer, C. M., & Alivisatos, A. P., "Melting in semiconductor NCs", *Science*, 256(5062), 1425–1427 (1992).
- [28] Rajeshwar, K., de Tacconi, N. R., & Chenthamarakshan, C. R., "Semiconductor-based composite materials: Preparation, properties, and performance", *Chemistry of Materials*, 13(9), 2765–2782 (2001).
- [29] Singh, V., & Chauhan, P., "Synthesis and structural properties of wurtzite type CdS NPs", *Chalcogenide Letters*, 6(8), 421–426 (2009).
- [30] Takahashi, T., Nichols, P., Takei, K., Ford, A. C., Jamshidi, A., Wu, M. C., et al., "Contact printing of compositionally graded CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> nanowire parallel arrays for tunable photodetectors", *Nanotechnology*, 23(4), 045201 (2012).
- [31] Banerjee, R., Jayakrishnan, R., & Ayyub, P., "Effect of the size-induced structural transformation on the band gap in CdS NPs", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 12(50), 10647-10654 (2000).
- [32] Lopes, P. A., Santos, M. B., Mascarenhas, A. J. S., & Silva, L. A., "Synthesis of CdS nano-spheres by a simple and fast sonochemical method at room temperature", *Materials Letters*, 136, 111–113 (2014).
- [33] Amiri, G. R., Fatahian, S., & Mahmoudi S., "Preparation and optical properties assessment of cdse QDs", *Materials Sciences and Applications*, 4(02), 134 (2013).

- [34] Qu, L., & Peng, X., "Control of photoluminescence properties of CdSe NCs in growth", *Journal of the American Chemical Society*, 124(9), 2049–2055 (2002).
- [35] Yildiz, I., McCaughan, B., Cruickshank, S. F., Callan, J. F., & Raymo, F. M., "Biocompatible CdSe-ZnS core-shell QDs coated with hydrophilic polythiols", *Langmuir*, 25 (12), 7090–7096 (2009).
- [36] Han, M., Gao, X., Su, J. Z., & Nie, S. "Quantum-dot-tagged microbeads for multiplexed optical coding of biomolecules", *Nature Biotechnology*, 19(7), 631 (2001).
- [37] Li, D., Wang, S., Wang, J., Zhang, X., & Liu, S., "Synthesis of CdTe/TiO<sub>2</sub> NPs and their photocatalytic activity", *Materials Research Bulletin*, 48(10), 4283–4286 (2013).
- [38] Chin, P. T., Stouwdam, J. W., van Bavel, S. S., & Janssen, R. A., "Cluster synthesis of branched CdTe NCs for use in light-emitting diodes", *Nanotechnology*, 19(20), 205602 (2008).
- [39] Wang, G., Jin, L., Dong, Y., Niu, L., Liu, Y., Ren, F., et al., "Multifunctional Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CdTe@SiO<sub>2</sub>-carboxymethyl chitosan drug nanocarriers: Synergistic effect towards magnetic targeted drug delivery and cell imaging", *New Journal of Chemistry*, 38(2), 700–708. (2014).
- [40] Morales-Acevedo, A., "Can we improve the record efficiency of CdS/CdTe solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(15), 2213–2220 (2006).
- [41] Romeo, N., Bosio, A., Mazzamuto, S., Romeo, A., & Vaillant-Roca, L., "High efficiency CdTe/CdS thin film solar cells with a novel back contact", *Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Milan, Italy, 3–7 (2007).
- [42] Crisp, R. W., Pach, G. F., Kurley, J. M., France, R. M., Reese, M. O., Nanayakkara, S. U., et al., "Tandem solar cells from solution-processed CdTe and PbS QDs using a ZnTe-ZnO tunnel junction", *Nano Letters*, 17(2), 1020–1027 (2017).
- [43] Lin, Z., Lv, S., Zhang, K., & Tang, D., "Optical transformation of a CdTe quantum dot-based paper sensor for a visual fluorescence immunoassay induced by dissolved silver ions", *Journal of Materials Chemistry B*, 5(4), 826–833 (2017).
- [44] W. Shockley and H. 1. Queisser, "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells", *J Appl. Phys.*, (32) , 510-519 (1961).
- [45] T. Trupke, M. A. Green and P. WOrfel, "Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high energy photons", *J Appl. Phys.*, (92) , 1668-1674 (2002).
- [46] T. Trupke, M. A. Green and P. WOrfel, "Improving Solar Cell Efficiencies By Up-Conversion of Sub-Band-Gap Light", *J Appl. Phys.*, (92), 4117-4122 (2002).
- [47] Xu, H. Zhang, Q. Xiong, G. Liang, L. Wang, X. Shen, L. Liu, and W. Xu, "Large enhancement in short-circuit current densities of dye-sensitized solar cells via photo conversion", *J Phys. Conference Series*, (276), 012195 (2011).
- [48] H. Shpaisman, O. Niitsoo, I. Lubomirsky and D. Cahen, "can up and down-conversion and multi-exciton generation improve photovoltaics 7", *Sol. Energy Mat. and Solar Cells*, (92), 1541-1546 (2008).
- [49] H.Q. Wang , M. Batentschuk, A. Osvet, L. Pinna and C. 1. Brabec, "Rare-earth ion doped up-conversion materials for photovoltaic applications", *Adv. Materials*, (23), 2675- 2680 (2011).
- [50] V. Badescu and A. M. Badescu , "Improved model for solar cells with up-conversion of low-energy photons, *Renewable Energy*, (34), 1538-1544 (2009).

- [51] A.c. Pan, C. D. Canizo and A. Luque, "Characterization of upconverter layers on bifacial silicon solar cells", *Mat. Sci. and Engineering B*, (159-160), 212-215 (2009).
- [52] V.N. Saxena, "Phosphors for solar cells: Tb-doped lanthanum fluoride and Th-doped calcium tungstate", *Indian J Pure Appl. Phys.*, (21), 306 (1983).
- [53] P. Gibart F. Auzel, J. C. Guillaume and K. Zahraman, "IR response of substrate free gas solar cells using two photon upconversion", *Proc. J 3th Eur. Photovoltaic Solar Energy Con!*, Nice, France, 85 (1995).
- [54] AShalav, B. S. Richards, T. Trupke, K. W. Kramer, and H. U. Gudel, "Application of NaYF<sub>4</sub>:Er<sup>3+</sup> up-converting phosphors for enhanced near-infrared silicon solar cell response", *App. Phys. Lett.*, (86), pp. 013505 (2005).
- [55] X.F. Liang et al., "Gd<sub>2</sub>(MoO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>:ErH Nanophosphors for an enhancement of silicon solar-cell near-infrared response", *J. Fluoresc.*, (19), 285 - 289 (2009).
- [56] G.B. Shan and George P. Demopoulos, "Near infrared sunlight harvesting in dye-sensitized solar cells via the insertion of an upconverter- TiO<sub>2</sub> nanocomposite layer", *Adv. Materials*, (22), 4373 – 4377 (2010).
- [57] Tamayo et al., "Photoinstability aversion in perovskite solar cell by downconversion cadmium chalcogenide filters", *Journal of Photonics for Energy*, 12(2), 025501-1 (2022).
- [58] G. M. Salley, O. S. Wenger, K. W. Kramer, H. U. Glidel, "Inorganic solid state optical materials : major recent advances" *Current Opinion in Solid State & Mat. Science*, (6), 487 - 493 (2002).
- [59] R.T. Wegh, H. Donker, K.D. Oskam and A. Meijerink "Visible Quantum cutting in LiGdF<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup> through downconversion", *Science*, (283), 663 - 666 (1999).
- [60] B.S. Richards, "Enhancing the performance of silicon solar cells via the application of passive luminescence conversion layers", *Sol. Energy Mat. & Solar Cells*, (90), 2329- 2337 (2006).
- [61] P. Vergeer, T. I. H. Vlugt, M. H. F. Kox, M. L. den Hertog, J. P. I. M. van der Eerden, and A. Meijerink, "Quantum cutting by cooperative energy transfer in Yb<sup>3+</sup> Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Tb<sup>3+</sup>", *Phys. Rev. B*, (71), 014119 (2005).
- [62] J. Liu, Qiaohong Yao, and Yadong Li "Effects of downconversion luminescent film in dye-sensitized solar cells", *App. Phys. Lett.*, (88), 173119 (2006).
- [63] D.C. Yu, S. Ye, M.Y. Peng, Q.Y. Zhang, J.R. Qiu, J. Wang and L. Wondraczek, "Efficient near-infrared downconversion in GdVO<sub>4</sub>:Dy<sup>3+</sup> phosphors for enhancing the photo-response of solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, (95), 1590 – 1593 (2011).
- [64] L. Aarts, B. van der Ende, M. F. Reid, and A. Meijerink, "Downconversion for solar cells in YF<sub>3</sub>: Pr<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>", *Spectroscopy Lett.*, (43), 373 - 381 (2010).
- [65] K.D. Oskam R.T. Wegh, H. Donker, E.V.D. van Loef and A. Meijerink, "Down conversion: a new route to visible quantum cutting", *J. Alloys Comp.*, (300-301), 421 – 425 (2000).
- [66] J. Mehra, H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*. New York: Springer-Verlag (1982). [ISBN 0-387-90642-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0642-8).
- [67] Perednis, D., & Gauckler, L. J. "Thin film deposition using spray pyrolysis", *Journal of Electroceramics*, 14(2), 103–111 (2005).

- [68] Kozhukharov, S., & Tchaoushev, S., "Spray pyrolysis equipment for various applications", *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 48(1), 111–118 (2013).
- [69] Yadav, A. A., & Masumdar, E. U., "Photoelectrochemical investigations of cadmium sulphide (CdS) thin film electrodes prepared by spray pyrolysis", *Journal of Alloys and Compounds*, 509(17), 5394–5399 (2011).
- [70] Rubel, A. H., & Podder, J., "Structural and electrical transport properties of CdS and Al-doped CdS thin films deposited by spray pyrolysis", *Journal of Scientific Research*, 4(1), (2011).
- [71] Su, J., Zhang, T., Li, Y., Chen, Y., & Liu, M., "Photocatalytic activities of copper doped cadmium sulfide microspheres prepared by a facile ultrasonic spray-pyrolysis method", *Molecules*, 21(6), 735 (2016).
- [72] Kerimova, A., Bagiyev, E., Aliyeva, E., & Bayramov, A., "Nanostructured CdS thin films deposited by spray pyrolysis method", *physica status solidi (c)* (2017).
- [73] Diwate, K., Pawbake, A., Rondiya, S., Kulkarni, R., Waykar, R., Jadhavar, A., & Pathan, H. "Substrate temperature dependent studies on properties of chemical spray pyrolysis deposited CdS thin films for solar cell applications", *Journal of Semiconductors*, 38(2), 023001 (2017).
- [74] Yadav, A. A., Barote, M. A., & Masumdar, E. U. "Studies on cadmium selenide (CdSe) thin films deposited by spray pyrolysis", *Materials Chemistry and Physics*, 121(1), 53–57 (2011b).
- [75] Ibrahim, S. G., & Ubale, A. U. "Size dependent physical properties of spray deposited nano-crystalline Cd<sub>0.5</sub>Fe<sub>0.5</sub>Se thin films", *International Journal of Materials and Chemistry*, 4 (1), 1–8 (2014).
- [76] Nikale, V. M., Shinde, S. S., Bhosale, C. H., & Rajpure, K. Y. "Physical properties of spray deposited CdTe thin films: PEC performance", *Journal of Semiconductors*, 32(3), 033001 (2011).
- [77] Gunjal, S. D., Kholam, Y. B., Jadkar, S. R., Shripathi, T., Sathe, V. G., Shelke, P. N., & Mohite, K. C. "Spray pyrolysis deposition of p-CdTe films: Structural, optical and electrical properties", *Solar Energy*, 106, 56-62 (2014).
- [78] Naje, A. N., "Optical characteristics of CdO nanostructure", *Physical Review & Research International*, 3(4), 372–478 (2013).
- [79] Bari, R. H., & Patil, S. B. "Nanostructured CdO thin films for LPG and CO<sub>2</sub> gas sensor prepared by spray pyrolysis technique", *Physics and Astronomy: International Letters of Chemistry*, 18 (2014).
- [80] Bari, R. H., Patil, S. B., & Deshmukh, S. B., "Nanostructured spray Pyrolysis Zinc doped CdO thin films for LPG gas sensor", *Journal of Nanoscience and Technology*, 2(3), 181–185 (2016).
- [81] Singh P, Ravindar NM. "Temperature dependent of solar cell performance-and analysis", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 101: 36-45 (2012). doi:10.1016/j.solmat.2012.02.019
- [82] Skoplaki E, Palyvos JA., "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlation", *Solar Energy*, 83: 614-624 (2009). doi:10.1016/j.solener.2008.10.008
- [83] Berthod C, Kristensen ST, Strandberg R, Odden JO, Nie S et al., "Temperature sensitivity of multicrystalline silicon solar cells", *IEEE Journal of Photovoltaic*, 9 (4): 957–964 (2009). doi:10.1109/JPHOTOV.2019.2911871
- [84] Ingersoll JG., "Simplified calculation of solar cell temperatures in terrestrial photovoltaic arrays", *Journal Solar Energy Engineering*, 108: 95–101 (1986). doi:10.1115/1.3268087

- [85] Eberle R, Haag ST, Geisemeyer I, Padilla M, Schubert MC., “Temperature Coefficient Imaging for Silicon Solar Cells”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8 (4): 930-936 (2018). doi: [10.1109/JPHOTOV.2018.2828839](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2828839).
- [86] Xing J, Chao X, Zhirong L, Xiaoze D, Gaosheng W et al., “A review of concentrated photovoltaic-thermal (CPVT) hybrid solar system with waste heat recovery (WHR)”, *Science Bulletin*, 62 (20): 1388-1426 (2017). doi:[10.1016/j.scib.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.10.002)
- [87] Mojiri A, Taylor R, Thomsen E, Rosengarten G., “Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy—a review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28: 654–63 (2013). doi:[10.1016/j.rser.2013.08.026](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.026)
- [88] Imenes AG, Mills DR., “Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84, 19–69 (2004). doi:[10.1016/j.solmat.2004.01.038](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.01.038)
- [89] Gotzberger A, Greubel W., “Apparatus for convert light energy into elect energy, US Patent 4,110,123, 1978.
- [90] Zhang L, Jing D, Zhao L, Wei J, Guo L., “Concentrating PV/T hybrid system for simultaneous electricity and usable heat generation: a review”, *International Journal of Photoenergy*, Special Issue ID 869753 (2012). doi:[10.1155/2012/869753](https://doi.org/10.1155/2012/869753)
- [91] Prasad PN. Introduction to Nanomedicine and Nanobioengineering. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Press, (2012).
- [92] Prasad PN. In: Introduction to Biophotonics: Nanotechnology for Biophotonics: Bionanophotonics. 1st ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 520–544, (2004). doi:[10.1002/0471465380.ch15](https://doi.org/10.1002/0471465380.ch15)
- [93] Ntziachristos V, Bremer C, Weissleder R., “Fluorescence imaging with near-infrared light new technology advances that enable in vivo molecular imaging”, *European Radiology*, 13, 195–208 (2003). doi:[10.1007/s00330-002-1524-x](https://doi.org/10.1007/s00330-002-1524-x)
- [94] Sharma P, Brown S, Walter G, Swadeshmukul S, Moudgil B., “Nanoparticles for bioimaging”, *Advances in Colloid Interface Science*, 123, 471–485 (2006). doi:[10.1016/j.cis.2006.05.026](https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.05.026)
- [95] Villa-Angulo C, Guayante-Santacruz FJ, Villa-Angulo R, Hernandez-Fuentes IO, Morales-Carbajal R et al., “Correlation of theory with experimental photon absorption and photon emission of quasytype II CdS/ZnS QDs”, *Journal Nanophotonics*, 12 (4): ID 046010 (2018). doi: [10.1117/1.JNP.12.046010](https://doi.org/10.1117/1.JNP.12.046010)
- [96] Chen EY, Li Z, Milleville CC, Lennon KR, Zide JMO et al., “CdSe(Te)/CdS/CdSe Rods Versus CdTe/CdS/CdSe Spheres: Morphology-Dependent Carrier Dynamics for Photon Upconversion”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8 (3): 746-751 (2018). doi:[10.1109/JPHOTOV.2018.2815710](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2815710)
- [97] Smyntyna V, Semenenko B, Skobeeva V, Malushin N., “Photoactivation of Luminescence in CdS Nanocrystal”, *Nanotechnology Journal*, 5: 355–359 (2014). doi:[10.3762/bjnano.5.40](https://doi.org/10.3762/bjnano.5.40)
- [98] Bhattacharya R, Pal B, Bansal B., “On conversion of luminescence into absorption and the van Roosbroeck-Shockley relation”, *Applied Physics Letters*, 100, ID 222103 (2012). doi:[10.1063/1.4721495](https://doi.org/10.1063/1.4721495)
- [99] Hiie, J., Dedova, T., Valdna, V., & Muska, K. Comparative study of nano-structured CdS thin films prepared by CBD and spray pyrolysis: annealing effect. *Thin Solid Films*, 511, 443– 447. (2006).
- [100] Marathe, Y. V., & Shrivastava, V. S. Synthesis and Application of CdS nano-crystalline thin films. *Advances in Applied Science Research*, 2(3), 295–301. (2011).

[101] Anbarasi, M., Nagarethinam, V. S., Baskaran, R., & Narasimman, V. Studies on the structural, morphological and optoelectrical properties of spray deposited CdS: Pb thin films. *Pacific Science Review A: Natural Science and Engineering*, 18(1), 72–77. (2016).

# ANEXOS

## I. Coeficientes de extinción de los materiales.

Tabla I.1. Coeficientes de extinción CdS (350 nm – 800 nm)

CdS			
Longitud de onda ( $\lambda$ )	k	Longitud de onda ( $\lambda$ )	k
350	0.36695	580	0
360	0.36173	590	0
370	0.35637	600	0
380	0.35091	610	0
390	0.34538	620	0
400	0.33981	630	0
410	0.33420	640	0
420	0.32855	650	0
430	0.32283	660	0
440	0.31700	670	0
450	0.31100	680	0
460	0.30452	690	0
470	0.29578	700	0
480	0.27651	710	0
490	0.23085	720	0
500	0.15633	730	0
510	0.079838	740	0
520	0.029488	750	0
530	0.007797	760	0
540	0.0015002	770	0
550	0.00021337	780	0
560	0	790	0
570	0	800	0

Tabla I.2. Coeficientes de extinción CdSe (350 nm – 800 nm)

CdSe			
Longitud de onda ( $\lambda$ )	k	Longitud de onda ( $\lambda$ )	k
350	0.850	580	0.440
360	0.817	590	0.402
370	0.781	600	0.427
380	0.682	610	0.344
390	0.731	620	0.311
400	0.709	630	0.275
410	0.688	640	0.257
420	0.602	650	0.268
430	0.649	660	0.242
440	0.566	670	0.247
450	0.619	680	0.270
460	0.546	690	0.231
470	0.583	700	0.230
480	0.523	710	0.230
490	0.551	720	0.162
500	0.496	730	-0.0001
510	0.496	740	-0.0001
520	0.524	750	-0.0001
530	0.506	760	-0.0001
540	0.478	770	-0.0001
550	0.482	780	-0.0001
560	0.482	790	-0.0001
570	0.481	800	-0.0001

Tabla I.3. Coeficientes de extinción CdTe (350 nm – 800 nm)

CdTe			
Longitud de onda ( $\lambda$ )	k	Longitud de onda ( $\lambda$ )	k
350	1.4000	580	0.32770
360	1.2958	590	0.31733
370	1.1816	600	0.30767
380	1.0355	610	0.29868
390	0.86541	620	0.29025
400	0.70829	630	0.28218
410	0.59648	640	0.27426
420	0.53449	650	0.26624
430	0.50533	660	0.25787
440	0.49089	670	0.24895
450	0.48073	680	0.23934
460	0.47087	690	0.22896
470	0.46034	700	0.21780
480	0.44911	710	0.20591
490	0.43733	720	0.19337
500	0.42515	730	0.18031
510	0.41271	740	0.16687
520	0.40011	750	0.15318
530	0.38746	760	0.13938
540	0.37487	770	0.12559
550	0.36246	780	0.11189
560	0.35037	790	0.098167
570	0.33874	800	0.083304

Tabla I.4. Coeficientes de extinción CdSeTe (350 nm – 800 nm)

CdTeSe			
Longitud de onda ( $\lambda$ )	k	Longitud de onda ( $\lambda$ )	k
350	2.1086	580	0.89996
360	2.0347	590	0.87388
370	1.9608	600	0.8478
380	1.8869	610	0.8391
390	1.813	620	0.8304
400	1.7391	630	0.8217
410	1.66954	640	0.813
420	1.59998	650	0.8043
430	1.53042	660	0.7828
440	1.46086	670	0.7614
450	1.3913	680	0.74
460	1.33912	690	0.72
470	1.28694	700	0.70
480	1.23476	710	0.676
490	1.18258	720	0.652
500	1.1304	730	0.628
510	1.09996	740	0.604
520	1.06952	750	0.580
530	1.03908	760	0.544
540	1.00864	770	0.508
550	0.9782	780	0.472
560	0.95212	790	0.436
570	0.92604	800	0.3913

## II. Efecto de la fotoluminiscencia en la irradiancia.

Tabla II.1. Relación fraccional de la radiación emitida por el material CdS.

Longitud de onda ( $\lambda$ ) nm	Fracción	1- Fracción	Irradiación (W/m <sup>2</sup> )	Irradiación *(1-Fraccion)	Temperatura (°K)	Temperatura (°C)
460	0.03	1.03	1.2791	1.317473	868.39	592.24
470	0.05	1.05	1.2749	1.338645	852.84	579.69
480	0.08	1.08	1.3825	1.493100	840.09	566.94
490	0.10	1.10	1.3968	1.536480	825.99	552.85
500	0.13	1.13	1.3391	1.513183	811.43	538.28
510	0.15	1.15	1.3497	1.552155	798.32	525.17
520	0.18	1.18	1.3349	1.575182	785.46	512.31
530	0.19	1.19	1.3598	1.618162	773.32	500.17
540	0.20	1.20	1.3096	1.57152	760.39	487.24
550	0.22	1.22	1.3648	1.665056	749.76	476.61
560	0.33	1.33	1.3885	1.846705	740.48	467.33
570	0.39	1.39	1.3240	1.84036	729.28	456.13
580	0.63	1.63	1.3455	2.193165	722.18	449.03
590	0.90	1.90	1.2316	2.340040	713.06	439.91
600	1.00	2.00	1.3278	2.655600	705.52	432.37
610	1.00	2.00	1.3237	2.647400	695.58	422.43
620	1.00	2.00	1.3299	2.659800	686.10	412.95
630	0.60	1.60	1.2589	2.014240	671.28	398.13
640	0.40	1.40	1.2962	1.814680	660.29	387.14
650	0.35	1.35	1.2299	1.660365	649.92	376.77
660	0.33	1.33	1.2668	1.684844	641.79	368.64
670	0.28	1.28	1.2853	1.645184	633.16	360.01
680	0.23	1.23	1.2650	1.555950	624.19	351.04
690	0.20	1.20	1.0746	1.289520	613.07	339.92
700	0.19	1.19	1.1636	1.278774	605.44	332.29
710	0.18	1.18	1.1954	1.410572	599.90	326.75
720	0.17	1.17	0.8994	1.052298	587.69	314.54
730	0.16	1.16	1.0294	1.194104	582.99	308.49
740	0.15	1.15	1.1119	1.278685	577.44	304.29
750	0.13	1.13	1.1237	1.273849	570.81	297.66
760	0.09	1.09	1.2471	0.269404	564.36	291.21
770	0.07	1.07	1.0646	1.139122	556.32	283.17
780	0.03	1.03	1.0687	1.100761	549.68	276.53

### III. Temperaturas estimadas.

Tabla III.1 Temperatura estimada para el espectro de irradiación AM1.5 G.

Temperatura (Sin CdS)			
Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}$ C)	Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}$ C)
350	787.11	580	438.90
360	766.15	590	426.77
370	749.01	600	418.27
380	724.62	610	408.56
390	706.55	620	399.17
400	694.63	630	388.98
410	673.21	640	380.68
420	655.94	650	371.09
430	631.52	660	363.29
440	624.66	670	355.44
450	611.28	680	347.25
460	594.53	690	336.65
470	578.53	700	330.61
480	565.13	710	323.82
490	550.63	720	311.84
500	535.49	730	307.29
510	522.03	740	301.90
520	508.63	750	295.59
530	496.35	760	264.92
540	483.30	770	282.05
550	472.36	780	276.04
560	461.30	790	269.12
570	449.26	800	263.09

Tabla III.2 Temperatura estimada tras la absorbanza del CdS para el espectro de irradiación AM1.5 G.

Temperatura (Absorbanza del CdS)			
Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
350	000.00	580	438.90
360	000.00	590	426.77
370	000.00	600	418.27
380	000.00	610	408.56
390	000.00	620	399.17
400	000.00	630	388.98
410	000.00	640	380.68
420	000.00	650	371.09
430	000.00	660	363.29
440	000.00	670	355.44
450	581.21	680	347.25
460	566.49	690	336.65
470	557.37	700	330.61
480	545.26	710	323.82
490	539.00	720	311.84
500	529.01	730	307.29
510	519.18	740	301.90
520	506.80	750	295.59
530	495.24	760	264.92
540	482.87	770	282.05
550	472.36	780	276.04
560	461.30	790	269.12
570	449.26	800	263.09

Tabla III.3 Temperatura estimada para el espectro de irradiación AM1.5 G posterior al filtro.

Temperatura (Absorbancia + Fotoluminiscencia del CdS)			
Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Longitud de onda ( $\lambda$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
350	000.00	580	449.03
360	000.00	590	439.91
370	000.00	600	432.37
380	000.00	610	422.43
390	000.00	620	412.95
400	000.00	630	398.13
410	000.00	640	387.14
420	000.00	650	376.77
430	000.00	660	368.64
440	000.00	670	360.01
450	581.21	680	351.04
460	595.24	690	339.92
470	579.69	700	332.29
480	566.94	710	326.75
490	552.85	720	314.54
500	538.28	730	308.49
510	525.17	740	304.29
520	512.31	750	297.66
530	500.17	760	291.21
540	487.24	770	283.17
550	476.61	780	276.53
560	467.33	790	269.12
570	456.13	800	263.09

## IV.1 Mediciones realizadas.

Tabla IV.1. Resultado de las mediciones del dispositivo sin filtro.

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
10M	0.52091574	1.91E-06	9.94E-07
1M	0.52067435	3.64E-06	1.90E-06
900k	0.51984616	4.68E-06	2.43E-06
800k	0.52011155	5.90E-06	3.07E-06
700k	0.51938339	7.11E-06	3.69E-06
600k	0.51935671	5.72E-06	2.97E-06
500k	0.5189993	7.63E-06	3.96E-06
400k	0.5185432	9.37E-06	4.86E-06
300k	0.51830314	1.30E-05	6.74E-06
200k	0.51795106	1.82E-05	9.43E-06
100k	0.5173976	3.43E-05	1.78E-05
80k	0.51704952	4.34E-05	2.24E-05
60k	0.51669611	5.83E-05	3.01E-05
40k	0.51615065	9.05E-05	4.67E-05
20k	0.51601329	1.74E-04	8.98E-05
10k	0.51562386	3.42E-04	1.76E-04
5k	0.51535847	6.87E-04	3.54E-04
4k	0.51501573	8.18E-04	4.21E-04
2k	0.51456095	1.77E-03	9.11E-04
1k	0.51394748	3.43E-03	1.76E-03
500	0.51270051	6.78E-03	3.47E-03
200	0.50993055	1.65E-02	8.44E-03
50	0.50037634	5.50E-02	2.75E-02
10	0.46939454	1.63E-01	7.66E-02
6.2	0.408	0.206731266	0.084346357
5.1	0.405	0.247130862	0.100087999
4.3	0.387	0.254530788	0.098503415
3	0.365	0.286530468	0.104583621
2	0.35	0.300263664	0.105092282
1	0.333	0.333063336	0.110910091

Voc	5.44E-01
Isc	4.14E-01
FF	4.93E+01
Eficiencia	1.23E+01

Tabla IV.2. Resultado de las mediciones del dispositivo con filtro de CdS.

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
10M	0.53222368	1.04E-06	5.54E-07
1M	0.53089137	5.90E-06	3.13E-06
900k	0.52988314	5.90E-06	3.12E-06
800k	0.52870287	5.90E-06	3.12E-06
700k	0.52753994	5.38E-06	2.84E-06
600k	0.52655705	6.59E-06	3.47E-06
500k	0.52547014	8.15E-06	4.28E-06
400k	0.52452192	9.71E-06	5.09E-06
300k	0.52346965	1.32E-05	6.90E-06
200k	0.52246676	1.96E-05	1.02E-05
100k	0.52159589	3.56E-05	1.85E-05
80k	0.52078104	4.46E-05	2.32E-05
60k	0.51999419	6.00E-05	3.12E-05
40k	0.51916067	9.02E-05	4.68E-05
20k	0.51845518	1.75E-04	9.06E-05
10k	0.51769767	3.43E-04	1.78E-04
5k	0.5169535	6.89E-04	3.56E-04
4k	0.51627335	8.19E-04	4.23E-04
2k	0.5155105	1.77E-03	9.14E-04
1k	0.51452628	3.43E-03	1.77E-03
500	0.51333799	6.79E-03	3.49E-03
200	0.51104147	1.66E-02	8.48E-03
50	0.50321165	5.56E-02	2.80E-02
10	0.47353285	1.66E-01	7.88E-02
6.2	0.446	0.253864128	0.113223401
5.1	0.433	0.273397266	0.118381016
4.3	0.428	0.290063766	0.124147292
3	0.416	0.322596774	0.134200258
2	0.409	0.352796472	0.144293757
1	0.387	0.388796112	0.150464095

Voc	0.5509666
Isc	4.48E-01
FF	6.09E+01
Eficiencia	1.67E+01

Tabla IV.3 Resultado de las mediciones del dispositivo con filtro de CdSe.

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
10M	0.52581422	1.38732E-06	7.29472E-07
1M	0.52396176	4.50929E-06	2.36269E-06
900k	0.52214002	4.16196E-06	2.17313E-06
800k	0.52020091	5.37661E-06	2.79692E-06
700k	0.51909666	6.06994E-06	3.15089E-06
600k	0.517683	6.5906E-06	3.41184E-06
500k	0.51633069	2.60131E-06	1.34313E-06
400k	0.51496371	9.53857E-06	4.91202E-06
300k	0.51358071	1.17932E-05	6.05677E-06
200k	0.5122124	1.76898E-05	9.06095E-06
100k	0.51151357	3.53796E-05	1.80972E-05
80k	0.51149757	4.43976E-05	2.27092E-05
60k	0.50958247	5.61908E-05	2.86338E-05
40k	0.50889698	8.75818E-05	4.45701E-05
20k	0.50895832	0.000171001	8.70324E-05
10k	0.50726194	0.000334891	0.000169877
5k	0.50646842	0.00067065	0.000339663
4k	0.50583628	0.000781298	0.000395209
2k	0.506055	6.24327E-06	3.15944E-06
1k	0.50369179	0.003232021	0.001627942
500	0.5023888	0.006172506	0.003100998
200	0.50022964	0.01369758	0.006851936
50	0.49500045	0.036495794	0.018065435
10	0.49835855	0.156091106	0.077789337
6.2	0.422	0.241930914	0.102094846
5.1	0.407	0.259197408	0.105493345
4.3	0.392	0.274130592	0.107459192
3	0.378	0.301463652	0.11395326
2	0.362	0.323263434	0.117021363
1	0.338	0.353863128	0.119605737

Voc	0.5341387
Isc	4.11E-01
FF	5.45E+01
Eficiencia	1.33E+01

Tabla IV.4 Resultado de las mediciones del dispositivo con filtro de CdTe.

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
10M	0.54014817	1.21399E-06	6.55733E-07
1M	0.53771295	4.68262E-06	2.51791E-06
900k	0.53539109	4.33596E-06	2.32143E-06
800k	0.53314655	4.68262E-06	2.49652E-06
700k	0.53121278	5.89661E-06	3.13235E-06
600k	0.52967243	6.76393E-06	3.58267E-06
500k	0.52787202	7.80459E-06	4.11982E-06
400k	0.52619964	1.00586E-05	5.29281E-06
300k	0.52466595	1.40479E-05	7.37043E-06
200k	0.52328028	1.80365E-05	9.43814E-06
100k	0.52205866	3.46857E-05	1.81079E-05
80k	0.52083972	4.28369E-05	2.23112E-05
60k	0.5197168	5.89661E-05	3.06457E-05
40k	0.51850319	9.01831E-05	4.67602E-05
20k	0.51758564	0.000175336	9.07515E-05
10k	0.51654407	0.000343215	0.000177286
5k	0.51536914	0.000688166	0.00035466
4k	0.51444093	0.000817891	0.000420757
2k	0.51360072	0.001767068	0.000907567
1k	0.51212971	0.003419324	0.001751137
500	0.51067071	0.006764071	0.003454213
200	0.50779139	0.01651857	0.008387988
50	0.49880798	0.055243193	0.027555745
10	0.46411067	0.165378373	0.076753867
6.2	0.43	0.247597524	0.106466935
5.1	0.422	0.267863988	0.113038603
4.3	0.412	0.28299717	0.116594834
3	0.392	0.310263564	0.121623317
2	0.375	0.335263314	0.125723743
1	0.354	0.365263014	0.129303107

Voc	0.5440624
Isc	4.26E-01
FF	5.58E+01
Eficiencia	1.44E+01

Tabla IV.5 Resultado de las mediciones del dispositivo con filtro de CdSeTe.

Resistencia ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
10M	0.5310154	2.25464E-06	1.19725E-06
1M	0.52956174	4.33596E-06	2.29616E-06
900k	0.5280614	6.06994E-06	3.2053E-06
800k	0.52698782	5.72328E-06	3.0161E-06
700k	0.52579955	5.89661E-06	3.10043E-06
600k	0.52432188	7.28393E-06	3.81912E-06
500k	0.52382973	7.28393E-06	3.81554E-06
400k	0.52234139	1.07526E-05	5.61651E-06
300k	0.52122914	1.31805E-05	6.87008E-06
200k	0.52041162	1.80365E-05	9.3864E-06
100k	0.51939139	3.58996E-05	1.8646E-05
80k	0.51851252	4.38776E-05	2.27511E-05
60k	0.51764166	5.74048E-05	2.97151E-05
40k	0.51668677	8.94891E-05	4.62378E-05
20k	0.51586125	0.000175857	9.07178E-05
10k	0.51524511	0.000342869	0.000176661
5k	0.51438892	0.000685912	0.000352825
4k	0.51346735	0.000815637	0.000418803
2k	0.51268451	0.001763946	0.000904348
1k	0.5114749	0.003414468	0.001746415
500	0.51029863	0.006757654	0.003448421
200	0.50759668	0.016521171	0.008386092
50	0.49907471	0.055438474	0.02766794
10	0.46589774	0.149869388	0.069823809
6.2	0.437	0.25033083	0.109394573
5.1	0.425	0.268797312	0.114238858
4.3	0.414	0.284197158	0.117657623
3	0.399	0.31299687	0.124885751
2	0.382	0.334396656	0.127739523
1	0.36	0.365729676	0.131662683

Voc	0.5431515
Isc	4.31E-01
FF	5.62E+01
Eficiencia	1.46E+01