

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

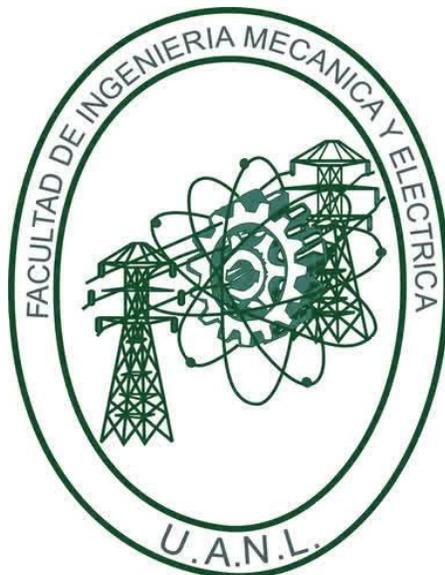
**ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA TOPOLOGÍA Y TIPO DE
CONTACTO EN CELDAS SOLARES DE ESTRUCTURA**
CdS/AgSb(S,Se)₂

POR
DIANA XIOMARA MORENO RODRÍGUEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

NOVIEMBRE, 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DE LA TOPOLOGÍA Y TIPO DE CONTACTO EN CELDAS SOLARES DE ESTRUCTURA $CdS/AgSb(S,Se)_2$

POR
DIANA XIOMARA MORENO RODRÍGUEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

ASESORA: DRA. BINDU KRISHNAN

NOVIEMBRE, 2017

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

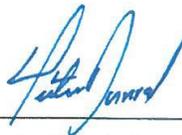
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis "Estudio sobre la influencia de la topología y tipo de contacto en celdas solares de estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$ " realizada por la estudiante Diana Xiomara Moreno Rodríguez con número de matrícula 1833079, sea aceptada para su defensa en opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El comité de Tesis



Dra. Bindu Krishnan

Directora



Dr. Héctor D. García Lara

Revisor



Dr. David Avellaneda Avellaneda

Revisor



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Noviembre del 2017

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	12
AGRADECIMIENTOS	14
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 MOTIVACIÓN	2
1.3 ESTADO DEL ARTE.....	3
1.4 HIPOTESIS.....	8
1.5 OBJETIVOS.....	8
1.5.1 Objetivo General.....	8
1.5.2 Objetivos Específicos.....	8
1.6 METODOLOGÍA	9
CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEÓRICOS DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS.....	12
2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	12
2.2 EL SOL Y LA RADIACIÓN.....	14
2.3 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MATERIALES.....	16
2.3.1 Absorción.....	16
2.3.2 Ley de Beer - Lambert	18
2.4 ESTRUCTURA DE BANDAS DE LOS MATERIALES	18
2.5 MATERIALES SEMICONDUCTORES.....	20
2.5.1 Materiales Semiconductores Intrínsecos	20
2.5.2 Materiales Semiconductores Extrínsecos	21

2.6	MATERIALES SEMICONDUCTORES PARA CELDAS SOLARES	
	23	
2.7	TIPOS DE UNIÓN EN LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS	25
2.7.1	Unión Semiconductor - Semiconductor.....	26
2.7.2	Unión semiconductor – metal	28
2.7.3	Unión Tipo Schottky.....	31
2.7.4	Unión Tipo Óhmica	33
2.8	Parámetros principales de una celda solar:	37
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS		
FOTOVOLTAICOS DE LAS CELDAS SOLARES DE ESTRUCTURA <i>CdS/</i>		
<i>AgSbS, Se2</i>		
		40
3.1	FABRICACIÓN DE MUESTRAS.....	40
3.2	IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL DE ELECTRODOS SEGÚN	
	LA TEORÍA DE UNIÓN OHMICA.....	45
	CONDICIONES DE EVALUACIÓN	46
3.3	MEDICIÓN DE DENSIDAD DE CORRIENTE Y VOLTAJE	48
3.4	RESULTADOS	50
3.4.1	(Grupo de Celdas 1) Influencia del Tratamiento Térmico RTP	
	en Celdas y Contactos de Pintura de Plata	50
3.4.2	(Grupo de Celdas 2) Influencia de Tratamientos Térmicos en	
	Aire sobre Contactos de Pintura de Plata y Aluminio evaporado.....	53
3.4.3	(Grupo de celdas 3) Influencia del Material de Contacto en la	
	Eficiencia de la Celda Fotovoltaica	57
3.4.4	(Grupo de Celdas 4) Influencia del Tipo de Material sobre la	
	Eficiencia de Celdas Fotovoltaicas de estructura <i>CdS/AgSbS, Se2</i>	62

3.4.5 (Grupo de celdas 5) Influencia del Espesor del Electrodo de Plata Evaporada en las Celdas de estructura $CdS/AgSbS, Se_2$	68
3.4.6 Análisis del Grupo 5 con Mascara	73
3.4.7 (Grupo de Celdas 6) Evaluación de la Influencia de la Distancia entre Contactos en las Celdas Fotovoltaicas de estructura $CdS/AgSbS, Se_2$	76
3.4.8 Resultados de SEM	81
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS TEÓRICO DE LA CURVA DE CORRIENTE Y TENSIÓN DE LA CELDA FOTOVOLTAICA DE ESTRUCTURA $CdS/AgSbS, Se_2$	84
4.1 DETERMINACIÓN DE MÁXIMA INTENSIDAD DE CORRIENTE PARA EL MATERIAL ABSORBEDOR $AgSbS, Se_2$	84
4.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES DE LA CELDA FOTOVOLTAICA	88
4.2.1 Modelo Equivalente a una Celda Fotovoltaica Ideal	88
4.2.2 Modelo de un Diodo con Resistencias R_p y R_s	91
4.2.3 Modelo de Dos Diodos con Resistencias R_p y R_s	92
4.3 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE LA CELDA FOTOVOLTAICA REAL, USANDO EL MODELO DE UN DIODO CON RESISTENCIA R_p Y R_s	93
4.3.1 Métodos Numéricos	98
4.3.2 Experimentos:	103
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	112
5.1 CONCLUSIONES DE EXPERIMENTACIÓN	112

5.2 CONCLUSIONES DE SOLUCIÓN DE ECUACIÓN DE LA CELDA FOTVOLTAICA.....	113
5.3 TRABAJOS FUTUROS.....	114
BIBLIOGRAFÍA	115

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PAÍSES DEL CINTURÓN SOLAR. [5]	5
FIGURA 2. CIRCUITO EQUIVALENTE DE IMPEDANCIA DE CONTACTOS.....	7
FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA.....	13
FIGURA 4. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	13
FIGURA 5. ESQUEMA DE BANDAS DE MATERIALES.....	19
FIGURA 6. REPRESENTACIÓN DE ENLACES COVALENTES DE UN SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO DE SILICIO.....	20
FIGURA 7. REPRESENTACIÓN DE ENLACES COVALENTES EN UN MATERIAL EXTRÍNSECO.....	22
FIGURA 8. TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS SEGÚN EL TIPO DE GENERACIÓN.....	24
FIGURA 9. TIPOS DE UNIONES DE MATERIALES SEMICONDUCTORES.....	26
FIGURA 10. UNIÓN DE SEMICONDUCTORES TIPO P Y TIPO N.....	28
FIGURA 11. REPRESENTACIÓN DE UN DIAGRAMA DE BANDAS PARA COMPARACIÓN DE UNIÓN METAL –SEMICONDUCTOR TIPO N.....	30
FIGURA 12. REPRESENTACIÓN DE CURVA DE CORRIENTE TENSIÓN ELÉCTRICA DE UN CONTACTO TIPO SCHOTTKY.....	32
FIGURA 13. DIAGRAMA DE BANDAS UNIÓN SCHOTTKY SEMICONDUCTOR TIPO N – METAL.....	32
FIGURA 14. DIAGRAMA DE BANDAS UNIÓN SCHOTTKY SEMICONDUCTOR TIPO P – METAL.....	33
FIGURA 15. REPRESENTACIÓN DE CURVA DE CORRIENTE Y TENSIÓN DE UN CONTACTO ÓHMICO.....	34
FIGURA 16. DIAGRAMA DE BANDAS UNIÓN ÓHMICA SEMICONDUCTOR TIPO N – METAL.....	34
FIGURA 17. DIAGRAMA DE BANDAS UNIÓN ÓHMICA SEMICONDUCTOR TIPO P – METAL.....	35
FIGURA 18. REPRESENTACIÓN DE LA CURVA DE CORRIENTE Y TENSIÓN DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA.....	38
FIGURA 19. DEPÓSITO DE PELÍCULAS DELGADAS DE SULFURO DE ANTIMONIO.....	42
FIGURA 20. REPRESENTACIÓN DE CAPAS DE UNA CELDA DE ESTRUCTURA $CdS/Ag(Se, Sb)_2$	43
FIGURA 21. MÁQUINA DE EVAPORACIÓN TÉRMICA Y ELECTRODOS DE PLATA Y ALUMINIO DEPOSITADOS EN CELDAS FOTOVOLTAICAS.....	44
FIGURA 22. MUESTRAS ELABORADAS EN EL LABORATORIO.....	44
FIGURA 23. GRAFICO ESQUEMÁTICO DE CELDA SOLAR.....	45
FIGURA 24. PRUEBA DE EFICIENCIA DE LA CELDA EN EL SIMULADOR SOLAR.....	49
FIGURA 25. ORDEN DE ELECTRODOS PARA EL GRUPO DE CELDAS 1.....	51
FIGURA 26. GRÁFICA DE CORRIENTE Y TENSIÓN: COMPARACIÓN DE TRATAMIENTOS DEL GRUPO 1.....	52
FIGURA 27. ORDEN DE ELECTRODOS PARA EL GRUPO DE CELDAS 2.....	54
FIGURA 28. COMPARACIÓN DE CONTACTOS ALUMINIO Y PLATA.....	56

FIGURA 29. CONFIGURACIÓN DE ELECTRODOS GRUPO DE CELDAS 3.....	58
FIGURA 30. COMPARACIÓN TRATAMIENTO TÉRMICO CONTACTO 2.....	60
FIGURA 31. CURVAS DE DENSIDAD DE CORRIENTE Y TENSIÓN GRUPO 3, CELDA 2.....	61
FIGURA 32. ORDEN DE ELECTRODOS CELDA 1 Y 2. GRUPO 4.....	63
FIGURA 33. ORDEN DE ELECTRODOS CELDA 3 Y 4. GRUPO 4.....	63
FIGURA 34. ORDEN DE LOS ELECTRODOS CELDAS 1 Y 2 GRUPO 5.....	69
FIGURA 35. ORDEN DE LOS ELECTRODOS CELDAS 3 Y 4 GRUPO 5.....	69
FIGURA 36. CURVA DE DENSIDAD DE CORRIENTE Y TENSIÓN. CELDA 3. GRUPO DE CELDAS 5.....	72
FIGURA 37. RESULTADOS CELDA 1. GRUPO DE CELDAS 5.....	73
FIGURA 38. MASCARA UTILIZADA PARA AISLAR LA CELDA Z, EN EL GRUPO DE CELDAS.....	74
FIGURA 39. CELDA Z CON ELECTRODO 3 AISLADO.....	74
FIGURA 40. GRAFICA DE CORRIENTE Y TENSIÓN ELECTRODO 3, CELDA Z CON ELECTRODO AISLADO, CON Y SIN TRATAMIENTO TÉRMICO.....	75
FIGURA 41. CELDAS ELABORADAS GRUPO DE CELDAS 6.....	77
FIGURA 42. CURVA DE CORRIENTE Y TENSIÓN CELDA 1 NEUTRO PARTE INFERIOR DE LA CELDA, GRUPO 6.....	80
FIGURA 43. CURVA DE CORRIENTE Y TENSIÓN CELDA 1 NEUTRO LADO DE LA CELDA, GRUPO 6.....	80
FIGURA 44. MUESTRAS ANALIZADAS CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.....	82
FIGURA 45. INTERFAZ ENTRE LA PINTURA DE PLATA Y LA PINTURA DE CARBÓN. MUESTRA 5.....	82
FIGURA 46. RESULTADOS DE MUESTRAS DE PLATA EVAPORADA EVALUADAS CON SEM.....	83
FIGURA 47. ESPECTRO AM 1.5.....	85
FIGURA 48. FOTONES POR UNIDAD DE ÁREA SEGÚN EL ESPECTRO AM 1.5.....	86
FIGURA 49. PORCIÓN DE LA CURVA DEL ESPECTRO AM 1.5 PARA EL MATERIAL ABSORBEDOR $Ag(Sb,Se)_2$	87
FIGURA 50. CIRCUITO IDEAL DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.....	89
FIGURA 51. GRÁFICA DE CORRIENTE Y TENSIÓN EN OSCURIDAD DE UNA CELDA SOLAR IDEAL.....	90
FIGURA 52. GRÁFICA DE CORRIENTE Y TENSIÓN CON ILUMINACIÓN DE UNA CELDA SOLAR IDEAL.....	91
FIGURA 53. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MODELO UN DIODO CON RESISTENCIAS R_p Y R_s	92
FIGURA 54. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MODELO DOS DIODOS CON RESISTENCIAS R_p Y.....	93
FIGURA 55. CIRCUITO EQUIVALENTE MODELO UN DIODO CON R_p Y R_s CON FUENTE DE TENSIÓN COMO CARGA.....	94
FIGURA 56. DIAGRAMA DE FLUJO DE ALGORITMO DE SOLUCIÓN.....	101
FIGURA 57. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES, CELDA 2, GRUPO 4, CTO 1, ALUMINIO EVAPORADO 100NM + PINTURA PLATA. (PÁG 61).....	105
FIGURA 58. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES, CELDA 2, GRUPO 4, CTO 3 PLATA EVAPORADA 100NM + PINTURA PLATA (PÁG 61).....	106

<i>FIGURA 59. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES, CELDA 1, GRUPO 5, CTO 1 PLATA EVAPORADA 100NM + PINTURA PLATA (PÁG 68)</i>	107
<i>FIGURA 60. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES, CELDA 1, GRUPO 6, CTO 2 PLATA EVAPORADA 60NM + PINTURA PLATA (PÁG 76)</i>	108
<i>FIGURA 61. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES, CELDA 1, GRUPO 6, CTO 3 PLATA EVAPORADA 60NM + PINTURA PLATA (PÁG 76)</i>	109
<i>FIGURA 62. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES, CELDA 2, GRUPO 6, CTO 1 PLATA EVAPORADA 60NM + PINTURA PLATA (PÁG 76)</i>	109
<i>FIGURA 63. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES, CELDA 2, GRUPO 6, CTO 2 PLATA EVAPORADA 60NM + PINTURA PLATA (PÁG 76)</i>	110
<i>FIGURA 64. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES, CELDA 3, GRUPO 6, CTO 1 PLATA EVAPORADA 100NM + PINTURA PLATA (PÁG 76)</i>	110
<i>FIGURA 65. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES, CELDA 3, GRUPO 6, CTO 2 PLATA EVAPORADA 300NM + PINTURA PLATA (PÁG 76)</i>	111

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FUNCIONES DE TRABAJO Y AFINIDAD ELECTRÓNICA DE ALGUNOS MATERIALES	36
TABLA 2. PROPIEDADES DE MATERIALES ELEGIDOS PARA EL DEPÓSITO DE ELECTRODOS.	46
TABLA 3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	47
TABLA 4. VARIABLES DE EVALUACIÓN PARA CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.	47
TABLA 5. ESPECIFICACIONES DE ELABORACIÓN DE CELDAS GRUPO 1	50
TABLA 6. ESPECIFICACIONES DE EXPERIMENTOS ELECTRODOS CELDA 2	51
TABLA 7. RESULTADOS CELDA 2	52
TABLA 8. ESPECIFICACIONES DE ELABORACIÓN DE CELDAS GRUPO 2.....	53
TABLA 9. ESPECIFICACIONES DE ELECTRODOS DE GRUPO DE CELDAS 2.	54
TABLA 10. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL GRUPO DE CELDAS 2	57
TABLA 11. ESPECIFICACIONES DE ELABORACIÓN CELDAS GRUPO 3.	57
TABLA 12. CARACTERÍSTICAS DE ELECTRODOS GRUPO 3	58
TABLA 13. CARACTERIZACIÓN CELDA 1. GRUPO 3.....	59
TABLA 14. CARACTERIZACIÓN CELDA 2. GRUPO 3.....	60
TABLA 15. ESPECIFICACIONES DE ELABORACIÓN GRUPO 4.....	62
TABLA 16. ESPECIFICACIÓN DE ELECTRODOS GRUPO DE CELDAS 4.....	64
TABLA 17. CARACTERIZACIÓN CONTACTOS SIN TRATAMIENTO TÉRMICO GRUPO 4.	65
TABLA 18. RESULTADOS DE RELACIÓN DE EFICIENCIA CON LA TEMPERATURA CALENTAMIENTO EN AIRE.	66
TABLA 19. RELACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA PLANTA CON ESPESORES DE 100NM Y 200NM DE PLATA.	67
TABLA 20. ESPECIFICACIONES DE ELABORACIÓN GRUPO DE CELDAS 5.	68
TABLA 21. ESPECIFICACIONES DE CONTACTOS PARA LAS CELDAS DEL GRUPO 5.	70
TABLA 22. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LA EFICIENCIA DE LA CELDA Y EL ESPESOR DEL ELECTRODO ANALIZADO.	71
TABLA 23. RESULTADOS DEL ELECTRODO 3, CELDA Z CON ELECTRODO AISLADO, CON Y SIN TRATAMIENTO TÉRMICO.	75
TABLA 24. CONFIGURACIÓN DE CONTACTOS, GRUPO DE CELDAS 6.	78
TABLA 25. PARÁMETROS OBTENIDOS GRUPO 6.	79
TABLA 26. ESPECIFICACIONES DE MUESTRAS EVALUADAS EN SEM.	81
TABLA 27. INTERVALOS DE SOLUCIÓN, MODELO MATEMÁTICO DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA.	102
TABLA 28. ELECTRODOS EVALUADOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.	104

TABLA 29. RESULTADOS PARA LA CELDA 2 DEL GRUPO 4 CON CONTACTOS DE DIFERENTE MATERIAL 104

TABLA 30. RESULTADOS PARA LA CELDA 1 DEL GRUPO 5. 106

TABLA 31. RESULTADOS PARA LAS CELDAS DEL GRUPO 6. 108

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al país de México, a la Universidad Autónoma de Nuevo León y al CONACYT por permitirme desarrollar por medio del programa de becas mis estudios en la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovables.

Les agradezco a mis padres y hermanos por apoyarme en esta etapa y a la familia García Vásquez por ser como mi familia durante mi estadía fuera de mi país.

Le agradezco a todo el programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovables y al grupo de Energías Térmica y Renovables por su apoyo en este proceso.

Le agradezco a mi grupo de compañeros de maestría en especial a Antonio Flores, Victor Sanchez, Alfredo Jimenez, Juan C. Ulloa, Yonathan Heredia, Soraima Carmona, Fernando Fong por ser una gran compañía durante esta etapa y sobre todo a Luis A. García, Carolina Ramírez, Camilo Ramírez y Catalina porque se convirtieron en parte esencial de todo este proceso.

Le agradezco al grupo de Materiales Emergentes de Celdas Fotovoltaicas por su ayuda incondicional en este proyecto, gracias especialmente a sus líderes la Doctora Bindu Krishnan, Doctor Shaji Sadasivan y el Doctor David Avellaneda por darme un poco de su conocimiento.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto de investigación aquí presentado, consiste en la valoración de la influencia del tipo del material y la topología de los contactos en la eficiencia de las celdas solares desarrolladas en la Universidad Autónoma de Nuevo León en la Ciudad de Monterrey, México. Se muestra entonces el desarrollo de una metodología para evaluar la eficiencia de las celdas construidas partiendo del hecho de utilizar diferentes combinaciones de contactos.

El proyecto se enfoca principalmente en la influencia de los contactos sobre las celdas solares, los cuales son uno de los agentes menos estudiados en la elaboración de dichos dispositivos de conversión de energía. Por medio de los contactos o electrodos se puede recolectar la energía eléctrica generada por la celda solar, debido a que los materiales utilizados para la construcción de las celdas solares, la geometría y el tipo de método de depósito son factores clave en la búsqueda de un mejor rendimiento, se implementó una serie de escenarios prácticos capaces de suministrar información para caracterizar y elegir el tipo de contacto adecuado para dicho tipo de celda solar.

El proyecto va de la mano con la solución de la ecuación de una celda solar real para el modelo de un diodo con Resistencia Serie (R_s) y Resistencia Paralelo (R_p); el desarrollo de esta ecuación permitirá conocer más a fondo características propias del material que no son posibles de determinar con las técnicas de espectroscopia o las curvas de corriente y tensión.

1.2 MOTIVACIÓN

La eficiencia de las celdas solares radica en una serie de factores que son hoy analizados por diferentes grupos de investigación orientados a diferentes áreas del saber. Todos los componentes de la celda solar representan un cambio en el comportamiento final del elemento, sin embargo hay algunos componentes que se encuentran directamente relacionados en el momento de ver dicho dispositivo como un componente eléctrico, la resistencia serie y la resistencia en paralelo presentadas en el circuito eléctrico de una celda real representan la importancia de la unión de los materiales al momento de querer conseguir el mayor rendimiento de la celda.

El grupo de materiales orientado a celdas fotovoltaicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León ha realizado diferentes investigaciones con el fin de encontrar materiales de costos moderados y competitivos de fácil adquisición en el territorio nacional para la fabricación de celdas solares, es así como se obtiene la celda de estructura: $CdS/AgSb(S,Se)_2$ la cual presenta un buen comportamiento. El paso a seguir es realizar una evaluación significativa del comportamiento de la celda solar frente a diferentes tipos de contacto, basándose en la teoría eléctrica de la celda fotovoltaica, los materiales y la experimentación; lo cual se verá reflejado en el rendimiento del dispositivo y permitirá obtener una mejora al conjunto de la celda bajo análisis.

La celda de estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$ se encuentra en un proceso de evolución en el que se realizan diferentes tratamientos térmicos a los materiales semiconductores, para conseguir un mejor rendimiento en el proceso de conversión de energía. Éste trabajo permitirá conocer un poco más sobre el tipo de contacto que se debe de utilizar para la celda, además de conocer variables como la corriente de saturación ($-I_0$), R_S y R_P las cuáles serán proporcionadas por

la solución de la ecuación de la celda real y son propias de los materiales que componen la celda; esto permitirá caracterizar más a detalle el dispositivo.

1.3 ESTADO DEL ARTE

Hoy en día la mayoría de las celdas fotovoltaicas comerciales están hechas a base de silicio, siendo el silicio monocristalino la opción más eficiente y costosa, sin embargo hay vigentes diversas investigaciones con el fin de producir diferentes semiconductores como lo es el caso del compuesto $AgSb(S, Se)_2$ el cual posee una estructura cubica centrada en las caras, con parámetro de red $a=5.786 \text{ \AA}$, con las siguientes propiedades [1].

Brecha de energía indirecta	Coefficiente de Absorción Óptica	Movilidad de portadores de carga (huecos)
1.16 eV	10^4 cm^{-1}	$1500 \frac{\text{cm}^2}{V_s}$

Éste material se obtiene mediante la composición de películas delgadas, obtenidas mediante técnicas de depósito de material como lo son: baño químico y deposición térmica de vapor [1], [2], [3].

El uso de materiales como la plata, antimonio y selenio en la elaboración de las celdas solares de estructura tipo: $CdS/AgSb(S, Se)_2$ es de gran importancia, debido a que México cuenta con la ventaja de tener una producción considerable de dichos elementos. En el año 2016 México cumplió su séptimo año consecutivo como el mayor productor de plata del mundo alcanzando 186.2 millones de onzas [4].

Las campañas de concientización por el cuidado del medio ambiente y la reducción del costo de producción de las células fotovoltaicas, han permitido un acelerado crecimiento en el uso de estos elementos en proyectos de centrales eléctricas, permitiendo tener sistemas de generación distribuida capaces de abastecer de energía eléctrica a base de fuentes renovables zonas que no se encuentran interconectadas al sistema eléctrico nacional. México se encuentra ubicado dentro del cinturón solar se encuentra ubicado geográficamente entre el trópico de cáncer y el trópico de capricornio entre los paralelos 35° norte y 35° Sur el cual es un conjunto de 66 países que se compone del 75% de la población mundial [5]. Estos países reciben la mayor cantidad de radiación solar en el planeta y México se encuentra entre los 5 países con mayor potencial en materia solar junto con China, Singapur, Australia e India, según estadísticas de la secretaria de Energía [6]. La capacidad eléctrica instalada en los Estados Unidos Mexicanos (México) para el año 2015 fue de 65,452 MW de los cuales solo 56MW pertenecían a la generación de electricidad a base de energía solar, lo cual representaba un 0.085% del total; sin embargo actualmente y en el margen de la reforma energética representa un 0.86%, lo cual significa un crecimiento satisfactorio

rendimiento de las celdas solares utilizadas se pudo ver afectado por la morfología del contacto y el espesor de la película delgada de CdS. Los resultados obtenidos mostraron que la colección de portadores es ineficiente para espesores de CdS mayores de 1 μm ; se identificó en la gráfica de corriente y tensión un comportamiento característico de un diodo tipo schottky el cual se relaciona con una barrera de potencial creada por la unión del semiconductor y el metal, estas dos condiciones presentadas se ven reflejadas finalmente en el aumento de la resistencia serie del circuito representativo de la celda; un caso similar se puede ver en [8] donde se reporta un estudio detallado de los contactos (electrodos) tipo óhmicos de platino (Pt) para celdas fotovoltaicas tipo Graetzel, donde se incluye como parámetro principal el espesor de la película depositada como contacto en un rango de 0 a 415 nm donde se pudo observar que a medida de que se realizaba un mayor deposito se adquiría una resistencia serie menor, las medidas tomadas para dicha investigación se realizaron por medio de un Microscopio Electrónico de Barrido (S.E.M); las resistencias se midieron por el sistema de Medida de Efecto Hall y la transferencia de carga se midió con la espectroscopia electromecánica de Impedancia (E.I.S); en los resultados finales se pudo ver que la conductividad de los electrodos mejoró con el aumento del tiempo de deposición del platino, sin embargo para espesores mayores de 100 nm no se encontró una variación significativa; al igual de que los resultados finales del rendimiento de la celda mostraron que no hay una gran diferencia al tener un espesor mayor de 2 μm . Se puede encontrar de la misma manera investigaciones [9] donde se realizan experimentos también con celdas tipo Graetzel y se reporta la influencia de los contactos de platino en la resistencia de transferencia de carga, en este proyecto se representó el sistema el circuito eléctrico mostrado en la *Figura 2*.

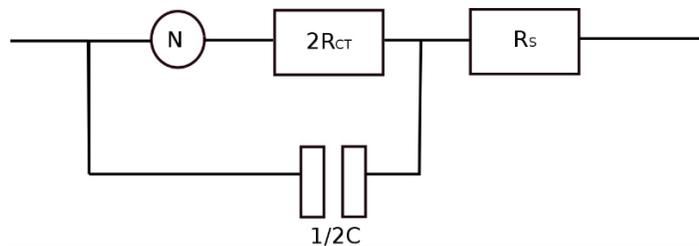


Figura 2. Circuito equivalente de impedancia de contactos

Z_n : Impedancia de difusión

R_{ct} : Resistencia de transferencia de carga de los electrodos

C : Capacidad de doble capa de un electrodo

R_s : Resistencia serie

Teniendo en cuenta la capacitancia provista por los electrodos, la resistencia serie (R_s), la resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) y la impedancia de difusión. En el trabajo, se reportó la variación de los parámetros eléctricos de la celda con diferentes espesores de película de platino, además de la distancia entre los diferentes electrodos.

Según el estudio realizado la variación de algunos parámetros causaba cambios en los valores del circuito, por ejemplo la distancia entre contactos, se veía reflejada en la impedancia de difusión (Z_n) y el espesor del mismo podía aumentar o disminuir la resistencia serie (R_s). A medida de que aumentaba el espesor del electrodo de Pt, se evidencio que la transferencia de carga era mayor, se pueden llegar a ver cambios significativos aumentando simplemente en 2 nm el espesor. En la investigación se relacionó la capacidad de transferencia de carga y las bajas resistencia para espesores mayores de 450 nm de Pt con la superficie del depósito del material, ya que cuenta con menos

porosidad y mayor área efectiva. Se hizo uso de un microscopio de fuerza atómica y la conductividad electrónica sirvió de apoyo para constatar la dependencia del espesor de contacto.

1.4 HIPOTESIS

¿Es posible obtener una mejora en la eficiencia de la celda fotovoltaica de estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$ al cambiar la morfología y el material del electrodo utilizado teniendo en cuenta el funcionamiento de la celda y los conceptos teóricos necesarios para analizar su comportamiento?

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Determinar la influencia del tipo de material y topología de los contactos en las celdas solares de estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$, desarrolladas en la Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Identificar las diferentes variables involucradas en la eficiencia de las celdas solares.
- Elaborar una metodología que facilite la influencia de los electrodos en la eficiencia y comportamiento de la celda fotovoltaica de estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$

- Elaborar las muestras que cumplan con los requerimientos de la metodología diseñada.
- Caracterizar las celdas fotovoltaicas por medio de las curvas de densidad de corriente (J) y tensión eléctrica (V).
- Implementar un método numérico para la encontrar la solución de la ecuación de la celda fotovoltaica, con lo que se podrán encontrar parámetros relacionados a la construcción las muestras.
- Analizar los electrodos por medio de técnicas como Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) para determinar su morfología.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos.

1.6 METODOLOGÍA

Éste es un proyecto de innovación y desarrollo tecnológico experimental que busca conocer el comportamiento de las celdas fotovoltaicas de estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$ elaboradas en la Universidad Autónoma de Nuevo León – Monterrey, México según el tipo de electrodo utilizado para la recolección de la electricidad generada por las mismas.

Haciendo un análisis de la caracterización de celdas solares y teniendo en cuenta estudios como [7], [8], [9], [10], [11] se propone la siguiente metodología de evaluación:

- **Elaboración de Celdas fotovoltaicas:** La celda solar utilizada es del tipo $CdS/AgSb(S,Se)_2$ la cual tiene como semiconductor tipo N el compuesto CdS, y como semiconductor tipo P el compuesto ternario $AgSb(S,Se)_2$, el cual ha demostrado un buen rendimiento en la capacidad de absorción. La celda es elaborada mediante capas de películas delgadas.

El semiconductor Sb_2S_3 se deposita por medio de baño químico, y sobre este se deposita plata por medio de evaporación térmica al vacío. El paso final consiste en meter esta estructura a un Horno de vacío, donde en primera instancia se obtiene una capa de Ag_2Se a 80 °C que reacciona con el Sb_2S_3 a 350 °C, para conocer el procedimiento de elaboración de las muestras a más detalle se puede consultar en diversa literatura: [2], [3], [12].

Cada una de las celdas o muestras estudiadas tendrá la misma estructura: $CdS/AgSb(S,Se)_2$, sin embargo se pretende conocer los cambios obtenidos en las características ópticas y eléctricas del material al cambiar los espesores de las capas utilizadas para la elaboración de cada una de ellas.

Se analizaran un conjunto de muestras que tendrán diferentes modificaciones en sus procesos de elaboración, para cada una de ellas se seguirá un protocolo diferente de evaluación de contactos que partirá de hipótesis o verificaciones obtenidas del anterior grupo de muestras que se estudie.

- **Depósito de material sobre las celdas solares para elaborar los contactos:** Los metales utilizados para la evaluación de contactos son: plata (Ag), y aluminio (Al), ambos sobre una base de pintura de carbón. Las técnicas de depósito utilizadas para los contactos, serán la evaporación térmica y simplemente “pintando” en la superficie, mediante pintura de plata. Esto permitirá obtener diferentes propiedades de adhesión de los contactos en la estructura. Se tendrán diferentes tamaños de contactos y diferentes espesores para cada uno de los materiales antes mencionados, que permitirán conocer el comportamiento de las propiedades eléctricas según la naturaleza del electrodo
- **Caracterización eléctrica de celdas fotovoltaicas:** Se obtendrá la curva corriente tensión (I-V) de las celdas fotovoltaicas, la cual permitirá conocer los

principales parámetros de las celdas, como son: Voltaje de circuito abierto V_{oc} , Corriente de corto circuito I_{sc} , Potencia máxima P_m , Resistencia serie R_s y Resistencia paralelo R_p (Los dos últimos serán valores aproximados según la pendiente de la curva en V_{oc} e I_{sc} , respectivamente). Finalmente se determinará la eficiencia de las celdas bajo condiciones estándar ($25\text{ }^\circ\text{C}$, 1000 W/m^2).

- **Solución de la ecuación de la celda real para el modelo de un diodo con Resistencias Serie (R_s) y Resistencia Paralelo (R_p):** Partiendo de los valores aproximados:
 - R_s : Inverso de la pendiente de la curva en el punto de V_{oc} .
 - R_p : Inverso de la pendiente de la curva en el punto de I_{sc} .Se hará uso de un método numérico que permitirá la solución de la ecuación de la celda, los resultados finales se compararan con los resultados iniciales para conocer el grado de incertidumbre al utilizar los primeros valores.
- **Elaboración de celdas fotovoltaicas con las mejores propiedades eléctricas:** Se pretende generar repetitividad en el proceso, por lo que al obtener la celda con las mejores propiedades eléctricas se realizara de nuevo un conjunto de muestras a las cuales se les realizarán estudios para conocer los posibles cambios que se evidenciaran en sus parámetros.
- **Caracterización de las propiedades del material de la celda fotovoltaica:** Para el grupo de celdas finales se realizara la caracterización del material por medio de técnicas de espectroscopia como Microscopia electrónica de barrido. (SEM).
- **Análisis y comparación de resultados con la literatura:** Comparación de propiedades eléctricas de cada uno de los contactos elaborados y propiedades ópticas.

CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEÓRICOS DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS

2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Tal como una onda senoidal se puede representar una onda electromagnética en donde la distancia que recorre en una oscilación o periodo se llama longitud de onda, lo cual se puede ver en la *Figura 3*. Las ondas electromagnéticas también tienen una dirección de oscilación a lo cual se le llama polarización de onda, lo cual ocurre sobre un plano en donde la onda se propaga en una misma dirección, a diferencia de lo que se ve normalmente en iluminación donde la luz es no polarizada, para que esto cambie se necesitaría un material que solo deje pasar la luz a lo largo de un eje y se proyecta en un plano.

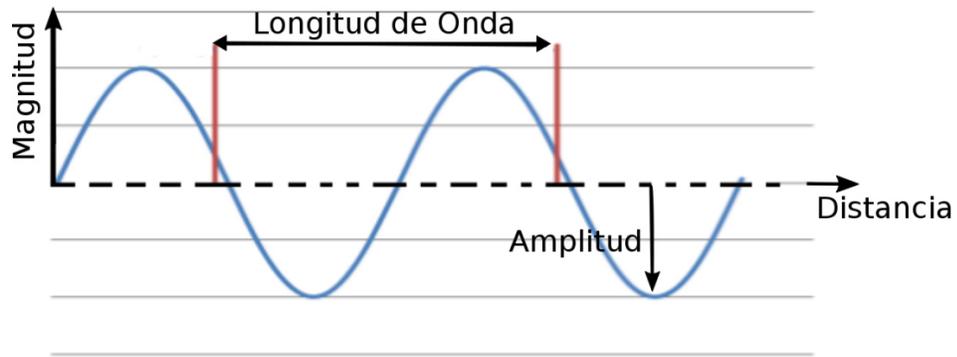


Figura 3. Representación de una onda electromagnética.

En términos de longitud de onda se puede ver en la Figura 4 la diferencia entre los tipos de ondas electromagnéticas

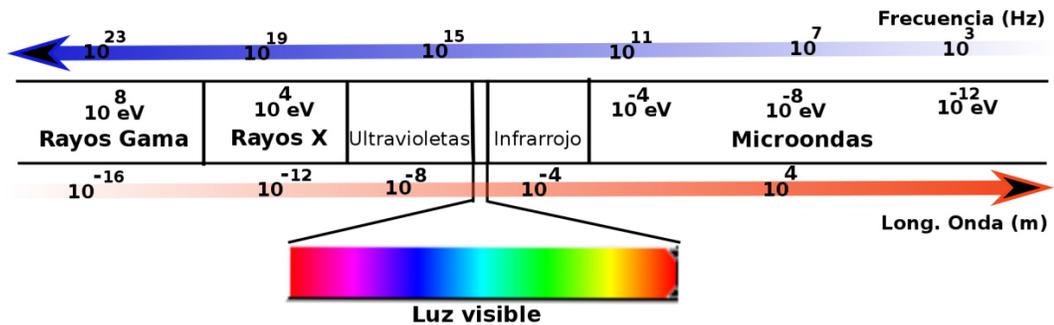


Figura 4. Espectro electromagnético.

Se puede ver que a medida de que la frecuencia aumenta, también lo hace la energía, pero la longitud de onda asociada disminuye. El ojo humano solo puede ver lo que se encuentra dentro del espectro de luz visible, lo cual se encuentra en un rango de aprox. 400 y 700 nm. [13].

2.2 EL SOL Y LA RADIACIÓN

El sol es una esfera compuesta por diferentes gases como helio, hidrógeno, oxígeno, carbono y neón, de 696.000 kilómetros de radio y ubicado a una distancia de la tierra de 150.000.000 kilómetros ($150 \times 10^6 \text{ Km}$); su temperatura alcanza en promedio 15.000.000 °C y constantemente está produciendo gran cantidad de radiación constituida por fotones que se propagan a 300.000 Km/s [14].

Las ondas electromagnéticas producidas por el sol se pueden clasificar en tres tipos: radiaciones ionizantes compuestas por los rayos cósmicos, radiaciones ópticas y ondas hertzianas compuestas por las microondas, ondas radar, televisión y radio.

La radiación óptica comprende:

- la radiación ultravioleta (UV): la cual no es visible para el ser humano y se encuentra entre 200 a 280 nm con la zona UVC, la zona UVB de 280 a 320 nm y la UVA de 320 a 400 nm.
- la luz visible de 400 a 800 nanómetros
- Los Rayos infrarrojos de 800 a 5.000 nm las cuales pueden ser absorbidos por las estructuras líquidas y producen calor en el momento que se agitan las moléculas.

La capa de ozono se comporta como un escudo protector frente a la radiación electromagnética del sol, la cual está constituida por 55% de rayos infrarrojos 40% de luz visible y 5% de rayos ultravioleta. Hay que tener en cuenta que los rayos UVB entre 290 y 320 nanómetros sólo representan un 2% de la radiación ultravioleta sin embargo contienen demasiada energía. Los rayos UVA cuya energía decrece en función de la longitud de onda se divide en UVA cortos y largos los cuales son menos energéticos.

La energía producida por el sol es de: $3.85 \times 10^{26} W$, [15] de la cual la tierra es capaz de captar solamente **175,945 TW**, lo cual equivale a un poco menos del **$4.57 \times 10^{-8}\%$** , que puede ser comparado con el consumo total de energía eléctrica promedio del planeta tierra, que es de $138,900 TW$.

la cantidad de energía radiante que llega hasta el límite de la atmósfera por unidad de superficie de forma perpendicular se puede conocer teniendo en cuenta la energía producida por el sol y una superficie esférica con radio igual a la distancia entre el sol y la tierra, por lo cual:

$$G_o = \frac{E_{sol}}{A_{esfera}} = \frac{3.85 \times 10^{26} W}{4\pi(150 \times 10^6 m)^2} = 1361.658 W/m^2 \approx 1362 W/m^2$$

Se debe tener en cuenta que la trayectoria que sigue la tierra alrededor del sol es una elipse, por lo que a medida de que la tierra se mueve cambia la cantidad de energía que llega a un punto en específico, por lo cual la cantidad de energía proveniente de la radiación solar depende de la ubicación del sol y el punto de la tierra que se quiere evaluar.

Masa de Aire: Este concepto se utiliza para caracterizar el trayecto que debe de realizar la radiación en un punto específico a través de la atmosfera. La radiación emitida por el sol se atenúa debido a diferentes elementos que interactúan, por ejemplo el oxígeno, dióxido de carbono y el vapor de agua presentes en las diferentes capas de la atmósfera.

Existen diferentes casos de evaluación ya catalogados según el ángulo de incidencia y la trayectoria recorrida por la radiación.

Una ecuación que puede definir el coeficiente AM se puede ver en la ecuación

$$AM = \sqrt{r \cos(z)^2 + 2r + 1} - r \cos(z)$$

Donde:

z : Ubicación del sol (0° en el cenit en el sentido de las manecillas del reloj)

$$r: \frac{\text{radio}_{\text{tierra}}}{\text{altura}_{\text{atm}}} = \frac{6731 \text{ Km}}{9 \text{ Km}} = 747.8$$

AM0: es la masa de aire para cualquier punto en el espacio exterior, en donde se supone que la radiación procedente del sol no es atenuada por ningún tipo de agente externo.

AM1: Esta condición se obtiene cuando el sol está en la parte superior (cenit) y la superficie se encuentra ubicada de manera perpendicular (90°); bajo estas condiciones, la radiación recorre una vez el espesor de la capa de la atmósfera hasta llegar a la superficie en cuestión.

AM1.5: Éste tipo de espectro de masa de aire se considera como la condición estándar para evaluación de celdas solares desde el año 1970, y es capaz de representar el comportamiento promedio de la radiación en latitudes medias. Se obtiene cuando la posición del sol con respecto a la vertical (cenit) forman un ángulo $z = 48.2^\circ$.

2.3 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MATERIALES

2.3.1 Absorción

Los materiales tienen diferentes comportamientos al interactuar con la radiación electromagnética, la capacidad de un material de captar la luz se conoce como absorción, dependiendo de las características del material, esa

energía absorbida puede ser transmitida o transformarse en calor o energía eléctrica. Los materiales opacos tienen una capacidad de absorción un poco más grande que los materiales transparentes. Existen diferentes formas de cuantificar la capacidad de absorción de un material, sin embargo el método más conocido es por medio del coeficiente de absorción, el cual relaciona el material, la absorción, transmitancia y reflectancia; éste coeficiente permite relacionar cuanta de la radiación incidente en un material es absorbida. Entonces conociendo la luz incidente con la luz transmitida se puede conocer el valor de la transmitancia, haciendo uso de la ecuación (1)

$$T = \frac{I}{I_o} \quad (1)$$

T: transmitancia

I: Luz transmitida

I_o : Luz incidente

Teniendo en cuenta la longitud de onda de la luz se tiene la densidad de óptica en una escala logarítmica como se muestra en la ecuación (2)

$$OD = -lg_{10}[1 - T] \quad (2)$$

OD: Densidad óptica

Con lo que se puede obtener el valor del coeficiente de absorción con la ecuación (3)

$$\alpha = \frac{OD}{d * lg_{10} * e} \quad (3)$$

α : Coeficiente de absorción

d : Espesor de la muestra

2.3.2 Ley de Beer - Lambert

La capacidad de absorción de un material se ve estrechamente relacionada con variables físicas como el espesor del elemento o su forma geométrica, a estas afirmaciones precisamente se refiere la ley de Beer – Lambert, la cual puede ser aplicada a cualquier medio por el cual la radiación electromagnética pueda propagarse.

La ley, afirma que variables físicas como las que se listan a continuación están directamente relacionadas con la absorción óptica:

- Espesor del material
- La concentración de las moléculas del medio donde se propague la luz

2.4 ESTRUCTURA DE BANDAS DE LOS MATERIALES

Los materiales según el tipo de propiedades (resistividad, brecha de energía E_g , comportamiento con temperatura, etc.) se pueden clasificar en tres tipos: metales, semiconductores y aislantes. En la Figura 5 se puede ver un esquema simplificado de bandas en el que se puede diferenciar cada uno de los tres tipos. La brecha de energía de los materiales (E_g) se puede definir como la diferencia de energía entre el mínimo de la banda de energía de conducción (E_c) y el máximo de la banda de valencia (E_v), por lo cual es la energía necesaria para que un electrón que se encuentre en la banda de valencia pueda moverse hasta la banda de conducción.

Como se puede ver en la *Figura 5* un material semiconductor es un material cuya brecha de energía se encuentra entre la de un metal y un aislante.

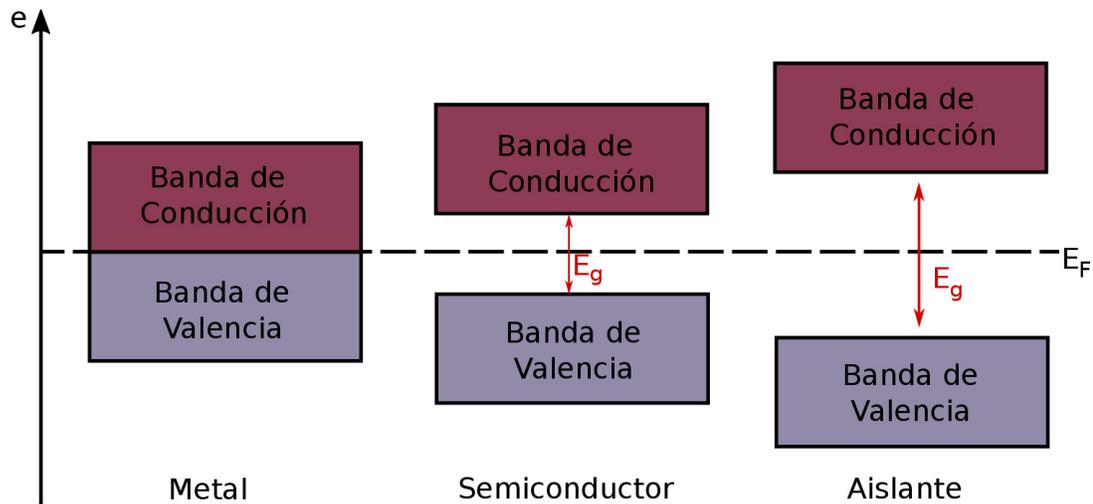


Figura 5. Esquema de bandas de materiales.

- **Metal:** La resistividad es directamente proporcional a la temperatura, en su esquema de bandas se puede ver que la banda de conducción y la banda de valencia se encuentran muy cerca y en algunos casos Incluso se pueden traslapar.
- **Aislante:** se tiene una resistividad muy alta, por lo cual la conducción de Electricidad bajo condiciones “normales” es prácticamente nula.
- **Semiconductor:** A bajas temperaturas se les hace casi imposible conducir la electricidad, por lo cual su comportamiento es más parecido al de un aislante, sin embargo a medida de que aumenta su temperatura el comportamiento se parece más al de un conductor; Los semiconductores tienen una estructura o una red cristalina sólida. El número de portadores de carga libres, depende

de la energía presente en el material, que puede ser térmica (temperatura) o bien óptica (fotones incidentes). Así, si se modifica la energía, también lo hará la resistividad del semiconductor.

2.5 MATERIALES SEMICONDUCTORES

2.5.1 Materiales Semiconductores Intrínsecos

Son materiales semiconductores que no tienen ningún tipo de impureza en su estructura. En la formación del material se tienen enlaces covalentes formados por grupos de diferentes átomos del mismo material que comparten los electrones de la capa de valencia para completar la ley del octeto, en el caso del silicio por ejemplo se tienen 4 electrones en la banda de valencia, en la *Figura 6* se puede ver una representación básica de los enlaces covalentes en el silicio.

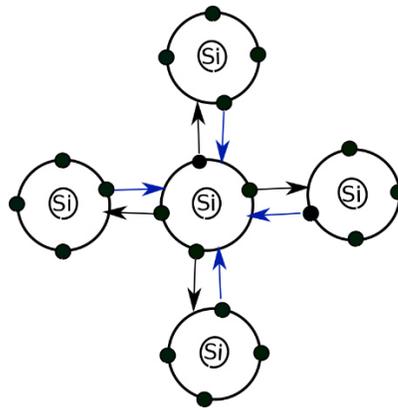


Figura 6. Representación de enlaces covalentes de un semiconductor intrínseco de silicio.

2.5.2 Materiales Semiconductores Extrínsecos

La creación de los materiales extrínsecos se da gracias a la necesidad de cambiar las características eléctricas del material por lo cual se hacen adiciones de otros materiales al material semiconductor principal, como el silicio, lo cual se llama proceso de dopado, empleando elementos como el Boro o fósforo.

Semiconductor Tipo P

En la búsqueda de nuevos elementos se adquieren los semiconductores tipo p los cuales tienen un proceso de dopado en el que el elemento añadido tiene menos electrones de valencia que el anfitrión (normalmente silicio). A la ausencia de electrones se le llama “hueco”, y en estos materiales, los electrones son los portadores minoritarios. [16]

$$n = N_A \quad p = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Con

n_i : Concentración intrínseca de portadores

N_A : Número de impurezas aceptoras

p : Portadores

Semiconductor Tipo N

A diferencia del anterior, éste tiene un proceso de dopado en el cual el elemento añadido tiene más electrones de valencia que el anfitrión, los huecos son los portadores minoritarios.

$$n = N_D \quad p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Con

n_i : Concentración intrínseca de portadores

N_D : Número de impurezas donadoras

p : Portadores

En la *Figura 7* se puede ver una representación básica de los enlaces covalentes de materiales semiconductores extrínsecos, la parte izquierda, se puede ver un semiconductor tipo P en el que el semiconductor anfitrión es el silicio, el cual tiene 4 electrones de valencia, se juntan entonces 4 átomos de silicio que realizan un enlace covalente con un átomo de boro, debido a que el boro solo tiene 3 electrones de valencia se encuentra la ausencia de un electrón que se conoce como hueco. Al lado derecho de la imagen se puede ver el caso opuesto en el que se representa un semiconductor tipo N, en este caso los 4 átomos de silicio comparten sus electrones de valencia con un átomo de fósforo (P) el cual tiene 5 electrones de valencia, por lo cual tiene un exceso de electrones lo cual se conocerá como electrón libre.

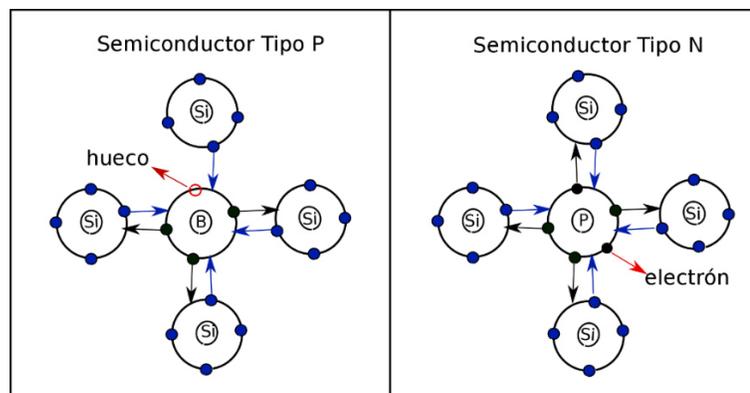


Figura 7. Representación de enlaces covalentes en un material extrínseco.

A una temperatura de 0 K los enlaces covalentes entre los átomos del material no se rompen, sin embargo al proporcionar energía: temperatura, con

una fuente de calor, una fuente de luz o un campo eléctrico, los enlaces se pueden romper y se generan electrones libres y ausencia de electrones o huecos. Cuando un fotón con la suficiente energía choca con los átomos de un material semiconductor puede hacer que los electrones de valencia de los átomos rompan el enlace covalente que los une pasen a ocupar otros niveles de mayor energía del que ellos provienen.

La conducción de electricidad en los semiconductores se debe tanto a los electrones libres como a los huecos que se mueven en el sentido contrario producidos por la fuente de energía.

En un semiconductor intrínseco se tiene el mismo número de electrones que de huecos, a diferencia de los semiconductores extrínsecos en donde dependiendo del tipo de impureza (donadora = electrón, o aceptadora = hueco) se puede tener un mayor número de electrones o un mayor número de huecos.

Cuando se ilumina un semiconductor con fotones de energía mayor a la brecha de energía (E_g) se producen pares de electrones y huecos.

2.6 MATERIALES SEMICONDUCTORES PARA CELDAS SOLARES

La celda solar no tiene elementos móviles sólo se compone de la unión de dos materiales semiconductores tipo P y tipo N. El funcionamiento de una celda fotovoltaica (celda solar) depende del efecto fotovoltaico, el cual es un proceso caracterizado por la producción de electricidad causada por el intercambio de energía entre fotones y los electrones de un material semiconductor. Principalmente la celda fotovoltaica (unión P - N) bajo iluminación genera electrones y huecos que se desplazan a través de la unión debido al campo eléctrico que se presenta en la zona de agotamiento, lo cual se explicara más

adelante. En la *Figura 8* se muestra la clasificación de tecnologías de celdas solares que incluye unión P-N y otros.

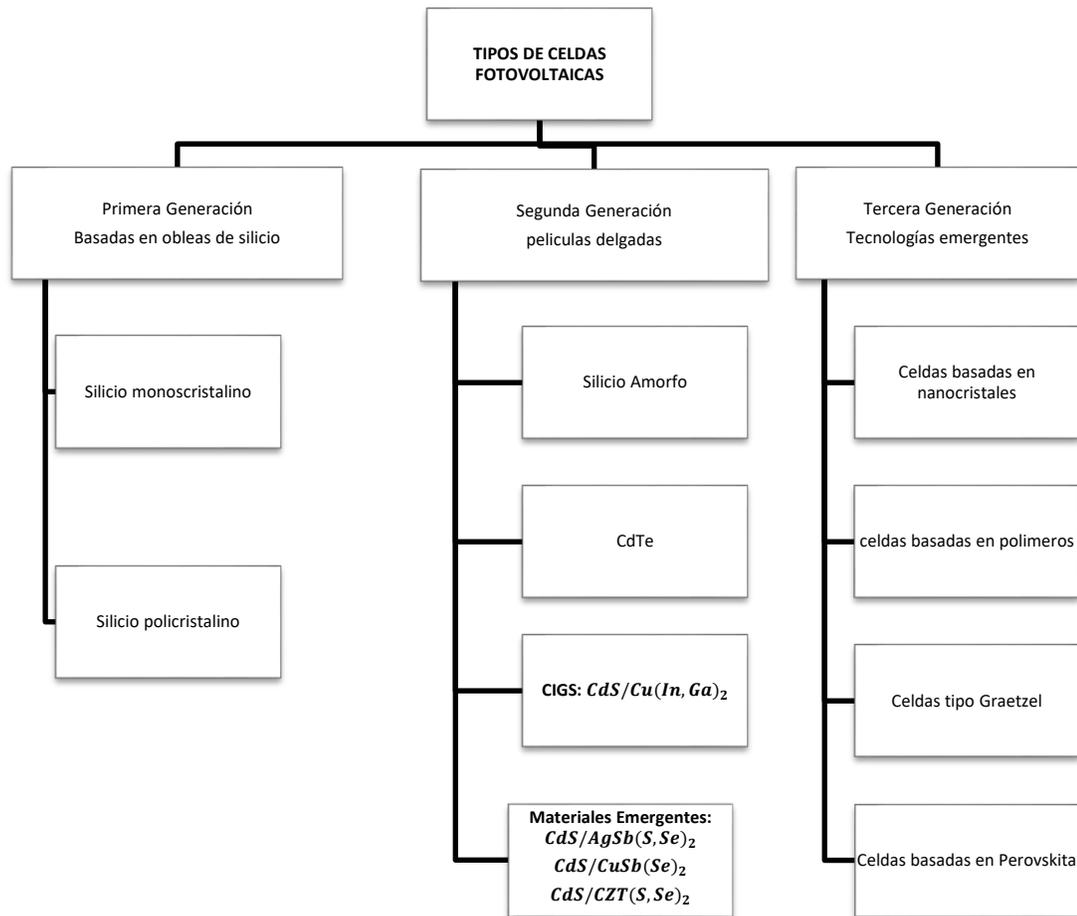


Figura 8. Tipos de celdas fotovoltaicas según el tipo de generación.

El uso de heterouniones (unión de diferentes semiconductores) permite el uso de materiales como el sulfuro de Cadmio como capa ventana o semiconductor tipo N, y usar materiales ternarios o cuaternarios como semiconductores tipo P con propiedades ópticas mejoradas para ser aplicadas en las celdas solares.

Normalmente la capa del material semiconductor tipo N tiene un menor espesor que el semiconductor tipo p, teniendo espesores de hasta 50 nm. Además de tener una mayor conductividad que permite que la zona de agotamiento sea más extensa en el lado del semiconductor tipo P, donde se genera la energía y se crean pares electrón – hueco.

2.7 TIPOS DE UNIÓN EN LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS

El silicio es el semiconductor más utilizado para aplicaciones electrónicas sin embargo se han realizado estudios para encontrar otro tipo de semiconductores que tengan mejores características para la aplicación en este caso de celdas solares.

Como se pudo ver anteriormente una celda fotovoltaica físicamente es la unión de dos semiconductores por lo cual se puede comparar con un diodo, es allí donde se puede ver que las principales uniones de una celda son la unión semiconductor – semiconductor y la unión semiconductor - metal; según el tipo de unión se clasifican los dispositivos electrónicos según las uniones de los materiales semiconductores, lo cual se puede ver en la Figura 9.

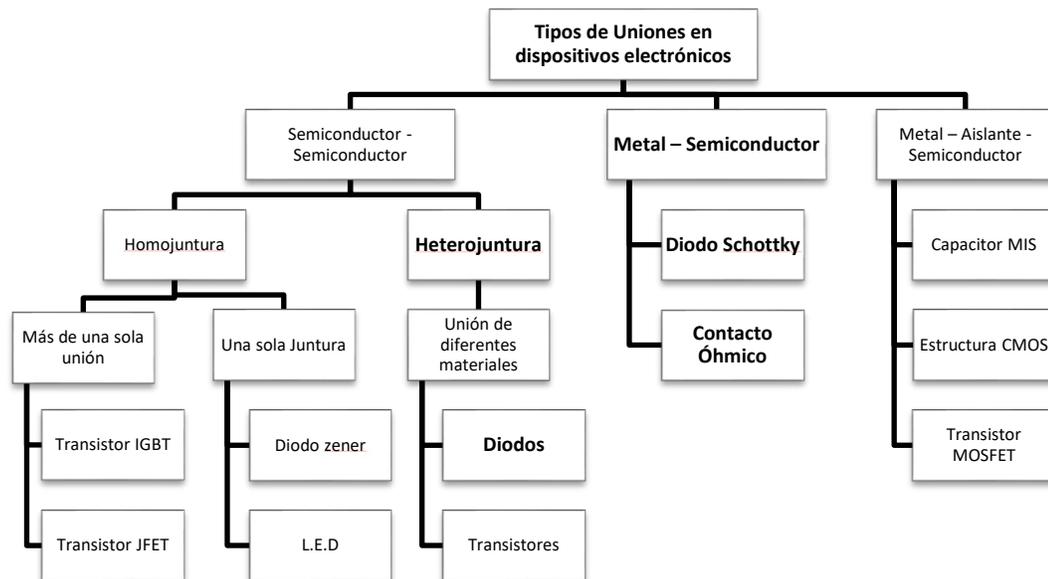


Figura 9. Tipos de uniones de materiales semiconductores.

2.7.1 Unión Semiconductor - Semiconductor

Este tipo de unión se puede ver en el conjunto de un semiconductor tipo N con un semiconductor tipo P que conforman la parte principal de la celda fotovoltaica.

- **Unión P-N**

Unión de un semiconductor tipo P con un semiconductor tipo N. Antes de realizar la unión de los dos semiconductores se puede ver en cada uno de ellos la concentración de portadores mayoritarios dependiendo del tipo de material extrínseco, sin embargo después de la unión, los portadores mayoritarios tienden a atravesar la barrera y llegan al otro semiconductor, por este fenómeno, en los límites cercanos a la unión dejan una zona de cargas positivas (Semiconductor tipo N) o negativas (Semiconductor tipo P), lo cual se conoce como dipolo eléctrico, que crea un campo eléctrico que se mueve desde el lado positivo al

lado negativo, es decir de la zona N a la zona P. El campo eléctrico que se forma en la zona de agotamiento impide que más portadores mayoritarios atraviesen los límites de la zona de unión. Se crean dos tipos de corriente: Corriente de difusión, la cual se debe a los portadores mayoritarios que cambian de tipo de semiconductor, la corriente de difusión disminuye al aumentar el potencial de la unión por lo antes mencionado, la otra corriente es la corriente de saturación inversa, la cual se debe a los portadores minoritarios de cada semiconductor que se crean por parte de la fuente de energía externa, estos portadores minoritarios de igual forma que los mayoritarios tienden a cruzar la zona de unión, los cuales son arrastrados hacia el otro semiconductor debido al efecto que tiene el campo eléctrico.

En la *Figura 10* al lado izquierdo se puede ver la presentación de los materiales semiconductores tipo P y tipo N separados, se puede ver que en el semiconductor N el nivel de Fermi tiene un mayor nivel de energía, esto debido a que se tienen mucho más electrones libres que podrían llegar a ocupar niveles de energía mucho más altos en comparación que el semiconductor tipo P. Al lado derecho de la imagen se puede ver la unión de los dos semiconductores, se puede ver el fenómeno del dipolo eléctrico que se describió anteriormente, además se puede ver que el nivel de Fermi de los dos semiconductores se igualan y se crea el voltaje de V_{bias} , el cual es el potencial necesario para que el diodo comience a conducir.

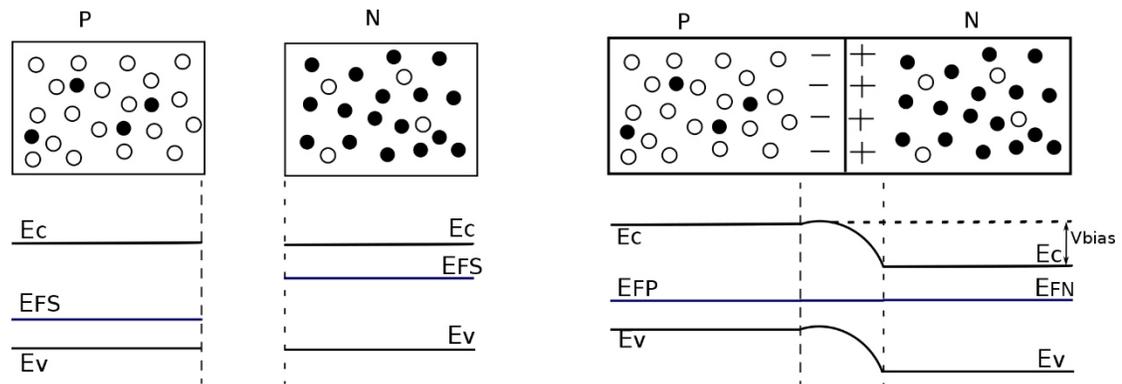


Figura 10. Unión de semiconductores tipo P y tipo N.

2.7.2 Unión semiconductor – metal

La presencia de ésta unión se puede ver en los electrodos de la celda, que permiten coleccionar los electrones y huecos generados, producidos por el efecto fotovoltaico que transforma la energía del sol en energía eléctrica. Esta unión es el principal objeto de estudio de éste proyecto por lo cual se verá un poco del efecto que produce dicha juntura en el proceso de recolección de energía. Para ver el efecto de los materiales que integran ésta parte de la celda se dará a conocer algunas definiciones:

- **Función de trabajo (ϕ):** Se define como la mínima cantidad de energía necesaria para que un electrón llegue a estar fuera del material, ubicando su posición inicial en el nivel de fermi del mismo, la función de trabajo es propiamente del material y existe un valor diferente para cada uno, se tiene función de trabajo para metales o para semiconductores.
- **nivel de vacío (E_0):** Como se vio anteriormente, el diagrama de bandas de un semiconductor es diferente al de un metal por lo cual para realizar la comparación entre los dos materiales se debe tener

un nivel de referencia, lo cual le da cabida al significado de nivel de vacío, que se define como el nivel de energía que ocupa un electrón en reposo fuera del material. Se puede hablar de un valor diferente para cada material, sea metal o un semiconductor y se tomara como una referencia de comparación para conocer valores como la función de trabajo o la afinidad electrónica de un semiconductor.

- **Afinidad electrónica del semiconductor ($q\chi$):** Es la energía necesaria para transferir un electrón desde el valor mínimo de la banda de conducción del semiconductor hasta el nivel de vacío, por lo tanto el valor de la afinidad electrónica se puede definir como la resta de la energía del nivel de vacío y la banda de conducción, como se describe en la ecuación (4).

$$q\chi = E_C - E_0 \quad (4)$$

$q\chi$: Afinidad electrónica.

E_C : Energía en la banda de conducción.

E_0 : Energía del nivel de vacío.

En la Figura 11 se puede ver la representación de cada una de las definiciones antes mencionadas.

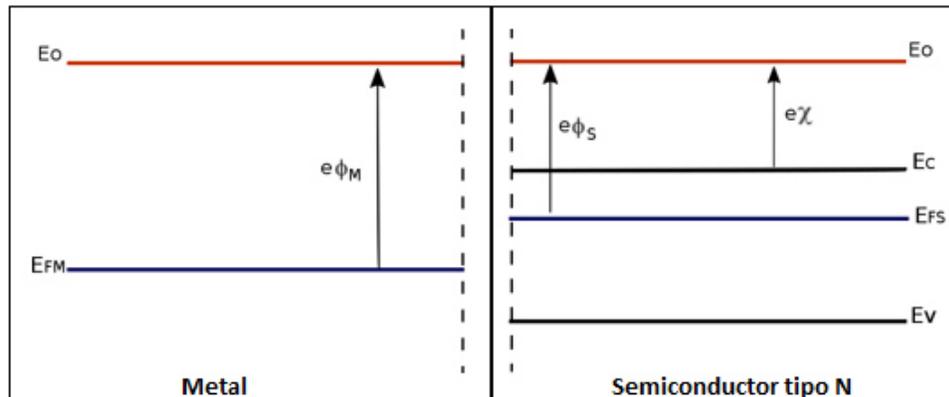


Figura 11. Representación de un diagrama de bandas para comparación de unión metal – semiconductor tipo N.

Al unir un semiconductor y un metal se tiene un comportamiento similar al de la unión de dos semiconductores, existe una mayor cantidad de electrones en el lado del semiconductor y de igual manera los electrones cruzan la barrera de unión hasta conseguir que los niveles de fermi de los materiales se igualen,

En general, al realizar la unión del metal y el semiconductor, los electrones comienzan a fluir desde el material con menor función de trabajo, por lo cual será el elemento electrones con mayor energía promedio. En este tipo de unión en la zona de juntura se crea de igual forma una carga positiva para el elemento que gana electrones, es decir con la mayor función de trabajo y una carga negativa para el material que cedió electrones. Debido a que el elemento que cede portadores mayoritarios fue el semiconductor, este será el único en el que sus bandas se moverán hasta que los niveles de fermi de los dos materiales se igualen.

Se debe de realizar una comparación de sus diagramas de bandas, dependiendo de la configuración que se tenga se pueden obtener dos tipos de unión metal – semiconductor, las cuales se definirán a continuación:

- Contacto tipo Schottky
- Contacto óhmico

2.7.3 Unión Tipo Schottky

Este tipo de unión se puede comparar con el comportamiento de un diodo shotcky, el cual se describe a continuación:

Diodo schottky: es un dispositivo electrónico que proporciona conmutaciones muy rápidas entre los estados de conducción inversa y directa, ya que cuenta con una alta velocidad de conmutación, este elemento puede rectificar señales de muy alta frecuencia y eliminar excesos de corriente en circuitos de alta densidad; el diodo schottky se compone de la Unión de un semiconductor y un metal por lo tanto si el semiconductor es de tipo N quiere decir que los portadores mayoritarios son electrones pero si al contrario el semiconductor es tipo P quiere decir que los huecos son los principales portadores. Tener sólo un semiconductor ya sea tipo p y tipo n permite que la recombinación sea más rápida a comparación de la recombinación entre un tipo N y un tipo P. En este tipo de unión se tiene que se permite el paso de los electrones solo en una dirección. Se presenta una conducción de electricidad en el momento en que se supera la corriente de saturación inversa, de la misma forma que ocurre en un diodo schottky, por lo cual no se aprovecha de la mejor manera la colección de electricidad. Los diodos schottky tienen una tensión umbral (tensión para que comience a conducir) entre 0.2 V y 0.4 V, lo cual depende del material semiconductor con el que se elabore, Silicio y Germanio respectivamente, los cuales son los más utilizados actualmente.

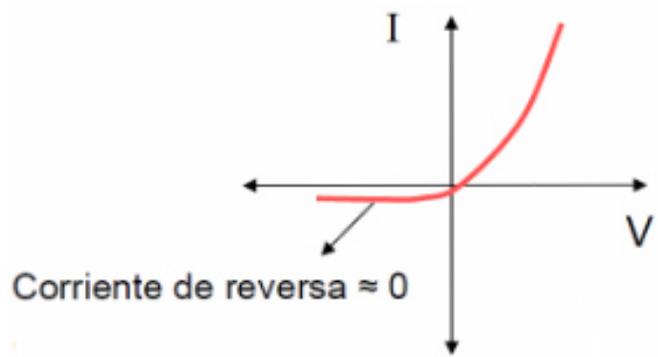


Figura 12. Representación de curva de corriente tensión eléctrica de un contacto tipo schottky.

Representación de Unión Semiconductor tipo N – Metal

- Unión tipo Schottky con Función de trabajo semiconductor menor que la del metal ($\phi_m > \phi_s$) como se puede ver en la Figura 13.

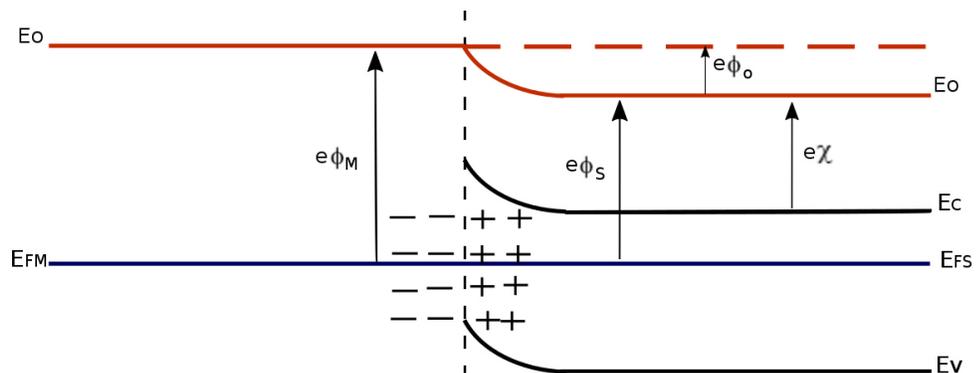


Figura 13. Diagrama de bandas Unión Schottky semiconductor tipo N – Metal

Representación de Unión Semiconductor tipo P – Metal

- Unión tipo Schottky con Función de trabajo semiconductor menor que la del metal ($\varphi_m > \varphi_s$) como se puede ver en la *Figura 14*.

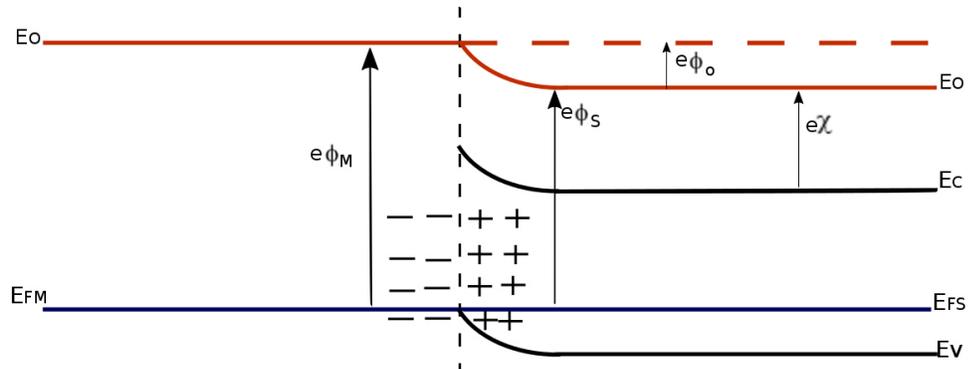


Figura 14. Diagrama de bandas Unión Schottky semiconductor tipo P – Metal

2.7.4 Unión Tipo Óhmica

En este tipo de unión se presenta un comportamiento que va de acuerdo a las leyes de kirchhoff. No se tiene una barrera de potencial que dificulte el paso de los electrones del metal al semiconductor o del semiconductor al metal, por lo cual se dice que el contacto tiene una resistividad despreciable. Este tipo de contacto es el que se espera tener en las celdas fotovoltaicas, debido a que se tiene una mejor colección de electricidad.

Para obtener una unión óhmica partiendo del tipo de semiconductor se tienen las ecuaciones (5) y (6):

Semiconductor tipo N – metal

$$\varphi_m \leq x_{se} \quad (5)$$

Semiconductor tipo P – metal

$$\varphi_m \geq x_{se} + E_g \quad (6)$$

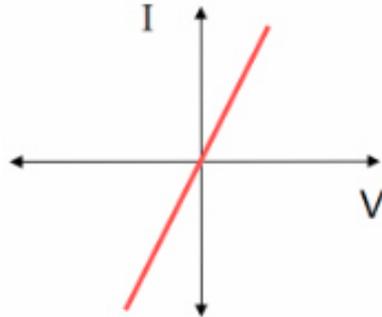


Figura 15. Representación de curva de corriente y tensión de un contacto óhmico.

Representación de Unión Semiconductor tipo N – Metal

- Unión tipo Óhmica con Función de trabajo del metal menor que la del semiconductor ($\varphi_m < \varphi_s$), como se puede ver en la Figura 16.

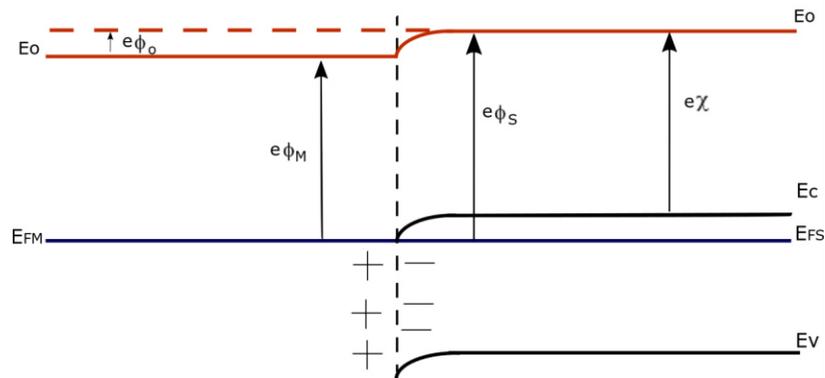


Figura 16. Diagrama de bandas Unión óhmica semiconductor tipo N – Metal

Representación de Unión Semiconductor tipo P – Metal

- Unión tipo Óhmica con Función de trabajo del metal menor que la del semiconductor ($\varphi_m < \varphi_s$) como se puede ver en la *Figura 17*.

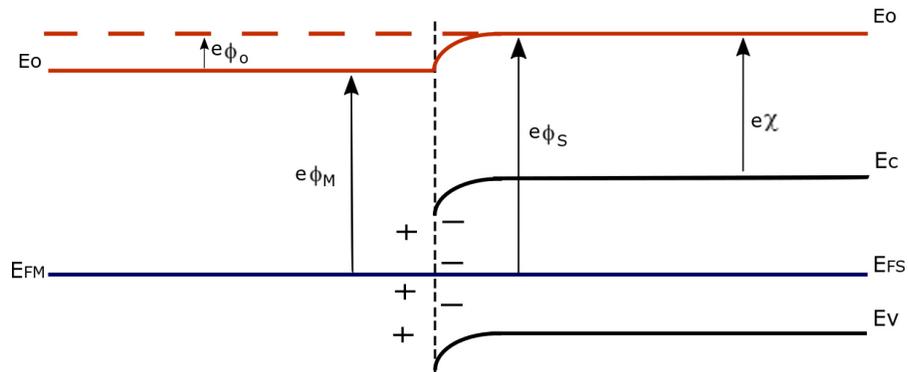


Figura 17. Diagrama de bandas Unión óhmica semiconductor tipo P – Metal

En la *Tabla 1* se pueden ver algunas funciones de trabajo de metales y afinidades electrónicas de semiconductores. Se debe de tener en cuenta que la este tipo de parámetros dependen de la naturaleza del material, por lo cual al realizar algún tipo de aleaciones entre metales o dopaje entre semiconductores se tendrán diferentes parámetros.

FUNCIONES DE TRABAJO DE ALGUNOS METALES	
Material	Función de trabajo φ_m (eV)
Plata (Ag)	4.26
Aluminio (Al)	4.28
Oro (Au)	5.1
Cromo (Cr)	4.5
Molibdeno (Mo)	4.6

Níquel (Ni)	5.15
Paladio (Pd)	5.12
Platino (Pt)	5.65
Titanio (Ti)	4.33
Tungsteno (W)	4.55
AFINIDAD ELECTRÓNICA DE ALGUNOS SEMICONDUCTORES	
Material	Afinidad electrónica χ (eV)
Germanio (Ge)	4.13
Silicio (Si)	4.01
Arseniuro de Galio (GaAs)	4.07
Arseniuro de Aluminio (AlAs)	3.5

Tabla 1. Funciones de trabajo y afinidad electrónica de algunos materiales

Haciendo uso de los parámetros de la *Tabla 1* se presenta el siguiente ejemplo:

- Se desea saber qué metal se debería utilizar para tener como resultado una unión óhmica si se tiene un semiconductor tipo P que tiene como $E_g = 1.4eV$ y $x_{se} = 4.2eV$

R// Aplicando la definición de unión óhmica se tiene que

$$x_{se} + E_g = 5.6eV$$

Por lo que el metal más apropiado para este caso sería el platino, ya que tiene una función de trabajo de 5.65 eV.

Debido a la necesidad de obtener contactos óhmicos entre semiconductor y metales se han creado aleaciones entre algunos materiales para agrandar un poco más la brecha de la función de trabajo de los materiales a utilizar.

2.8 Parámetros principales de una celda solar:

Los siguientes son los principales parámetros que se deben conocer para la caracterización de una celda solar. Todos ellos se obtienen a partir de una caracterización de la curva corriente-tensión (I-V) en una celda solar, y se definirán a continuación:

Corriente de corto circuito (I_{sc}): Es el valor de la corriente cuando el voltaje es igual a cero. Si se conectara una carga a la celda fotovoltaica sería el valor de corriente para la resistencia con un valor igual a 0Ω

Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): Es el voltaje entre las terminales de la celda para una resistencia con valor infinito.

Factor de llenado o Factor de forma (FF): Es la comparación que existe entre la curva de corriente de una celda fotovoltaica ideal y una celda fotovoltaica real. Se define como la relación entre la potencia máxima de la celda con el voltaje de circuito abierto y corriente de corto circuito, como se presenta en la ecuación (7).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (7)$$

Potencia máxima: Es la mayor capacidad de generación de la celda fotovoltaica. El punto de potencia máxima no será el punto donde corriente o el voltaje tengan su mayor valor, lo mejor sería definir el valor donde la curva de potencia tome su punto máximo.

$$P_{max} = V * I \quad (8)$$

La generación de electricidad de una celda fotovoltaica depende del área que se encuentre iluminada, a mayor área iluminada mayor corriente generada, por lo cual se debe tener en cuenta dicho aspecto en el momento de realizar las gráficas de corriente y tensión.

Densidad de corriente (J): Se define como el valor de corriente por unidad de área, como se puede ver en la ecuación (17).

$$J = \frac{I [mA]}{A [cm^2]} \quad (9)$$

En la *Figura 18*, se puede ver la representación de la curva de corriente y tensión para una celda iluminada, con cada uno de los parámetros antes mencionados.

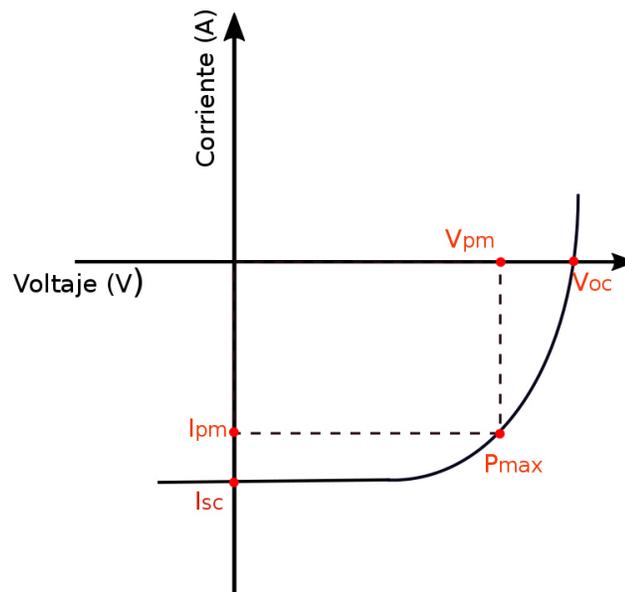


Figura 18. Representación de la curva de corriente y tensión de una celda fotovoltaica.

La eficiencia de las celdas solares se mide según el Standard Test Conditions (STC) bajo las siguientes condiciones físicas:

- Temperatura: 25°C
- Irradiancia: 1000 W/m²
- Espectro de masa de aire: AM 1.5

La medición de la eficiencia de una celda solar es la relación entre la potencia de entrada de la celda y la potencia máxima generada por la celda, como se puede ver en las ecuaciones (10) y (11)

$$n = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \quad (10)$$

Donde:

P_{sal} : Potencia generada por la celda (potencia máxima)[W]

P_{ent} : Potencia de salida de la celda ($Area_{efectiva}[m^2] * Rad[W/m^2]$)

$$n = \frac{P_{max}}{A_{efectiva} * Rad} \quad (11)$$

- **Para una celda solar con una configuración dada el tipo de contacto utilizado para recolectar la energía eléctrica generada por el efecto fotovoltaico puede cambiar su eficiencia.**

La metodología de experimentación realizada en el proceso de investigación permitirá estudiar algunas variables que intervienen en la eficiencia eléctrica de la celda fotovoltaica partiendo de la premisa original de que el rendimiento de la celda se ve directamente afectado por el tipo de contacto utilizado para recolectar la energía eléctrica generada por la celda.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS FOTOVOLTAICOS DE LAS CELDAS SOLARES DE ESTRUCTURA $CdS/AgSb(S,Se)_2$

3.1 FABRICACIÓN DE MUESTRAS

La elaboración de celdas de películas delgada depende del conjunto de diferentes capas de materiales que permiten la creación de elementos semiconductores, se utilizan diferentes métodos de depósito el tipo de material, geometría del sustrato, espesor de la capa, temperatura y tiempo de deposición, se presentan a continuación algunos de los procesos actualmente utilizados.

Las muestras utilizadas en este proyecto son de estructura $N - CdS/P - AgSb(S,Se)_2$, de películas delgada, las cuales se obtienen por diferentes técnicas de depósito como baño químico y evaporación térmica, en conjunto con tratamiento térmico.

En la elaboración de éste tipo de celdas se utiliza el método de depósito de por Baño químico, la cual es conocida por ser una de las más simples y utilizadas en la elaboración de celdas fotovoltaicas. A nivel de laboratorio resulta ser de gran utilidad debido a que las muestras utilizadas son lo suficientemente pequeñas como para usar en el proceso un vaso de precipitados, sin embargo a medida en la elaboración de celdas de mayor de tamaño se requieren otros tipos de técnicas.

Ésta técnica parte del uso de una solución con los elementos que se deseen depositar, deben de ser químicamente estables y deben presentar una precipitación simple, la solución se vierte en una vaso de precipitados donde se

sumerge el sustrato y se deja por determinado tiempo a temperatura constante. El espesor de la película depositada dependerá entonces del tipo de material a depositar, el tiempo de exposición y la temperatura utilizada, ya existen diferentes tablas para conocer el tiempo y la temperatura necesaria según el tipo de sustancia y espesor requerido.

Se utiliza un sustrato de vidrio conductor el cual posee una capa de óxido conductor transparente (TCO). Para la fabricación de las celdas inicialmente se limpia el sustrato por medio de vibración ultrasónica utilizando acetona como liquido limpiador durante 10 minutos, paso seguido se lava con detergente líquido neutro disuelto en agua donde se frotran suavemente y se elimina el exceso de jabón con agua destilada para finalmente ser secados por medio de una corriente de aire.

Sobre el sustrato limpio se realiza el depósito de películas delgadas de CdS y AgSb(S,Se)_2 lo cual se presenta a continuación.

Películas delgadas de CdS: Sobre el vidrio conductor se realiza el depósito de CdS por el método de depósito de baño químico (CBD), se realiza un baño que contiene 25 ml de 0.1 Molar de cloruro de cadmio (CdCl_2), 5 ml de tiourea y 53 ml de agua destilada. Los sustratos se sumergen en la mezcla de manera vertical y se albergan en una cámara de temperatura controlada a 70°C durante 20 minutos.

Películas delgadas de AgSb(S,Se)_2 La capa del material semiconductor absorbedor tipo p se sintetiza a través de calentamiento de multicapas de Sb_2S_3 *Ag* y *Se* de la siguiente manera:

Sb_2S_3 (sulfuro de antimonio) se deposita por medio de baño químico y las capas de plata se depositan por medio de evaporación térmica.

Depósito de sulfuro de antimonio: Se realiza por medio del baño químico de una solución compuesta por 2.5 ml agua destilada, 0.65 mg de trisulfuro de antimonio 25 ml de Tiosulfato, el proceso se realiza a temperatura ambiente y las muestras con el depósito de *CdS/TCO/vidrio* se sumergen en la mezcla de forma horizontal. En la *Figura 19* se puede ver la forma en que se depositan en las celdas las capas delgadas de antimonio.



Figura 19. Depósito de películas delgadas de sulfuro de antimonio.

Depósito de plata: El depósito de la capa de plata se realiza por medio de evaporación térmica sobre las muestras con: *Sb₂S₃/CdS/TCO/vidrio*, la cual se realiza empleando una de las 2 evaporadoras disponibles en el laboratorio: 1. sistema de evaporación térmica modelo TE12P, Intercovamex; 2. Evaporadora modelo THE2-2.5 KW-TP, marca TORR International. Ambos equipos consisten en un sistema de vacío en la que se ubican las celdas dejando al descubierto las zonas en las que se quiere realizar el depósito, se utiliza plata de pureza 99.999% el cual se ubica sobre un pequeño soporte de tungsteno, durante el proceso se monitorea el espesor por medio de un sensor con el que cuenta el equipo.

Depósito de Selenio: El proceso se realiza a temperatura ambiente y mediante baño químico, por diferentes tiempos de depósito.

Tratamiento térmico: El paso final consiste en una etapa de calentamiento en un Horno de vacío, donde en primera instancia se obtiene una capa de Ag_2Se a $80\text{ }^{\circ}C$ la cual reacciona con Sb_2S_3 a $350\text{ }^{\circ}C$ para formar el material ternario de interés [2], [3].

Depósito de electrodos: Para la etapa de los electrodos, primero se pinta un electrodo directamente sobre la superficie de la película, empleando pintura de carbón; en seguida se realiza el depósito de Aluminio y plata con una pureza de 99.999% los cuales se depositan por medio de evaporación térmica para diferentes espesores deseados. También se “pintan” electrodos de pintura de plata, directamente sobre los electrodos de carbón previamente colocados. En la *Figura 20* se puede ver una representación simple de las capas que hacen parte de la celda fotovoltaica evaluada.

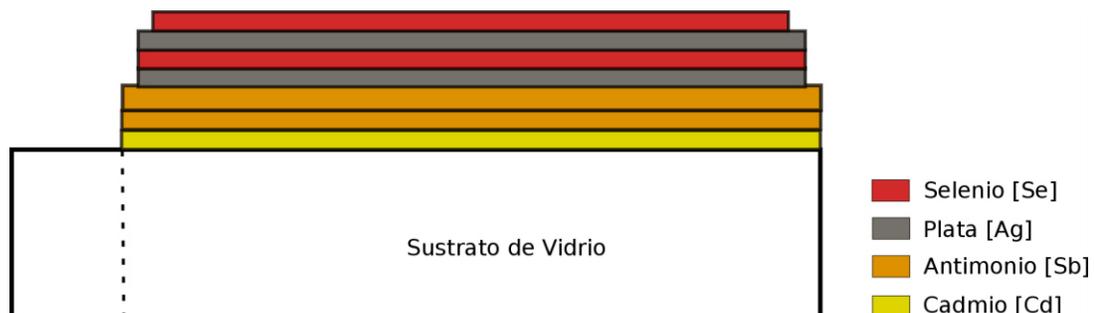


Figura 20. Representación de capas de una celda de estructura $CdS/Ag(Se,Sb)_2$

Mientras que en la *Figura 21*, se puede ver la preparación de las celdas para el depósito de plata y aluminio y el resultado final del proceso.

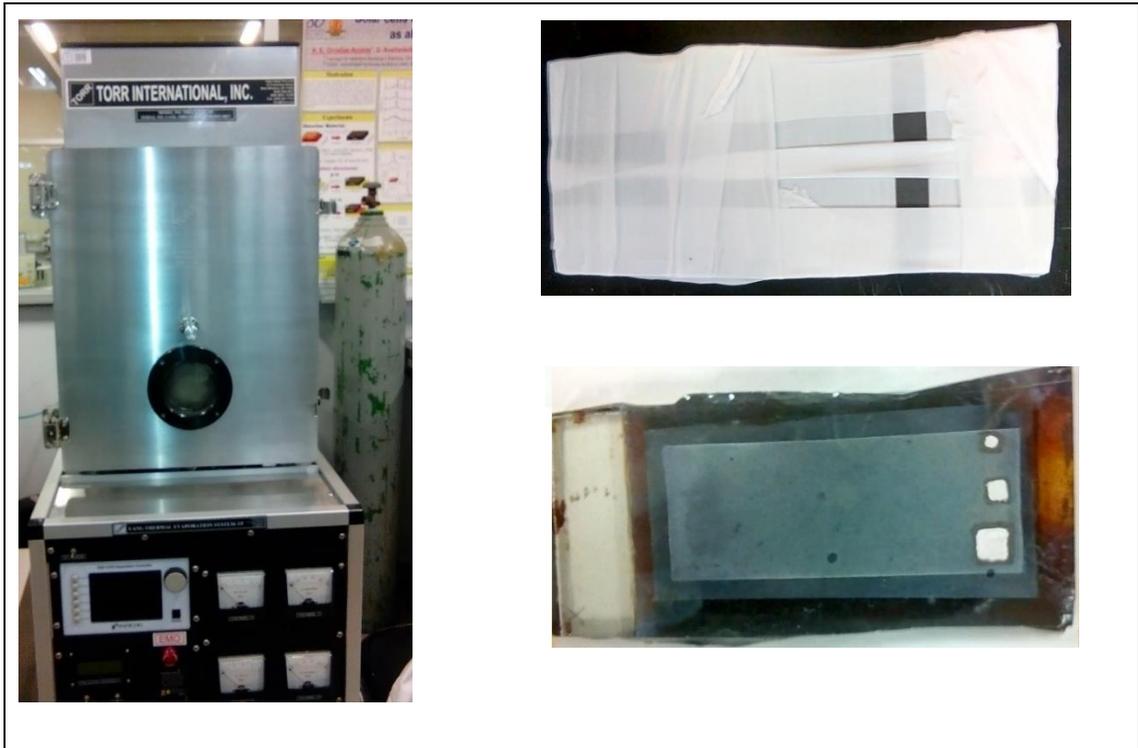


Figura 21. Máquina de evaporación térmica y electrodos de plata y aluminio depositados en celdas fotovoltaicas

En la *Figura 22* Se puede ver una muestra elaborada en el laboratorio, la cual tiene un tamaño aproximado de 7 cm de largo y 2.5 cm de ancho.

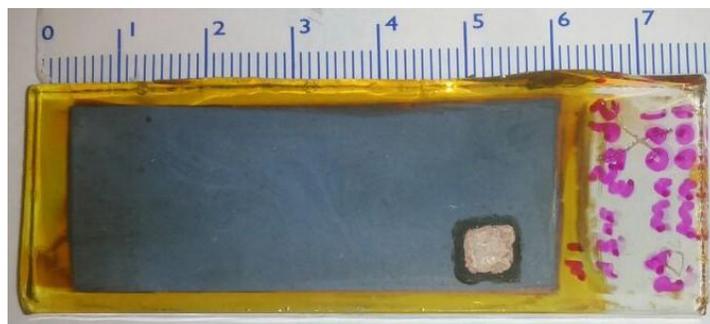


Figura 22. Muestras elaboradas en el laboratorio

En la *Figura 23* se puede ver la representación esquemática de las capas semiconductoras de la celda solar y el electrodo después de su fabricación en el laboratorio.



Figura 23. Grafico esquemático de celda solar.

3.2 IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL DE ELECTRODOS SEGÚN LA TEORÍA DE UNIÓN OHMICA

Se tomará como referencia el valor de afinidad electrónica del material semiconductor $Cu(In, Ga)Se_2$ (Seleniuro de cobre galio indio. CIGS), el cual es un semiconductor tipo P cuaternario, que ha presentado un buen rendimiento, a continuación se presentan los parámetros de afinidad electrónica del material y brecha de energía [17].

Afinidad electrónica	Brecha de Energía
$x = 4.6eV$	$E_g = 0.9eV$

Aplicando la ecuación (6) y Utilizando la afinidad electrónica del material CIGS y la brecha de energía de nuestro material absorbedor a evaluar: $E_g = 1.1 eV$ se tiene que $x + E_g = 4.6eV + 1.1eV = 5.7 eV$

Comparando el resultado obtenido con la *Tabla 1* el material que se debe utilizar es el platino, que tiene una función de trabajo de $5.65eV$, sin embargo

debido a que se quiere usar materiales de bajo costo de fácil acceso en el territorio nacional se usaran Plata y Aluminio, algunas de sus propiedades se pueden ver en la *Tabla 2*.

Material	Función de trabajo ϕ_m [eV]	Densidad [g/cm^3]	Punto de Fusión [°C]
Plata	4.26	10.5	962
Aluminio	4.28	2.70	660

Tabla 2. Propiedades de materiales elegidos para el depósito de electrodos.

CONDICIONES DE EVALUACIÓN

Se realizó un diseño de experimentos detallado en la *Tabla 3* que permitirá conocer más a fondo la influencia de los contactos en la colección de carga de la celda fotovoltaica, se debe de tener en cuenta que se utilizaran diferentes celdas fotovoltaicas con la misma estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$, sin embargo se tienen diferentes especificaciones en la elaboración de cada una de ellas, por lo tanto en lo que resta de éste capítulo se presentaran diferentes grupos de celdas con las que se realizaron diferentes experimentos para la evaluación del desempeño según el contacto utilizado.

Las variables principales a evaluar son las características eléctricas de la celda fotovoltaica, las cuales se determinan en la *Tabla 4*, sin embargo el análisis de estas propiedades serán solo el inicio, ya que el análisis final consiste en la solución de la ecuación de la celda fotovoltaica para el modelo del circuito modelado mediante un diodo, una resistencia serie y una paralelo, además de la caracterización del tipo de material del contacto y la celda fotovoltaica.

Variables de experimento				
Tipo de Metal	Plata (Ag)	Aluminio (Al)		
Espesor de contacto	60nm	120nm	200nm	300nm
Tamaño de contacto	25mm ²	36mm ²	100mm ²	
Distancia entre contactos	3mm	5mm	10mm	
Tratamiento térmico	50°C 1 hora	50°C 14 horas	100°C 1 hora	100°C 14 horas

Tabla 3. Diseño de experimentos

Variables de evaluación						
Voltaje circuito Abierto (Voc)	Corriente de Corto Circuito (Isc)	Potencia Máxima (Pm)	Factor de Forma (FF)	Eficiencia (n)	Resistencia Serie (Rs)	Resistencia Paralelo (Rp)

Tabla 4. Variables de evaluación para caracterización eléctrica de la celda fotovoltaica.

Para la elaboración de cada celda se presentaron las siguientes especificaciones, se presentará para cada grupo una tabla en donde se mostrará cada uno de los pasos de elaboración, sin embargo se debe de tener en cuenta la información que a continuación se enuncia:

Especificaciones:

- Baño de Sulfuro de Cadmio (CdS): 20 minutos, 70 °C.
- Mufla: 30 minutos, 400 °C.
- Baño de sulfuro de Antimonio (Sb₂S₃): 2 horas, 25 °C.

- Evaporación de plata (Ag): depende de las especificaciones de cada celda
- Baño de Selenio (Se): 1 hora, Temperatura ambiente.
- Horno de vacío (H.V): 30 minutos, 350 °C.

A continuación se presentarán algunos de los resultados relevantes que se obtuvieron con la metodología de evaluación presentada anteriormente, se hace la aclaración de que el nombre que se le da a cada celda depende de su característica más notable en el momento de la elaboración de la misma, sin embargo para fines prácticos cada una se presentará con un número en cada una de las etapas.

3.3 MEDICIÓN DE DENSIDAD DE CORRIENTE Y VOLTAJE

Los parámetros de las celdas solares son voltaje de circuito abierto, densidad de corriente, factor de llenado y eficiencia (V_{OC}, J_{SC}, FF, η) y se pueden identificar en la curva de densidad de corriente y tensión.

La curva de corriente y tensión se genera por medio de una prueba realizada con un simulador solar de 150 W marca Oriel, el cual se encuentra en condiciones estándar para medir la eficiencia de la celda solar; en la *Figura 24* se puede ver el simulador solar utilizado para la prueba de eficiencia.

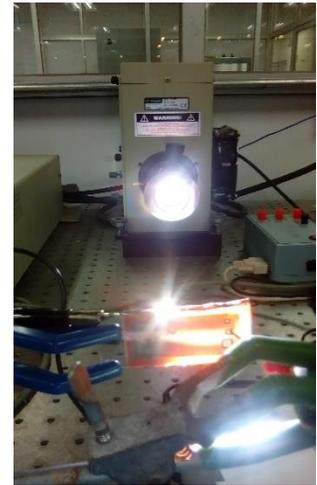
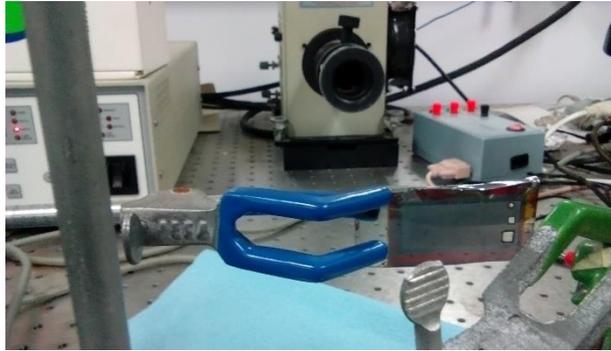


Figura 24. Prueba de eficiencia de la celda en el simulador solar.

Los contactos positivo y negativo de la celda fotovoltaica se conectan en paralelo con una fuente de tensión, la cual entrega una serie de valores a medida de que se toman los valores de corriente generados por la celda fotovoltaica.

Primero la medición se realiza en condiciones de oscuridad en donde se obtendrá la curva de corriente y tensión propia del diodo compuesto por la unión de los semiconductores P – N, el siguiente escenario de evaluación se realiza en condiciones de iluminación en donde se usa el simulador solar con filtro AM1.5 y una intensidad de 1000 W/m^2 . La iluminación se realiza a través de la capa ventana CdS.

3.4 RESULTADOS

3.4.1 (Grupo de Celdas 1) Influencia del Tratamiento Térmico RTP en Celdas y Contactos de Pintura de Plata

Con los experimentos realizados en éste grupo se pretendió conocer:

- La influencia del sulfuro de Plomo (PbS) como base para los contactos elaborados.
- Influencia del tratamiento térmico rápido (RTP) aplicado a los contactos de carbono antes de utilizar la pintura de plata.

Se presenta a continuación la celda con las siguientes especificaciones de elaboración mostradas en la Tabla 5.

(CdS)	Mufla	(Sb ₂ S ₃)		H.V	(Sb ₂ S ₃)	(Sb ₂ S ₃)	(Ag)	(Se)	(Ag)	(Se)	H.V
		Tiempo	Temp				Espesor		Espesor		
Si	Si	15 min	15°C	Si	Si	X	50nm	Si	50nm	Si	Si

Tabla 5. Especificaciones de elaboración de celdas grupo 1

Éste grupo de muestras consta de 2 celdas con las mismas especificaciones de elaboración pero para cada una de ellas se evaluaron diferentes parámetros en los electrodos, en la *Figura 25* se podrá conocer un poco más sobre el orden de los electrodos para estas celdas fotovoltaicas.

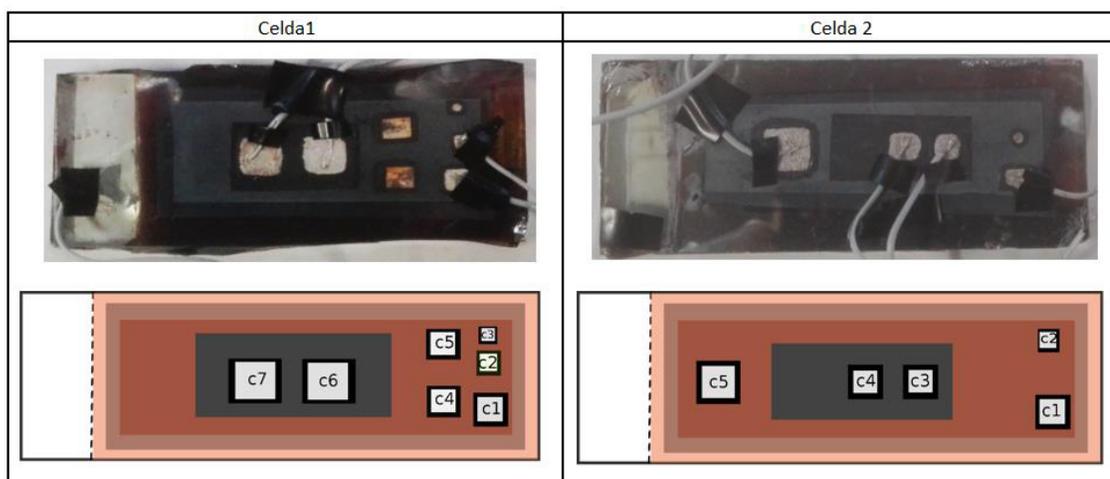


Figura 25. Orden de electrodos para el grupo de celdas 1

Se realizó una serie de experimentos para la celda 2 como se muestra en la *Tabla 6*

- Tratamiento RTP (Rapid Thermal Processing) el cual consistió en aumento rápido de temperatura en vacío durante 5 minutos a 150 °C el cual se realiza después de pintar la base de carbón para el electrodo y antes de la pintura de plata.
- Depósito de Sulfuro de Plomo (PbS) antes de la pintura de carbón.

	Sulfuro de Plomo (PbS)	R.T.P	Área[mm ²]
Contacto 1	no	no	25
Contacto 2	si	no	25
Contacto 3	si	no	9
Contacto 4	si	si	25
Contacto 5	no	no	100

Tabla 6. Especificaciones de experimentos electrodos celda 2

Se realizó la caracterización de las celdas para cada contacto, a continuación se presentaran los resultados obtenidos:

Comparando los contactos 1, 3, 4 se tienen los resultados mostrados en la *Tabla 7* y en la *Figura 26*.

Contacto	SbS	R.T.P	Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[mA]	FF	Area [mm ²]	eficiencia %
1			0.513	-0.6154	0.344	0.39122	0.4256	25	0.5383
3	X		0.407	-0.66638	0.24	0.39971	0.35	25	0.3837
4	X	X	0.45	-0.74635	0.3	0.40036	0.3575	25	0.4804

Tabla 7. Resultados celda 2

Según los resultados obtenidos para éste grupo de celdas el depósito de sulfuro de plomo antes del contacto aumenta la corriente de la celda tal como se esperaba, sin embargo el voltaje disminuye afectando la eficiencia de la celda y la forma de la curva de corriente y tensión.

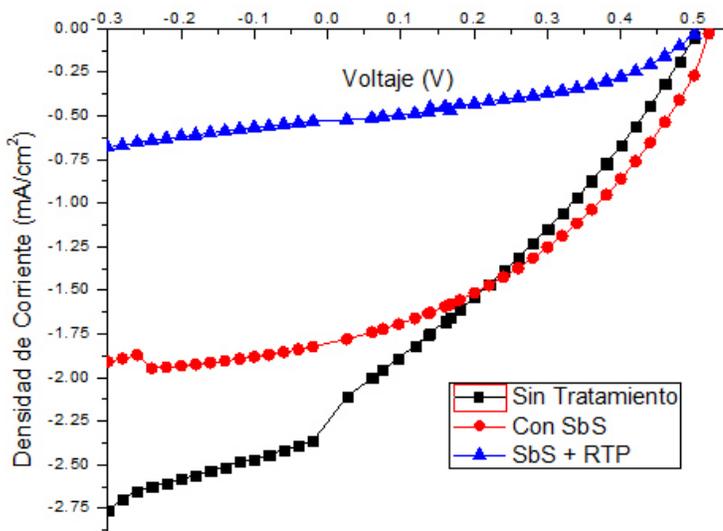


Figura 26. Gráfica de corriente y tensión: comparación de tratamientos del grupo 1.

El tratamiento de RTP no mejoró de manera considerable las propiedades eléctricas de la celda, sin embargo más adelante se presentaran algunos resultados con éste tratamiento por lo cual no se descarta el uso de RTP para aumentar la eficiencia de la celda fotovoltaica.

3.4.2 (Grupo de Celdas 2) Influencia de Tratamientos Térmicos en Aire sobre Contactos de Pintura de Plata y Aluminio evaporado.

Para este grupo de muestras se realizaron experimentos con los que se pudo observar:

- La influencia de tratamientos térmicos en aire (mufla) en los contactos ya elaborados.
- La influencia del material de contacto utilizado.

Las especificaciones de elaboración de las celdas se presentan en la *Tabla 8*.

(CdS)	Mufla	(Sb2S3)		H.V	(Sb2S3)	(Sb2S3)	(Ag)	(Se)	(Ag)	(Se)	H.V
		Tiempo	Temperatura				Espesor		Espesor		
SI	SI	15 min	15°C	SI	SI	X	50nm	SI	50nm	SI	SI
SI	SI	15 min	15°C	SI	SI	X	50nm	SI	50nm	SI	SI

Tabla 8. Especificaciones de elaboración de celdas grupo 2

El grupo en cuestión consta de dos celdas con la misma estructura, sin embargo la celda 1 no tiene ningún tipo de tratamiento, mientras que la celda 2 en el momento de realizar el paso final del tratamiento térmico en Horno de vacío se puso en contacto con un sustrato que tenía una capa de Óxido de Zinc (ZnO). En la *Figura 27* se podrá ver el orden de los electrodos para cada una de las celdas fotovoltaicas.

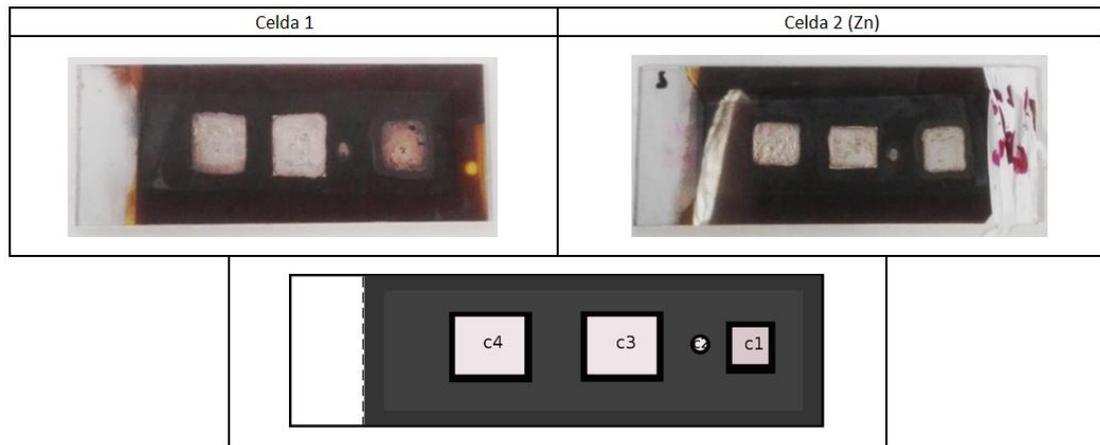


Figura 27. Orden de electrodos para el grupo de celdas 2

En la *Tabla 9* se puede ver las especificaciones de los contactos elaborados. Se debe de tener en cuenta que la base para cada uno de los contactos es pintura de carbón.

	Material	Área [mm^2]
Contacto 1	Pintura de Plata	36
Contacto 2	Pintura de Plata	0.78
Contacto 3	Aluminio 58 nm + Pintura de Plata	100
Contacto 4	Pintura de Plata	100

Tabla 9. Especificaciones de electrodos de grupo de celdas 2.

Para garantizar una comparación adecuada del tipo de material utilizado se realizaron dos contactos con la misma área de carbón y plata, en la *Figura 28* se puede ver algunos de los resultados obtenidos según el tipo de material usado para la elaboración de los contactos:

En las imágenes y la

Caracterización grupo de celdas 2										
	Contacto	Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[A]	FF	Área [mm ²]	eficiencia %	RS [Ω]	RP [Ω]
Celda 1	Cto 3	0.5059	-3.2	0.3061	-2.0	0.3894	100	0.6245	56.3698	201.9
	Cto4	0.5259	-3.6	0.3465	-2.4	0.4392	100	0.8316	43.9488	111.7222
Celda 2	Cto 3	0.3063	-2.3	0.147	-1.3	0.2575	56	0.3281	106.2619	118.3529
	Cto4	0.4464	-3.4	0.2468	-2.1	0.3439	56	0.9212	49.5332	183.5455

Tabla 10 se encuentra la comparación de las curvas de corriente y tensión del contacto 3 (Aluminio 58 nm + Pintura de plata) y el contacto 4 (Pintura de plata), se puede ver que en las dos celdas el contacto 4 presento un mejor desempeño, con un factor de forma bueno pero con una eficiencia muy baja para cada una de las celdas.

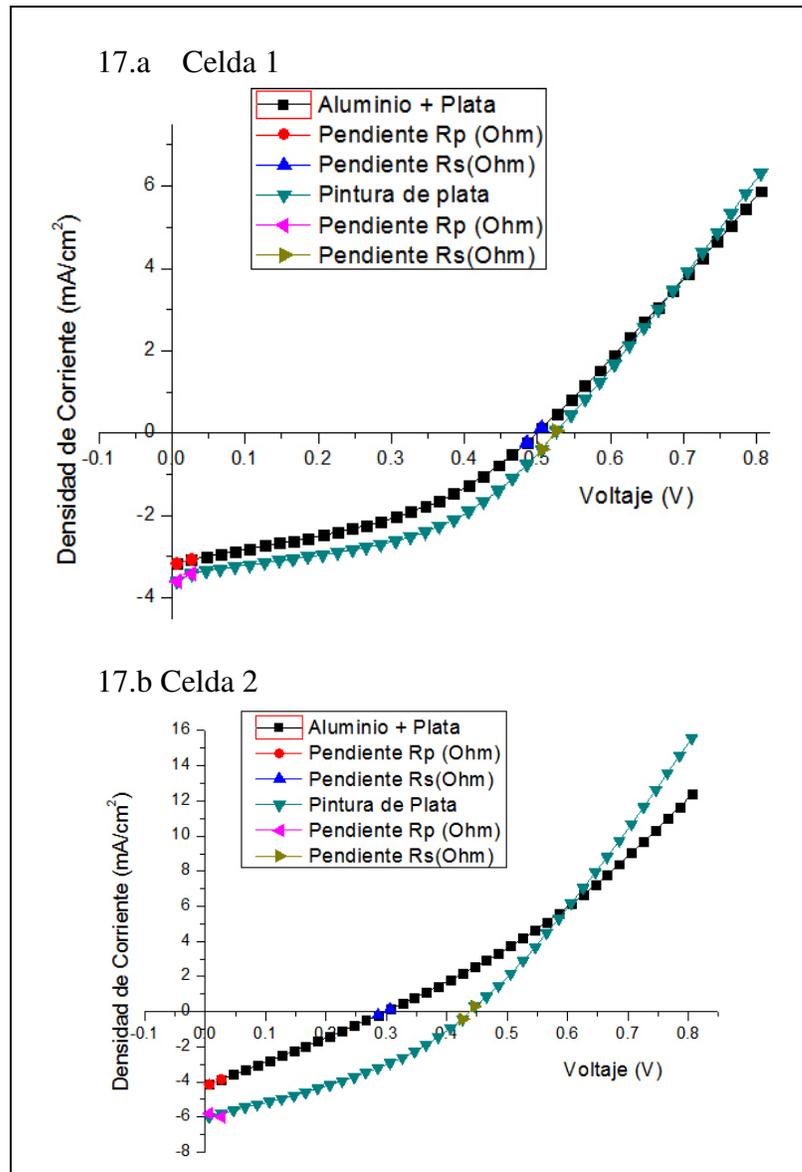


Figura 28. Comparación de contactos aluminio y plata.

Caracterización grupo de celdas 2									
Contacto	Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[A]	FF	Área [mm ²]	eficiencia %	RS [Ω]	RP [Ω]

Celda 1	Cto 3	0.5059	-3.2	0.3061	-2.0	0.3894	100	0.6245	56.3698	201.9
	Cto4	0.5259	-3.6	0.3465	-2.4	0.4392	100	0.8316	43.9488	111.7222
Celda 2	Cto 3	0.3063	-2.3	0.147	-1.3	0.2575	56	0.3281	106.2619	118.3529
	Cto4	0.4464	-3.4	0.2468	-2.1	0.3439	56	0.9212	49.5332	183.5455

Tabla 10. Caracterización eléctrica del grupo de celdas 2

3.4.3 (Grupo de celdas 3) Influencia del Material de Contacto en la Eficiencia de la Celda Fotovoltaica

Éste grupo de celdas consta de 2 muestras con las que se realizaron experimentos que permiten conocer:

- Influencia del tipo de material de contacto en la eficiencia eléctrica de la celda fotovoltaica.
- Influencia del tratamiento térmico en aire (mufla) aplicado a los contactos de carbón después del depósito de plata y aluminio.

En la *Tabla 11* se muestran las especificaciones de elaboración de las celdas fotovoltaicas utilizadas.

Celda	(CdS)	Mufla	(Sb2S3)		H.V	(Sb2S3)	(Sb2S3)	(Ag)	(Se)	(Ag)	(Se)	H.V
			Tiempo	Temperatura				Espesor		Espesor		
1	SI	SI	2 horas	25°C	SI	SI	SI	150nm	SI	X	SI	SI
2	SI	SI	2 horas	25°C	X	SI	SI	150nm	SI	X	SI	SI

Tabla 11. Especificaciones de elaboración celdas grupo 3.

En la *Tabla 12* y la *Figura 29* se puede ver a detalle el orden de los electrodos en cada una de las celdas.

	Material	Área [mm ²]
Contacto 1	Aluminio evaporado 150 nm + Pintura de plata	36 celda 1 42 celda 2
Contacto 2	Pintura de Plata	36 celda 1 42 celda 2

Tabla 12. Características de electrodos grupo 3

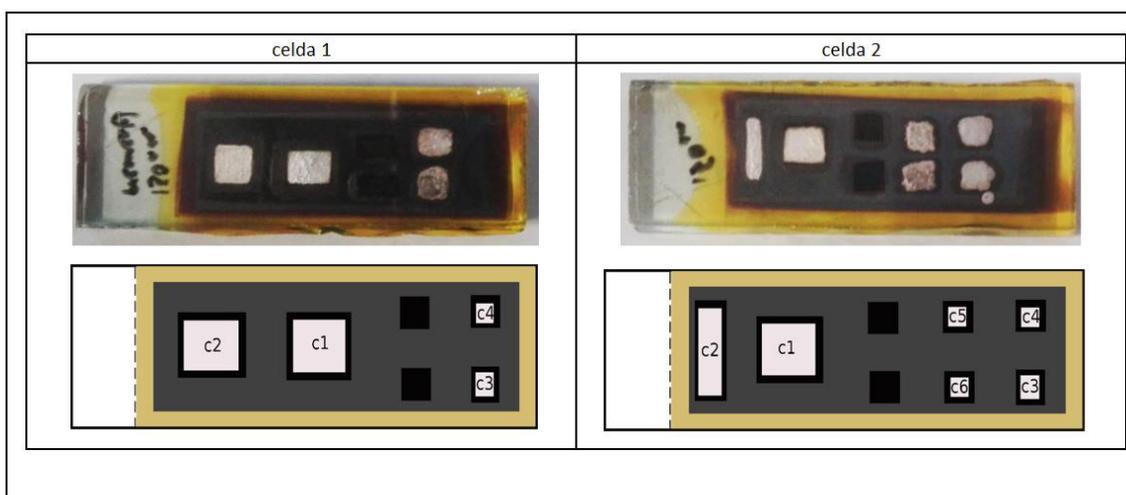


Figura 29. Configuración de electrodos grupo de celdas 3.

El objetivo del análisis de éste grupo de celdas era conocer la influencia en la eficiencia de las celdas fotovoltaicas según el tratamiento térmico que se le diera al contacto después de hacer el depósito. Se llevó a cabo la siguiente serie de pasos:

- Pintura de carbón.
- Pintura de Plata o evaporación de aluminio.
- Medición de parámetros eléctricos.
- Tratamiento térmico: 50°C 14 horas – medición de parámetros.
- Tratamiento térmico: 100°C 1 hora – medición de parámetros.

En la *Tabla 13* se pueden ver los resultados obtenidos para los contactos 1 y 2 de la celda 1, se puede ver que el tratamiento térmico no ayudo a mejorar el desempeño de los contactos, ya que a medida de que aumenta la temperatura, disminuye la eficiencia y los demás parámetros como la corriente de corto circuito y el voltaje de circuito abierto, además se puede ver que de igual forma como se observó en el grupo de celdas anterior se tiene un mejor desempeño en el contacto de pintura de plata, sin embargo con el contacto de aluminio evaporado no se tiene una diferencia considerable, posiblemente debido al aumento del espesor del mismo.

En la *Tabla 14* se pueden ver resultados similares a los de la celda 1 con respecto al comportamiento en presencia de tratamiento térmico, sin embargo las resistencias serie y paralelo crecieron a medida de que aumentó la temperatura de tratamiento. Se evidencio un mejor desempeño en el contacto de aluminio evaporado.

		Caracterización celda 1								
Temperatura		Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[A]	FF	Área [mm ²]	eficiencia %	RS [Ω]	RP [Ω]
Cto 1	Inicial	0.5064	- 2.40	0.2473	- 1.400	0.2756	36	0.941	172.28	685.86
	50°C 14 horas	0.4853	- 2.70	0.2655	- 1.400	0.2788	36	0.997	140.96	388.91
	100°C 1 hora	0.5053	- 2.20	0.2653	- 1.100	0.274	36	0.834	178.90	548.81
Cto 2	Inicial	0.4865	- 2.70	0.2475	- 1.400	0.2757	36	0.989	157.74	624.17
	50°C 14 horas	0.4853	- 2.50	0.2466	- 1.400	0.2724	36	0.926	163.26	619.87
	100°C 1 hora	0.4646	1.800	0.2461	- 0.930	0.2677	36	0.635	224.31	356.65

Tabla 13. Caracterización celda 1. Grupo 3

		Caracterización celda 2								
Temperatura		Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[mA]	FF	Area [mm ²]	eficiencia %	RS [Ω]	RP [Ω]
Cto 1	Inicial	0.5069	- 2.50	0.2666	- 1.500	0.3223	42	0.958	160.03	353.86
	50°C 14 horas	0.4852	- 2.30	0.2653	- 1.300	0.3258	42	0.849	78.06	548.60
	100°C 1 hora	0.4853	- 1.90	0.2654	- 1.100	0.3237	42	0.705	139.31	1,646.20
Cto 2	Inicial	0.3659	- 1.60	0.1867	- 0.909	0.286	42	0.404	169.88	280.09
	50°C 14 horas	0.3459	- 1.30	0.1656	- 0.761	0.2748	42	0.300	194.81	34.00
	100°C 1 hora	0.2258	- 0.703	0.1060	- 0.406	0.2709	42	0.102	254.11	370.40

Tabla 14. Caracterización celda 2. Grupo 3

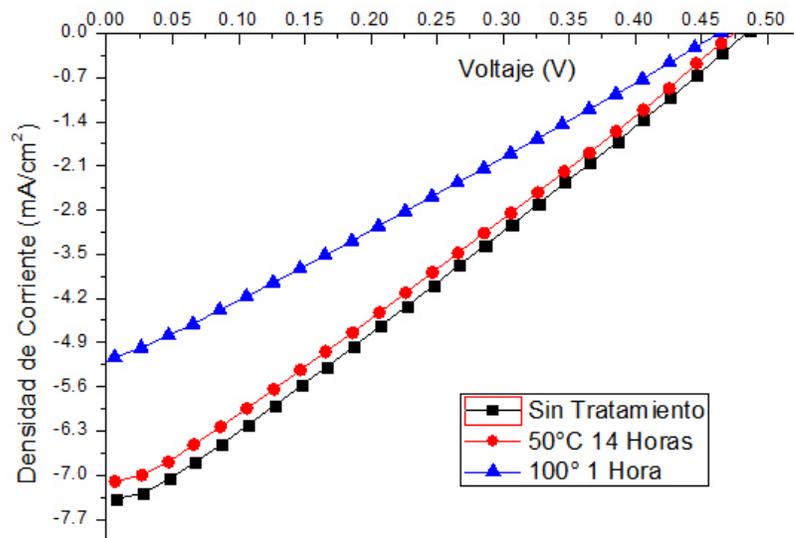


Figura 30. Comparación tratamiento térmico contacto 2

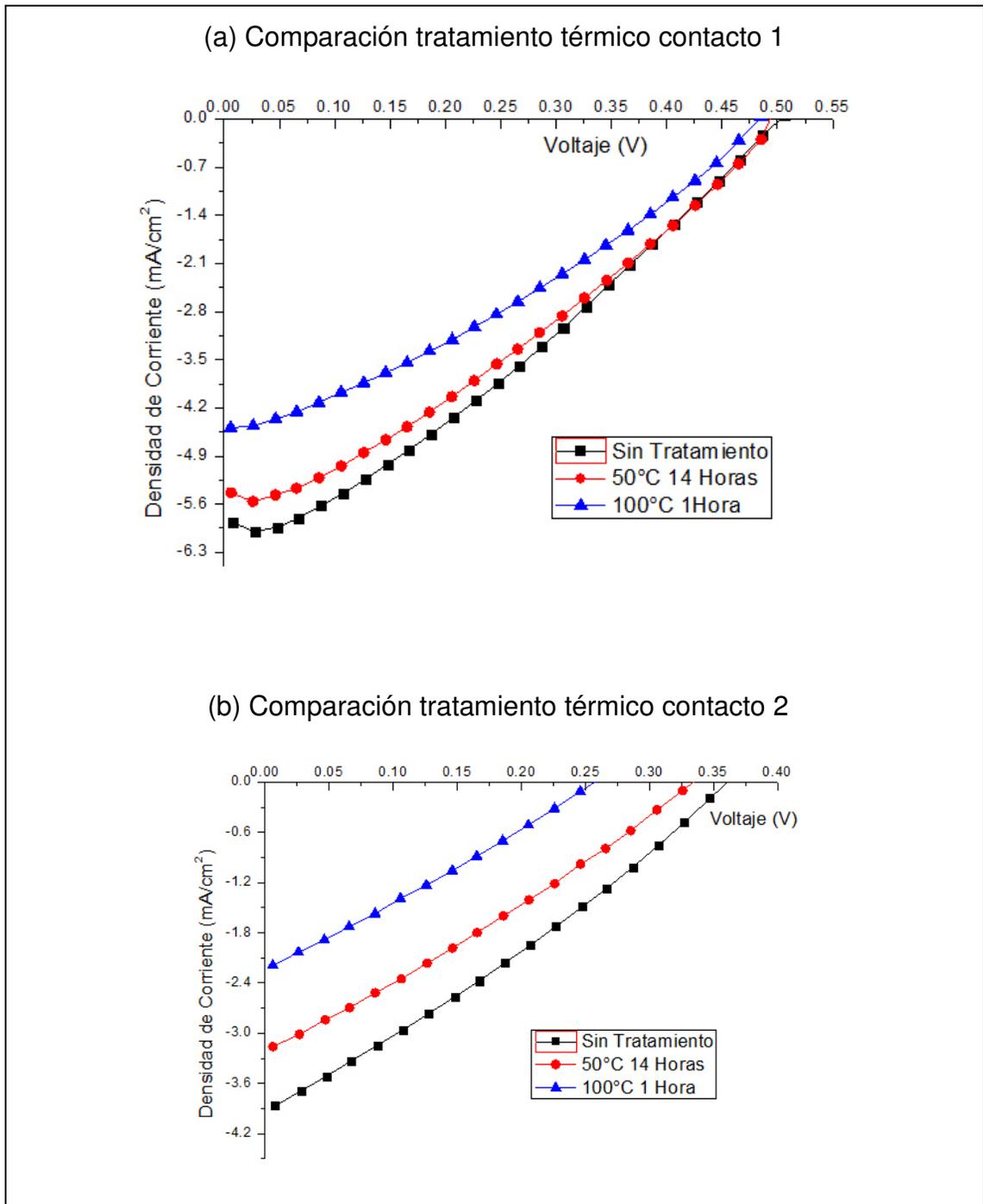


Figura 31. Curvas de densidad de corriente y tensión grupo 3, celda 2

3.4.4 (Grupo de Celdas 4) Influencia del Tipo de Material sobre la Eficiencia de Celdas Fotovoltaicas de estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$

Éste grupo de celdas consta de 4 muestras con las que se pudo analizar lo siguiente:

- Se pretende confirmar el material adecuado para el contacto que se debe utilizar en la celda fotovoltaica de estructura $AgSb(S,Se)_2$.
- Validación de Influencia del tratamiento térmico en aire (mufla) aplicado a los contactos de carbón después del depósito de plata y aluminio.

En la *Tabla 15* se presentan las especificaciones de elaboración de las muestras pertenecientes a éste grupo.

	(CdS)	Mufla	(Sb2S3)		H.V	(Sb2S3)	(Sb2S3)	(Ag)	(Se)	(Se)	H.V
Celda			Tiempo	Temperatura				Espesor			
1	SI	SI	2 horas	25°C	X	SI	SI	200nm	SI	SI	SI
2	SI	SI	1 hora	25°C	SI	SI	SI	200nm	SI	SI	SI
4	SI	SI	2 horas	25°C	SI	SI	SI	250nm	SI	SI	SI
3	SI	SI	15 min	25°C	X	SI	SI	200nm	SI	SI	SI

Tabla 15. Especificaciones de elaboración grupo 4.

En la *Figura 32* se puede ver el orden de los electrodos para las celdas 1 y 2 y en la *Figura 33* para las celdas 3 y 4.

Las especificaciones de los contactos se presentan en la *Tabla 16*.

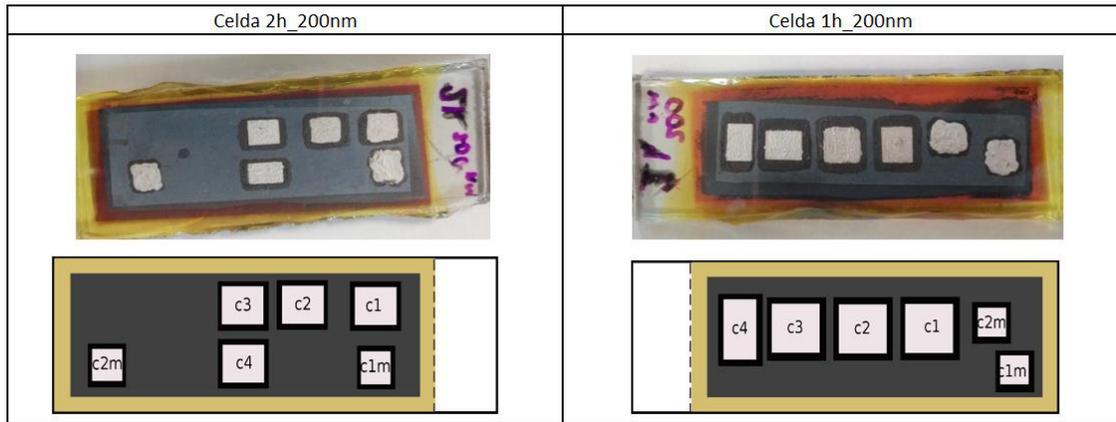


Figura 32. Orden de electrodos celda 1 y 2. Grupo 4.

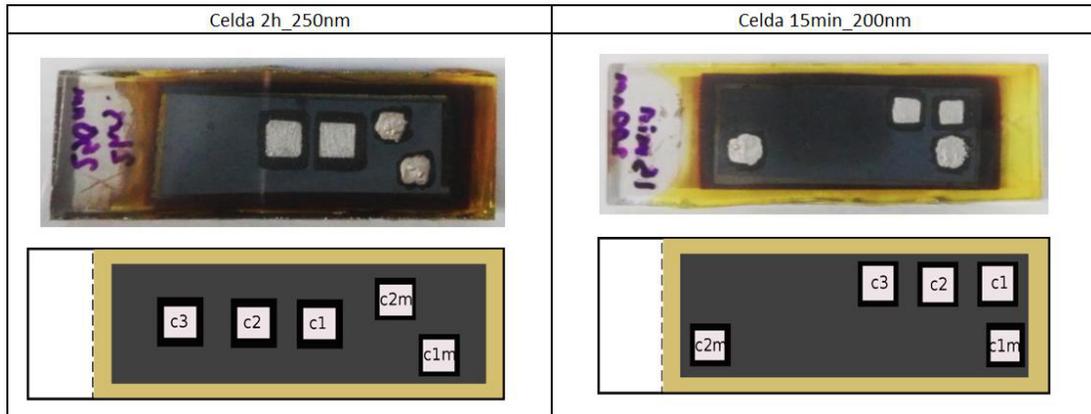


Figura 33. Orden de electrodos celda 3 y 4. Grupo 4.

	Material	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
		2h_200nm	1h_200nm	2h_250nm	15min_200nm
		Área [mm ²]			
Contacto 1	Aluminio evaporado 100 nm + Pintura de plata	30	30	36	25
Contacto 2	Pintura de Plata	30	30	36	25
Contacto 3	Plata evaporada 100 nm + Pintura de plata	30	30	36	25
Contacto 4	Plata evaporada 200 nm + Pintura de plata	30	30	36	25

Tabla 16. Especificación de electrodos grupo de celdas 4.

La metodología de estudio de éste grupo de celdas consistió en:

Primera Etapa:

- Se elaboraron 3 contactos en cada una de las celdas con las especificaciones que se muestran en la *Tabla 16*. Con el fin de que la única variable fuera el material de depósito sobre la pintura de carbón, se elaboraron electrodos del mismo tamaño y mismo espesor, a excepción de la pintura de plata ya que no se puede controlar el espesor de la misma.
- Caracterización de la celda fotovoltaica con los contactos 1, 2,3: Al conocer los parámetros eléctricos de cada una de las celdas para los puntos de colección de carga se determinó cual era el contacto con el que se consiguió el mejor desempeño.

Los resultados obtenidos para ésta etapa se pueden ver a continuación:

Como se puede ver en la

Caracterización grupo 4										
Celda	Contacto	Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[mA]	FF	Area [mm ²]	eficiencia %	RS [Ω]	RP [Ω]
1	1	0.3263	- 1.700	0.1658	- 0.95	0.278	30	0.53	143.37	292.10
	2	0.3463	- 2.000	0.1658	- 1.10	0.271	30	0.63	48.77	278.64
	3	0.3861	- 2.400	0.2068	- 1.30	0.295	30	0.91	122.13	849.30
2	1	0.4658	- 4.317	0.2272	- 2.51	0.284	30	1.90	63.33	2941.09
	2	0.4657	- 4.510	0.2271	- 2.70	0.292	30	2.04	44.44	361.94
	3	0.4865	- 5.700	0.2477	- 3.20	0.287	30	2.66	66.81	60.6500
3	1	0.3269	- 0.466	0.1667	- 0.24	0.259	36	0.1096	130.65	785.39
	2	0.3471	- 0.721	0.1669	- 0.39	0.261	36	0.1817	58.51	510.05
	3	0.1275	- 1.300	0.0478	- 0.78	0.230	36	0.1032	80.55	80.34
4	1	0.3271	- 0.469	0.1673	- 0.25	0.267	25	0.1642	576.45	728.76
	2	0.3474	- 0.727	0.1667	- 0.40	0.262	25	0.2649	50.81	489.94

Tabla 17 en cada una de las celdas los contactos con mejor desempeño fueron los de pintura de plata y plata evaporada.

La celda con las mejores características eléctricas es la # 2 (1h - 200nm).

Caracterización grupo 4										
Celda	Contacto	Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[mA]	FF	Area [mm ²]	eficiencia %	RS [Ω]	RP [Ω]
1	1	0.3263	- 1.700	0.1658	- 0.95	0.278	30	0.53	143.37	292.10
	2	0.3463	- 2.000	0.1658	- 1.10	0.271	30	0.63	48.77	278.64
	3	0.3861	- 2.400	0.2068	- 1.30	0.295	30	0.91	122.13	849.30
2	1	0.4658	- 4.317	0.2272	- 2.51	0.284	30	1.90	63.33	2941.09
	2	0.4657	- 4.510	0.2271	- 2.70	0.292	30	2.04	44.44	361.94
	3	0.4865	- 5.700	0.2477	- 3.20	0.287	30	2.66	66.81	60.6500
3	1	0.3269	- 0.466	0.1667	- 0.24	0.259	36	0.1096	130.65	785.39
	2	0.3471	- 0.721	0.1669	- 0.39	0.261	36	0.1817	58.51	510.05
	3	0.1275	- 1.300	0.0478	- 0.78	0.230	36	0.1032	80.55	80.34
4	1	0.3271	- 0.469	0.1673	- 0.25	0.267	25	0.1642	576.45	728.76
	2	0.3474	- 0.727	0.1667	- 0.40	0.262	25	0.2649	50.81	489.94

Tabla 17. Caracterización contactos sin tratamiento térmico grupo 4.

Segunda Etapa:

- Evaluación de la influencia del tratamiento térmico a los contactos para las celdas con mejores propiedades eléctricas: Después de determinar las celdas con el mejor desempeño se le aplico tratamiento térmico en aire a los contactos antes mencionados, las condiciones térmicas fueron:
 - Tratamiento térmico: 50 °C 14 horas – medición de parámetros.
 - Tratamiento térmico: 100 °C 1 hora – medición de parámetros.
- Se realizó la medición de parámetros eléctricos para cada una de los tratamientos térmicos, los resultados obtenidos se pueden ver en la *Tabla 18*

Celda #2 / celda 1h_200nm										
Contacto		Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[mA]	FF	Area [mm ²]	eficiencia %	RS [Ω]	RP [Ω]
1	Inicial	0.4658	-4.3174	0.2272	-2.5135	0.284	30	1.903	63.33	2941.09
	14 horas 50°C	0.4854	-3.1390	0.2462	-1.6423	0.265	30	1.348	132.51	220.97
	1 hora 100°C	0.5046	-2.9875	0.2455	-1.5782	0.257	30	1.291	154.20	216.07
2	Inicial	0.4657	-4.5103	0.2271	-2.7006	0.292	30	2.044	44.44	361.94
	14 horas 50°C	0.4856	-3.3489	0.2467	-1.7723	0.269	30	1.457	123.78	262.59
	1 hora 100°C	0.5048	-3.1598	0.2454	-1.6775	0.258	30	1.372	140.21	181.45
3	Inicial	0.4865	-5.7000	0.2477	-3.2000	0.287	30	2.660	66.81	60.6500
	14 horas 50°C	0.4653	-4.1947	0.2466	-2.3317	0.295	30	1.917	55.99	5251.09
	1 hora 100°C	0.4853	-3.9645	0.2465	-2.1011	0.269	30	1.726	58.32	279.03

Tabla 18. Resultados de relación de eficiencia con la temperatura calentamiento en aire.

- Se puede ver que el aplicar el tratamiento térmico disminuyó las características eléctricas de los electrodos, lo cual sigue el mismo comportamiento que se obtuvo en los resultados del grupo de celdas anterior, llegando a la conclusión de que el uso de tratamiento térmico en aire para la celda no es un proceso que produzca beneficios significativos.

Tercera Etapa:

- Finalmente se elaboró un contacto 4 el cual consta de pintura de carbón con un depósito de plata por evaporación con un espesor de 200 nm, con el fin de conocer la influencia del espesor del material.

Se realizó la medición y comparación de parámetros para los contactos de la celda 2 para los contactos 3 y 4 con espesores de 100 nm y 200 nm de plata evaporada respectivamente, los resultados se pueden ver en la *Tabla 19*.

Celda # 2 / Celda 1h_200nm									
Contacto	Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[mA]	FF	Area [mm ²]	eficiencia %	RS [Ω]	RP [Ω]
3	0.48650	-5.700	0.2477	-3.200	0.287	30	2.66	66.81	6065.00
4	0.48504	-4.438	0.2464	-2.482	0.284	30	2.04	93.55	600.02

Tabla 19. Relación de la eficiencia de la planta con espesores de 100nm y 200nm de plata.

Se pudo ver una disminución en los parámetros eléctricos del contacto de 200 nm de espesor, la eficiencia presentó una reducción del 23.31%.

3.4.5 (Grupo de celdas 5) Influencia del Espesor del Electrodo de Plata Evaporada en las Celdas de estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$

Éste grupo de celdas está constituida por cuatro muestras en las que se buscó encontrar una relación directa con el espesor del material utilizado y la eficiencia.

En la *Tabla 20* se pueden ver las especificaciones de elaboración de las celdas, para éste grupo se hizo una variación en los espesores de evaporación de plata con lo cual se esperaba aumentar un poco más la conductividad eléctrica y además se puede ver el uso de RTP en lugar del horno de vacío como se ha realizado en las celdas anteriores para etapa de sello después del primer baño de Sulfuro de Antimonio, el cual también tuvo modificaciones de espesor.

En la celda Z se realizó una modificación inicial la cual consiste en tener una capa de Sulfuro de Zinc sobre el TCO, en búsqueda de tener un mejor factor de forma en la curva de corriente y tensión.

Celda	(CdS)	Mufla	(Sb2S3)	RTP	(Sb2S3)	(Sb2S3)	(Ag)	(Se)	(Ag)	(Se)	H.V
1	SI	SI	10 min 25 °C	400°C 5 min	SI	NO	50 nm	SI	50 nm	SI	SI
2	SI	SI	1 hora 25 °C	400°C 5 min	SI	NO	50 nm	SI	50 nm	SI	SI
3	SI	SI	1 hora 25 °C	400°C 3 min	4 horas 25°C		60 nm	SI	60 nm	SI	SI
4 y 5	SI	SI	3 veces 4 horas 25°C	NO	NO		60 nm	SI	60 nm	SI	SI

Tabla 20. Especificaciones de elaboración grupo de celdas 5.

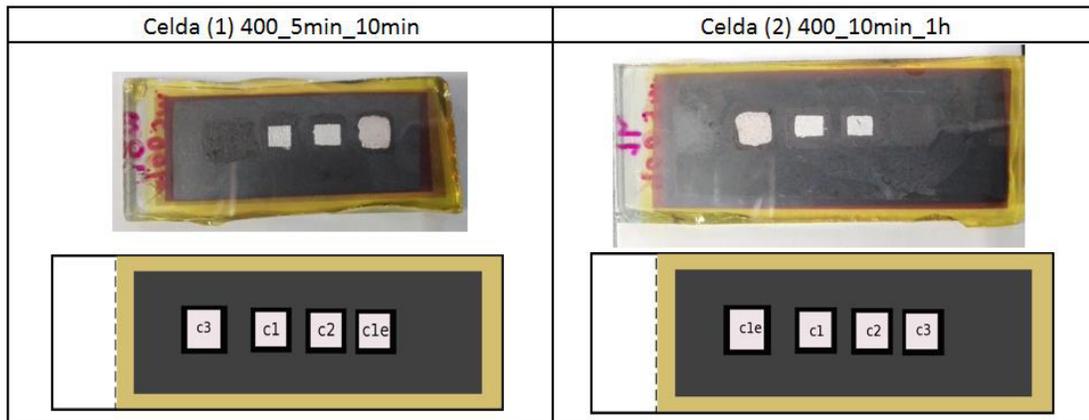


Figura 34. Orden de los electrodos celdas 1 y 2 grupo 5.

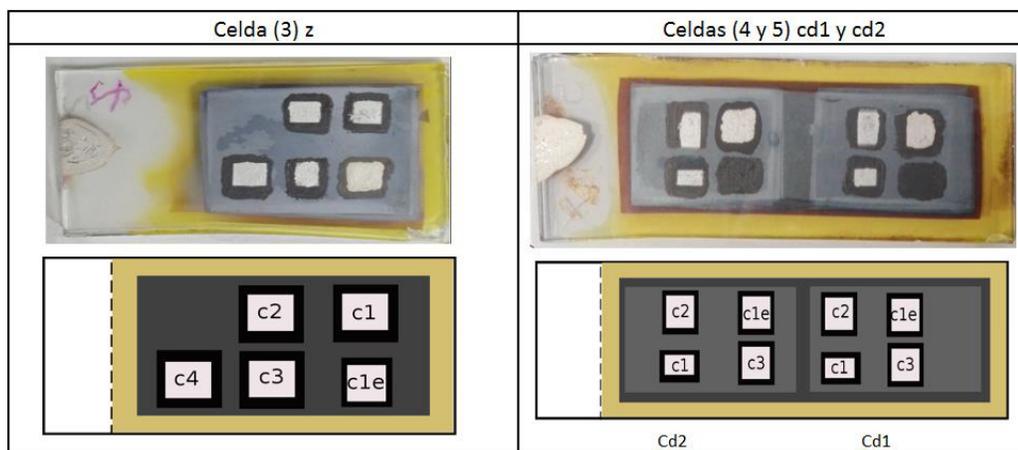


Figura 35. Orden de los electrodos celdas 3 y 4 grupo 5.

El objetivo principal de éste grupo de celdas era conocer el comportamiento de las características eléctricas de las celdas para diferentes espesores de contacto.

Para ésta etapa del proyecto se tuvo en cuenta solo el electrodo de plata evaporada, debido a que según los resultados obtenidos en los experimentos anteriores fue el material con el que se obtuvo un mejor rendimiento eléctrico. Se realizaron diferentes contactos con la misma forma y mismo tamaño en donde la

única variable de evaluación fue el espesor, la especificación de los contactos analizados se puede ver en la *Tabla 21*

Contacto	Especificación
1	Evaporación Plata 100nm + Pintura de Plata
2	Evaporación Plata 200nm + Pintura de Plata
3	Evaporación Plata 60nm + Pintura de Plata
4	Evaporación Plata 300nm + Pintura de Plata
c1e	Pintura de Plata

Tabla 21. Especificaciones de contactos para las celdas del grupo 5.

Los resultados obtenidos para éste grupo de celdas se pueden ver en la *Tabla 22*, en la mayoría de los casos se obtuvo el mismo comportamiento del grupo de celdas 4 con la muestra 1h_200nm obteniendo reducciones en la eficiencia con un valor promedio de 36.4% al momento de aumentar el espesor del electrodo.

Se pudo ver que en algunas muestras al aumentar el espesor del contacto la tendencia de la eficiencia era un poco cambiante, sin embargo se tiene que para el 60% de las celdas el electrodo con el que se obtuvo un mejor rendimiento fue con la plata evaporada de 60nm. Se puede ver que la tendencia en la mayoría de las celdas presenta un aumento para espesores de más de 200nm, sin embargo es despreciable a comparación de las características que se obtienen con el espesor de 60 nm de plata evaporada.

Celda	Contacto	Voc [V]	Isc[mA]	Vpm[V]	Ipm[mA]	FF	Area [mm ²]	eficiencia %	RS [Ω]	RP [Ω]	Tendencia eficiencia
1	60 nm	0.5057	-1.227	0.3260	-0.737	0.387	16	1.501	187.54	433.32	
	100 nm	0.4853	-0.694	0.2855	-0.399	0.338	25	0.455	273.64	1040.07	
	200 nm	0.5461	-0.244	0.3858	-0.164	0.474	25	0.253	283.33	8162.07	
	ce1	0.5056	-0.635	0.3261	-0.314	0.319	36	0.285	277.45	941.44	
2	60 nm	0.4260	-1.019	0.2266	-0.603	0.315	25	0.546	279.50	1264.36	
	100 nm	0.2264	-0.794	0.1264	-0.420	0.296	25	0.213	217.15	340.51	
	200 nm	0.4459	-0.833	0.2261	-0.570	0.347	25	0.516	319.36	946.75	
	300 nm	0.4847	-1.043	0.2650	-0.666	0.349	25	0.706	273.28	1679.62	
	ce1	0.3462	-0.749	0.1855	-0.437	0.313	36	0.225	125.27	847.10	
3	60 nm	0.4267	-5.016	0.2274	-2.490	0.265	16.00	3.539	41.38	85.45	
	100 nm	0.2458	-3.309	0.1258	-1.788	0.277	16.00	1.406	51.73	89.99	
	200 nm	0.3854	-3.528	0.1856	-1.812	0.247	16.00	2.101	96.78	97.54	
	300 nm	0.4469	-4.355	0.2272	-2.306	0.269	20.00	2.619	37.67	100.23	
	ce1	0.3851	-3.779	0.2058	-1.860	0.263	25.00	1.531	92.20	97.96	
4.a	60 nm	0.2474	-2.519	0.1270	-1.299	0.265	12.00	1.375	88.71	102.89	
	100 nm	0.2856	-2.816	0.1464	-1.424	0.259	12.00	1.737	48.23	107.50	
	200 nm	0.2854	-3.072	0.1464	-1.579	0.264	16.00	1.445	84.32	105.75	
	ce1	0.2463	-3.040	0.1261	-1.562	0.263	25.00	0.788	73.86	84.40	
4.b	60 nm	0.3269	-3.192	0.1663	-1.674	0.267	12.00	2.320	81.24	120.95	
	100 nm	0.2856	-3.053	0.1463	-1.583	0.266	12.00	1.929	66.14	107.78	
	200 nm	0.2655	-3.701	0.1262	-2.146	0.276	16.00	1.693	59.77	90.68	
	ce1	0.3054	-3.584	0.1462	-1.979	0.264	25.00	1.157	58.35	97.85	

Tabla 22. Resultados de evaluación de la relación entre la eficiencia de la celda y el espesor del electrodo analizado.

El factor de forma tiene un buen comportamiento para las muestras 1 y dos, sin embargo se ve una eficiencia baja comparada con los resultados de las celdas anteriores.

Para la celda 3 que cuenta con la capa de Óxido de Zinc en el TCO el factor de forma no tuvo el comportamiento esperado sin embargo se obtuvo la mayor eficiencia registrada para éste tipo de estructura, pero más adelante se mostraran otros estudios para evaluar dicha hipótesis.

A mayor área iluminada se tiene una mayor corriente en la celda, sin embargo para conocer la verdadera área efectiva del contacto se procedió a aislar el electrodo con el que se obtuvo el mejor rendimiento en el experimento anterior, por lo cual se realizó una serie de pruebas en la que se aisló la superficie deseada primeramente con una máscara seguido de realizar un corte que permitiera desconectar la zona deseada de las demás partes de la celda. Los resultados se presentan en el siguiente grupo

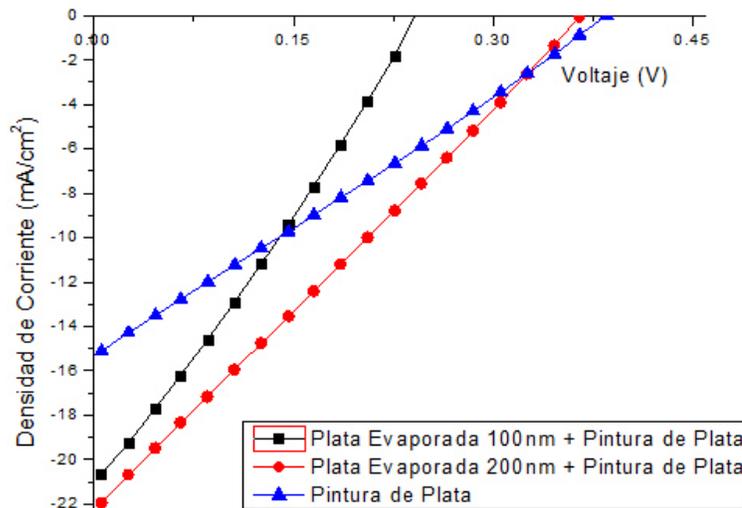


Figura 36. Curva de Densidad de corriente y tensión. Celda 3. Grupo de celdas 5

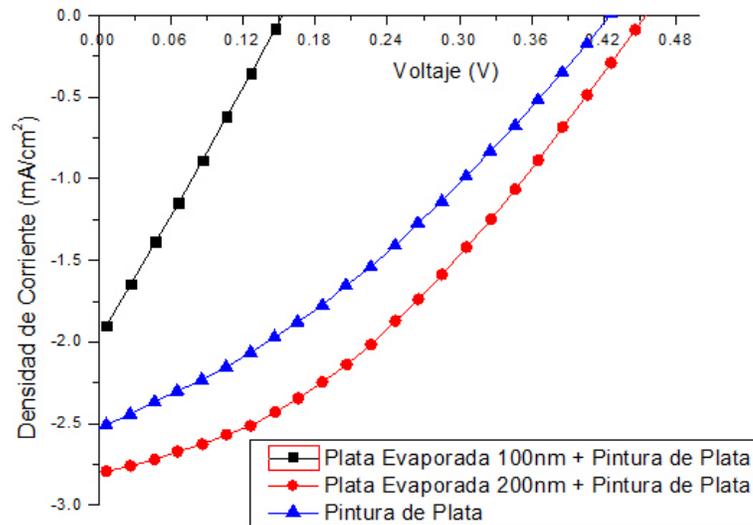


Figura 37. Resultados celda 1. Grupo de celdas 5.

3.4.6 Análisis del Grupo 5 con Mascara

En los resultados del grupo de celdas 5 se pudo ver que el contacto con el que se obtuvo un mejor rendimiento fue el número 3 para la celda z, por lo cual se realizó una serie de experimentos que buscaban dar un dimensionamiento de la capacidad de generación de electricidad que tiene la celda a medida que se cambia el tamaño del área que será iluminada.

Escenarios de estudio:

1. Celda con iluminación y ningún tipo de mascara.
2. Celda con mascara.
3. Celda con electrodo aislado.
4. Celda con electrodo aislado RTP 300°C 1min
5. Celda con electrodo aislado RTP 400°C 30seg

Se utilizó una máscara que permite el paso de la luz solo al área del electrodo como se muestra en la *Figura 38*.

Y para el escenario del electrodo completamente aislado se procedió a quitar una parte de la película de la celda, evitando que el electrodo en cuestión hiciera parte de lo demás, como se puede ver en la *Figura 39*.



Figura 38. Mascara utilizada para aislar la celda z, en el grupo de celdas

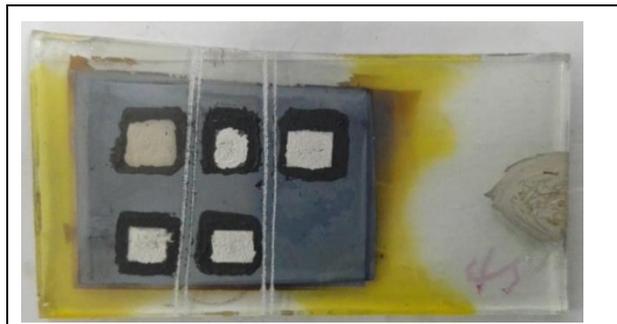


Figura 39. Celda z con electrodo 3 aislado.

En la *Tabla 23* y la *Figura 40* se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los 5 escenarios:

caracterización CTO1 Plata Evaporada 60nm + Pintura de Plata										
Escenario	voc (mV)	Isc (mA)	Vpm (mV)	Ipm (mA)	ff	Area (mm ²)	eficiencia %	RS (Ω)	RP (Ω)	Tendencia de la eficiencia
1	426.73	-5.02	227.39	-2.49	0.265	16	3.54	41.38	85.45	
2	306.12	-2.32	147.16	-1.18	0.245	16	1.09	116.99	114.72	
3	485.04	-1.85	284.80	-0.89	0.282	16	1.58	29.79	245.34	
4	464.10	-1.95	264.39	-0.99	0.289	16	1.64	128.26	257.38	
5	426.20	-1.97	246.75	-0.97	0.284	16	1.49	127.60	216.78	

Tabla 23. Resultados del electrodo 3, celda z con electrodo aislado, con y sin tratamiento térmico.

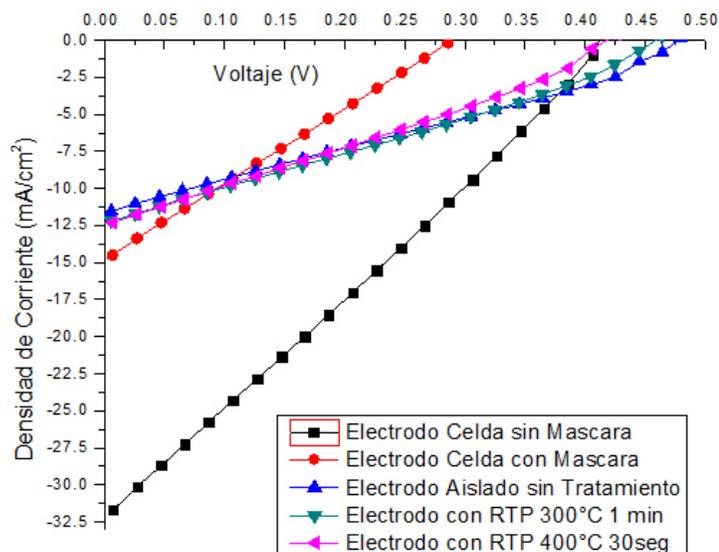


Figura 40. Grafica de corriente y tensión electrodo 3, celda z con electrodo aislado, con y sin tratamiento térmico.

- Al comparar los resultados de las curvas de corriente y tensión de la celda con mascara y sin ella se puede ver que se obtiene una mayor densidad de corriente al iluminar una mayor área de la celda.

- Se puede ver que no hubo un cambio significativo en los parámetros eléctricos de la celda después de realizar el tratamiento térmico de RTP 300°C 1 minuto.
- El cambio más significativo de realizar el aislamiento del electrodo y el tratamiento térmico se evidencio en el factor de forma, que paso de 26.5% a 28.9%.

3.4.7 (Grupo de Celdas 6) Evaluación de la Influencia de la Distancia entre Contactos en las Celdas Fotovoltaicas de estructura $CdS/AgSb(S,Se)_2$

En esta parte del proyecto se realizó una serie de pruebas sobre una de las celdas que mostro uno de los mejores rendimientos, se utilizó la celda 2 del grupo 4, la cual tiene la cual se elaboró según el plan que muestra la *Tabla 15*.

El propósito de éste grupo de celdas era conocer la influencia de la distancia entre contactos, por lo tanto se desarrolló la siguiente metodología de análisis:

Metodología:

1. Elaboración de muestras: Se elaboraron 3 celdas con las mismas especificaciones de la celda 2 (1h_200nm) como se puede ver en la *Tabla 15*, la única diferencia que tienen con las celdas del grupo 4 es que se prolongó el neutro hacia un lado de la celda, como se puede ver en la *Figura 41*.
2. Se realizó un análisis de las características eléctricas de las celdas para los siguientes escenarios, teniendo en cuenta la configuración de contactos de la *Tabla 24*.
 - a) Neutro al lado de la celda
 - b) Neutro en la parte inferior de la celda

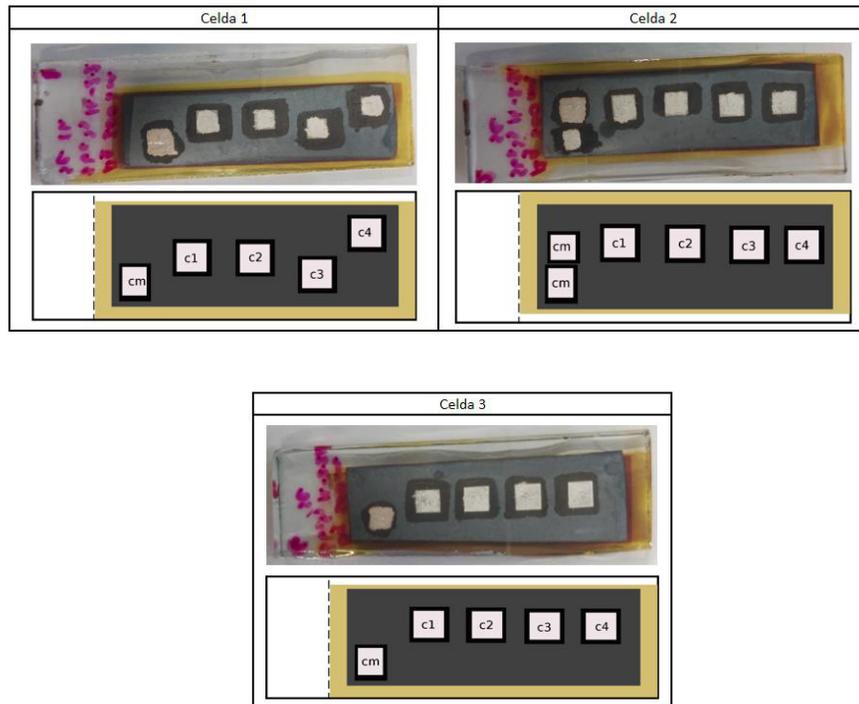


Figura 41. Celdas elaboradas grupo de celdas 6.

3. para la celda 1 se elaboraron contactos de 60 nm de plata evaporada + pintura de plata, se ubicaron a de tal forma que se tuvieron contactos cerca y lejos de los electrodos comunes de la celda.
4. De igual forma para la celda 2 se elaboraron contactos del mismo material pero con respecto al neutro del lado se pusieron a la misma distancia y con respecto al neutro inferior se ubicaron de tal forma en que se tuvieron contactos cerca y lejos.
5. Para la celda 3 se elaboró un contacto de 60 nm de plata evaporada + pintura de plata y 3 contactos de 300nm de plata evaporada + pintura de plata ubicados de igual forma que en la celda 2.

Celda	Especificación	Neutro normal		Neuto lado	
		Contacto	Distancia entre contactos	Contacto	Distancia entre contactos
Celda 1	evaporación Plata 60nm + pintura de plata	C1	1cm	C4	0.5cm
	evaporación Plata 60nm + pintura de plata	C2	2cm	C1	1cm
	evaporación Plata 60nm + pintura de plata	C3	3cm	C2	1cm
	evaporación Plata 60nm + pintura de plata	C4	4cm	C3	1.5cm
Celda 2	evaporación Plata 60nm + pintura de plata	C1	1cm	C1	1cm
	evaporación Plata 60nm + pintura de plata	C2	2cm	C2	1cm
	evaporación Plata 60nm + pintura de plata	C3	3cm	C3	1cm
	evaporación Plata 60nm + pintura de plata	C4	4cm	C4	1cm
Celda 3	evaporación Plata 60nm + pintura de plata	C1	1cm	C1	1cm
	evaporación Plata 300nm + pintura de plata	C2	2cm	C2	1cm
	evaporación Plata 300nm + pintura de plata	C3	3cm	C3	1cm
	evaporación Plata 300nm + pintura de plata	C4	4cm	C4	1cm

Tabla 24. Configuración de contactos, grupo de celdas 6.

Como se puede ver en la *Tabla 25*, los valores de corriente y tensión presentaron diferencias significativas para los contactos 1 y 4, los cuales a pesar de tener el mismo material tienen una distancia diferente entre ellos. El contacto 1 se considera el más cercano al punto negativo y el contacto 4 se considera el más lejano al punto negativo, en la *Figura 42* y la *Figura 43* se puede ver el comportamiento de las curvas de corriente y tensión de las celdas fotovoltaica. Para la curva del contacto 1 se puede ver que la corriente de cortocircuito es la mínima en comparación con las demás.

Los resultados obtenidos se pueden ver en la *Tabla 25*.

Celda	neutro	Contacto	voc [mV]	Isc [mA]	Vpm [mV]	Ipm [mA]	FF	Area [mm ²]	n %	RS [Ω]	RP [Ω]	Tendencia de la eficiencia
1	Neutro normal	C1	404.89	-2.281	205.40	-1.161	0.2582	16	1.49	94.32	205.27	
		C2	424.40	-1.934	224.91	-0.953	0.2611	16	1.34	191.73	246.18	
		C3	424.92	-1.969	204.87	-1.079	0.2641	16	1.38	192.66	253.30	
		C4	425.00	-1.872	204.95	-1.005	0.2588	16	1.29	201.24	245.53	
	Neutro lado	C1	425.15	-1.977	205.17	-1.075	0.2623	16	1.38	178.66	243.88	
		C2	425.00	-2.043	225.81	-1.033	0.2686	16	1.46	173.22	242.57	
		C3	425.00	-1.932	205.32	-1.053	0.2633	16	1.35	180.95	245.73	
		C4	404.89	-2.583	205.40	-1.356	0.2664	16	1.74	124.29	222.41	
2	Neutro normal	C1	405.49	-2.243	205.70	-1.163	0.2632	25	0.96	135.22	220.89	
		C2	405.94	-2.264	206.37	-1.167	0.2621	25	0.96	160.82	221.82	
		C3	426.05	-1.799	205.77	-0.959	0.2575	25	0.79	190.91	255.06	
		C4	425.90	-1.745	226.41	-0.890	0.2710	25	0.81	81.69	269.67	
	Neutro lado	C1	405.49	-1.982	226.49	-0.956	0.2695	25	0.87	33.43	234.85	
		C2	405.34	-1.971	205.92	-0.996	0.2567	25	0.82	184.36	225.67	
		C3	405.79	-2.207	206.30	-1.127	0.2596	25	0.93	158.91	180.44	
		C4	425.67	-2.212	225.96	-1.153	0.2768	25	1.04	73.86	216.19	
3	Neutro normal	C1	165.62	-1.101	86.29	-0.587	0.2777	25	0.20	115.74	160.94	
		C2	305.89	-1.530	165.92	-0.761	0.2698	25	0.51	161.69	247.62	
		C3	126.59	-0.941	46.96	-0.578	0.2280	25	0.11	109.93	110.70	
		C4	405.56	-1.135	206.15	-0.591	0.2649	25	0.49	308.79	414.40	
	Neutro lado	C1	185.88	-1.278	86.07	-0.768	0.2781	25	0.26	99.75	171.65	
		C2	306.42	-1.560	166.30	-0.798	0.2775	25	0.53	154.00	231.73	
		C3	126.44	-1.709	65.95	-0.846	0.2582	25	0.22	47.52	70.40	
		C4	406.01	-1.561	206.30	-0.803	0.2613	25	0.66	208.05	283.15	

Tabla 25. Parámetros obtenidos grupo 6.

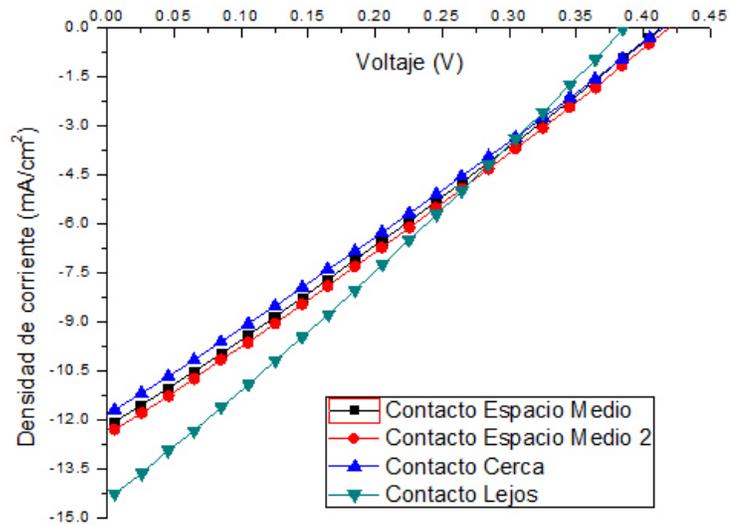


Figura 42. Curva de corriente y tensión celda 1 neutro parte inferior de la celda, grupo 6

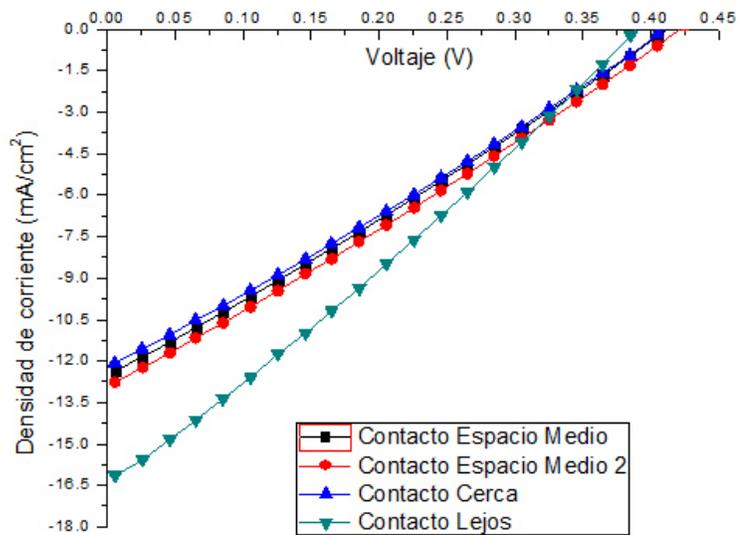


Figura 43. Curva de corriente y tensión celda 1 neutro lado de la celda, grupo 6

3.4.8 Resultados de SEM

Microscopio Electrónico de Barrido: (Scanning Electron Microscope, SEM)
Es conocido como una técnica de microscopía óptica, la cual es utilizada para conocer las fases cristalinas, impurezas, microfisuración, textura, deterioro, análisis de fracturas, tamaños de grano y entre otras características del material de evaluación.

En este caso se utilizó el microscopio electrónico de barrido para conocer la textura de la plata en sus diferentes tipos de depósito, en la *Tabla 26* y la *Figura 44* se pueden ver las condiciones analizadas y las muestras utilizadas en el estudio

Muestra	Composición de la Muestra
1	Carbón + 300 nm Plata evaporada + pintura de plata
2	Carbón + 60 nm Plata evaporada + pintura de plata
3	Carbón + 300 nm Plata evaporada
4	Carbón + 60 nm Plata evaporada
5	Carbón + pintura de plata

Tabla 26. Especificaciones de muestras evaluadas en SEM.

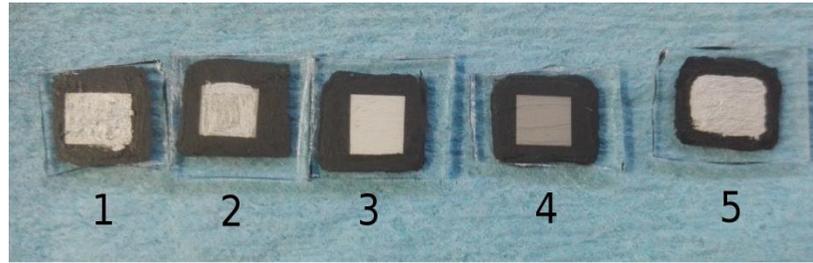


Figura 44. Muestras analizadas con Microscopio Electrónico de Barrido. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Figura 45 y la Figura 46.

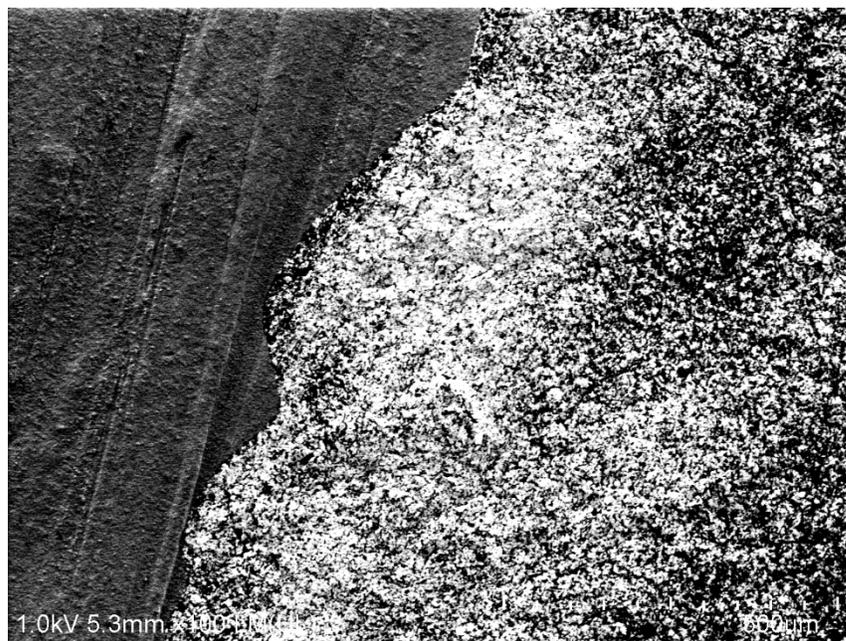


Figura 45. Interfaz entre la pintura de plata y la pintura de carbón. Muestra 5

En los resultados de la muestra de la pintura de plata se puede ver que no hay homogeneidad en la capa.

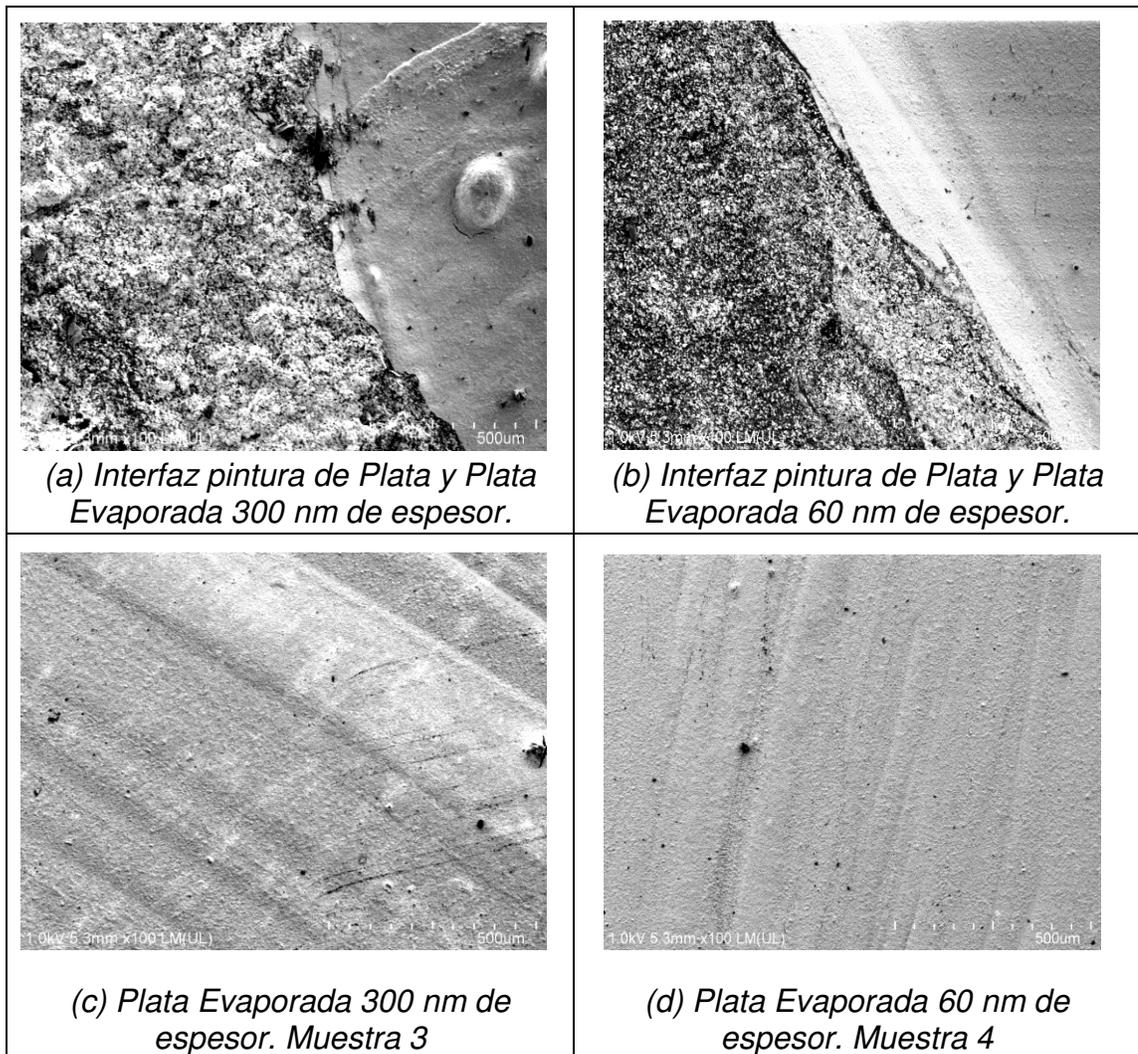


Figura 46. Resultados de muestras de plata evaporada evaluadas con SEM.

En los resultados de las muestras de plata evaporada se puede ver que hay mucha más homogeneidad en la muestra con espesor de 60 nm.

Al ver la interfaz de la plata para las figuras (a) y (b) se puede ver que a pesar de que la capa de pintura de plata es muy poco homogénea en ambas en la muestra de 300 nm se ve mucho más marcada la diferencia de capas. Además son mucho más notorias algunas fisuras.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS TEÓRICO DE LA CURVA DE CORRIENTE Y TENSIÓN DE LA CELDA FOTOVOLTAICA DE ESTRUCTURA $CdS/AgSb(S, Se)_2$

4.1 DETERMINACIÓN DE MÁXIMA INTENSIDAD DE CORRIENTE PARA EL MATERIAL ABSORBEDOR $AgSb(S, Se)_2$

Espectro de masa de aire:

AM 1.5: corresponde a la irradiancia y el espectro de luz incidente en un día despejado sobre una superficie que se encuentra orientada hacia al sol ubicada en un ángulo de 48.2° con respecto a la horizontal.

Teniendo en cuenta la curva de comportamiento del espectro AM 1.5 mostrado en la Figura 47.

Debido a que directamente no se puede conocer el número exacto de fotones absorbidos por el material $Ag(Sb, Se)_2$, se requiere conocer la tasa de absorción según la energía y la longitud de onda del espectro AM 1.5 por lo que se realiza la conversión mostrada en la ecuación (12) para cada uno de los puntos de la curva.

$$N_{ph} = \frac{I \lambda}{h c} \quad (12)$$

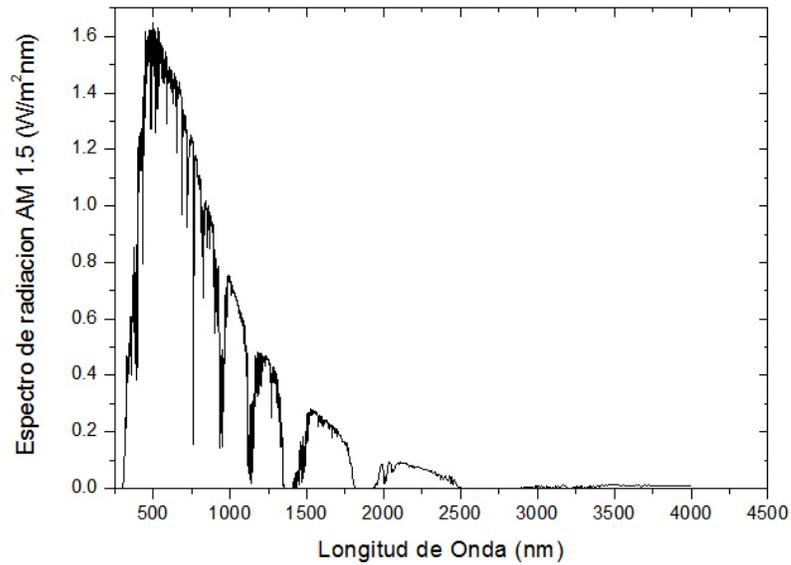


Figura 47. Espectro AM 1.5

λ : Longitud de onda [nm].

N_{ph} : Numero de fotones por segundo por unidad de área.

I : Punto de irradiancia [W/m^2nm].

h : Constante de Planck ($6.62 * 10^{-34} J s$).

c : velocidad de la luz ($2.998 * 10^8 m s$).

El despliegue de unidades para la ecuación (12) se puede ver en la ecuación (13).

$$N_{ph} = \frac{\#fotones}{s m^2 nm} \quad (13)$$

Al aplicar la ecuación presentada anteriormente para cada uno de los valores del espectro se tiene la Figura 48 que se muestra a continuación:

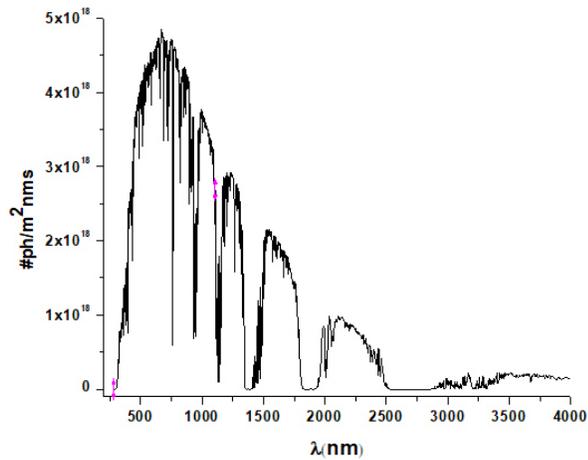


Figura 48. Fotones por unidad de área según el espectro AM 1.5

Para que los electrones en el material puedan saltar de sus respectivos niveles de energía a niveles mayores, los fotones absorbidos deben de tener una energía igual o mayor a la brecha de energía del material, por lo que aplicando la ecuación (14) se podrá conocer la longitud de onda correspondiente para dicho valor de energía el rango de trabajo para el material semiconductor absorbedor será desde valores cercanos a 0 nm hasta el resultado obtenido en la ecuación. Se debe de tener en cuenta que a menor longitud de onda mayor será la energía obtenida.

$$E = \frac{h c}{\lambda} \quad (14)$$

Donde:

E: Brecha de energía del material semiconductor absorbedor (1.1eV)

Despejando la longitud de onda (λ) se tiene que:

$$\lambda = \frac{h c}{E} \tag{15}$$
$$\lambda = \frac{1.24\mu m}{1.1eV} = 1.127\mu m = 1127nm$$

Entonces se tiene que del espectro de luz AM 1.5 el material podrá absorber la energía hasta una longitud de onda de 1127 nm por lo cual en la Figura 49 se puede ver el fragmento de curva para dicho rango de energía.

Al obtener la integral de la curva se conoce la tasa de absorción de electrones por unidad de área, por lo que para dicho material, la cual da como resultado: $2.76 * 10^{21} \frac{\#fotones}{m^2s}$

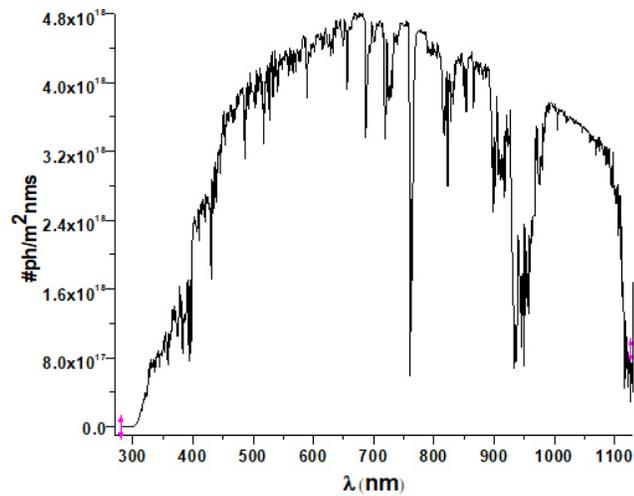


Figura 49. Porción de la curva del espectro AM 1.5 para el material absorbedor $Ag(Sb,Se)_2$

Se requiere conocer la densidad de corriente, por lo que se utiliza la carga de un electrón, considerando que la absorción de un fotón va a generar un par electrón – hueco (eficiencia cuántica unitaria): $1.602 * 10^{-19} \frac{C}{foton}$

Al aplicar dicha consideración se tiene lo siguiente:

$$2.76 * 10^{21} \frac{\#fotones}{m^2s} \left(1.602 * 10^{-19} \frac{C}{foton} \right) = 442.152 \frac{A}{m^2} = 44.215 \frac{mA}{cm^2}$$

Por lo tanto teóricamente se espera que la máxima densidad de corriente que se podrá obtener del material es de $44.215 \frac{mA}{cm^2}$. Cabe mencionar que el resultado se obtiene haciendo uso de una eficiencia cuántica del 100%, sin embargo esta consideración cambia dependiendo de la capacidad de absorción del material.

Para tener una idea del resultado anterior, se puede comparar con la máxima densidad de corriente del silicio, que cuenta con una brecha de energía de 1.25 eV dando como resultado una densidad de corriente máxima de $43.7 \frac{mA}{cm^2}$

4.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES DE LA CELDA FOTOVOLTAICA

4.2.1 Modelo Equivalente a una Celda Fotovoltaica Ideal

Tomando como base las siguientes fuentes bibliográficas [18], [19] una celda solar se representa como la unión de dos semiconductores de tipo P y tipo N respectivamente, lo cual visto de forma técnica se podría comparar con un diodo, además de considerar los electrodos transportadores de carga que son la unión de un metal con alguno de los dos semiconductores antes mencionados

según sea el caso, por lo tanto se puede tener una representación eléctrica del conjunto como se puede ver en la *Figura 50* donde se puede ver el circuito equivalente de una celda solar ideal.

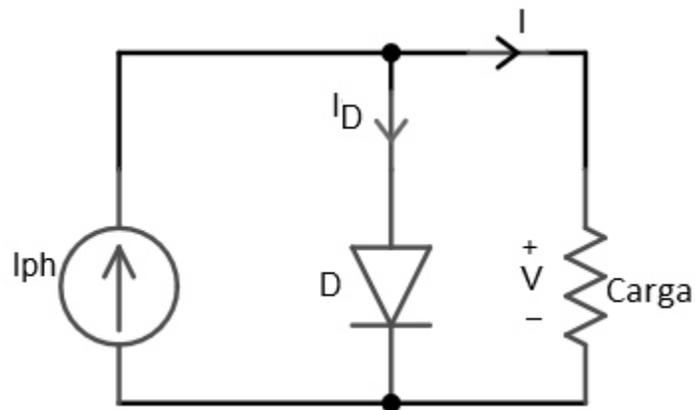


Figura 50. Circuito ideal de la celda fotovoltaica.

I_{ph} : Corriente foto generada. (Fuente de Luz que produce el flujo de los electrones en el dispositivo.)

I_D : Corriente del diodo. (Representación física de los dos semiconductores tipo P y tipo N.)

I : Corriente de la carga. (Corriente que entrega la celda solar.)

V : Voltaje de la carga. (Voltaje que entrega la celda solar.)

Al realizar el análisis circuital se obtiene la ecuación (16)

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left[\frac{qV}{nKT} \right] - 1 \right) \quad (16)$$

Donde

I_o : Corriente de saturación de la celda.
 q : Carga eléctrica del electrón (J/eV).
 n : Factor de idealidad (condición estandar $n=1$).
 K : Constante de Boltzman.
 T : Temperatura (K).

Para dicho circuito se puede tomar las siguientes consideraciones para hallar la corriente de corto circuito y el voltaje de circuito abierto como se puede ver en las ecuaciones (17) y (18) Considerando $I = 0, V = V_{OC}$

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) \quad (17)$$

- Considerando $V = 0, I = I_{SC}$

$$I_{SC} = I_{ph} \quad (18)$$

El comportamiento de la corriente y la tensión eléctrica de la celda fotovoltaica es similar a la de un diodo, por lo tanto en la oscuridad se puede ver la curva mostrada en la *Figura 51* cuando se tiene iluminación se presenta el caso mostrado en la *Figura 52*.

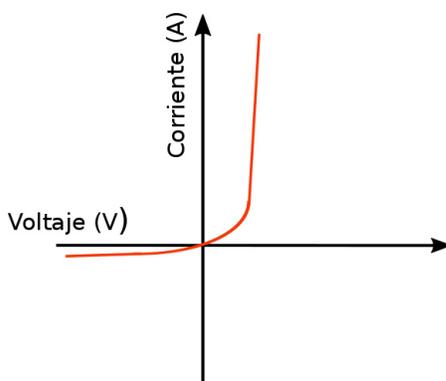


Figura 51. Gráfica de corriente y tensión en oscuridad de una celda solar ideal.

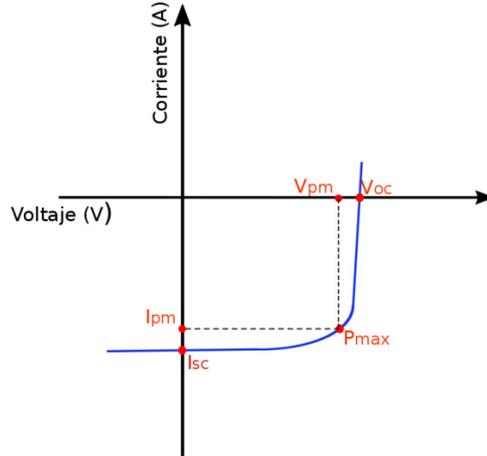


Figura 52. Gráfica de corriente y tensión con iluminación de una celda solar ideal.

Sin embargo la celda fotovoltaica realmente no tiene dicho comportamiento ideal, para una representación más acorde a la realidad se hace uso de los siguientes circuitos equivalentes, con los cuales se tiene en cuenta las pérdidas entre la unión semiconductor - semiconductor y la unión semiconductor - metal:

4.2.2 Modelo de un Diodo con Resistencias R_p y R_s

La celda fotovoltaica tiene pérdidas en sus juntas metal - semiconductor (contactos) y semiconductor - semiconductor, estas pérdidas se representan como una resistencia R_s y R_p respectivamente, como se puede ver en la *Figura 53*. Este tipo de pérdidas se reflejan en el comportamiento de la celda como una reducción en su factor de forma (FF).

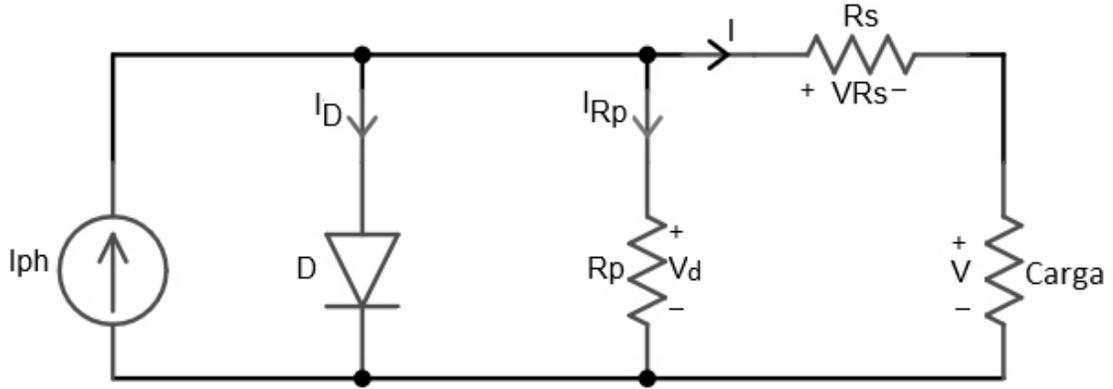


Figura 53. Circuito equivalente del modelo un diodo con resistencias R_p y R_s .

Realizando un análisis del circuito, se llega a la ecuación (19)

$$I = I_{ph} + I_o \left[\exp\left(\frac{V - IR_s}{nKT}\right) - 1 \right] + \frac{V - IR_s}{R_p} \quad (19)$$

El principal factor que representa la resistencia R_s es la juntura entre el metal – semiconductor.

4.2.3 Modelo de Dos Diodos con Resistencias R_p y R_s

Este modelo tiene como base el circuito antes presentado, pero se adiciona un diodo más para una mayor exactitud al momento de trabajar con valores bajos de radiación, el circuito se presenta en la *Figura 54*.

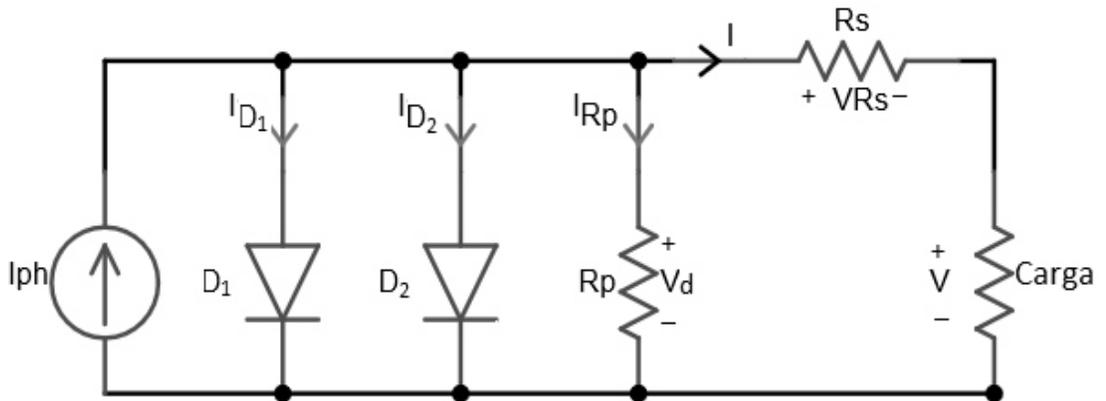


Figura 54. Circuito equivalente del modelo dos diodos con resistencias R_p y R_s

Al realizar el análisis del circuito se obtiene la ecuación (20).

$$I = I_{ph} + I_{O1} \left[\exp\left(\frac{V - IR_s}{n_1KT}\right) - 1 \right] + I_{O2} \left[\exp\left(\frac{V - IR_s}{n_2KT}\right) - 1 \right] \frac{V - IR_s}{R_p} \quad (20)$$

4.3 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE LA CELDA FOTOVOLTAICA REAL, USANDO EL MODELO DE UN DIODO CON RESISTENCIA R_p Y R_s

Haciendo énfasis en la explicación dada anteriormente en el numeral 4.2 se pueden ver diferentes modelos de circuitos equivalentes capaces de representar el comportamiento real de una celda fotovoltaica. En los presentes resultados se mostrara el desarrollo de una metodología de solución capaz de entregar un valor aproximado para las variables involucradas en el modelo matemático del dispositivo.

Se partió del modelo de un diodo con resistencia R_p y R_s el cual se muestra en la *Figura 55* y donde la carga se reemplaza por una fuente de tensión

entregándole entonces energía a la celda (en el análisis la eficiencia de la celda realmente se presenta éste fenómeno).

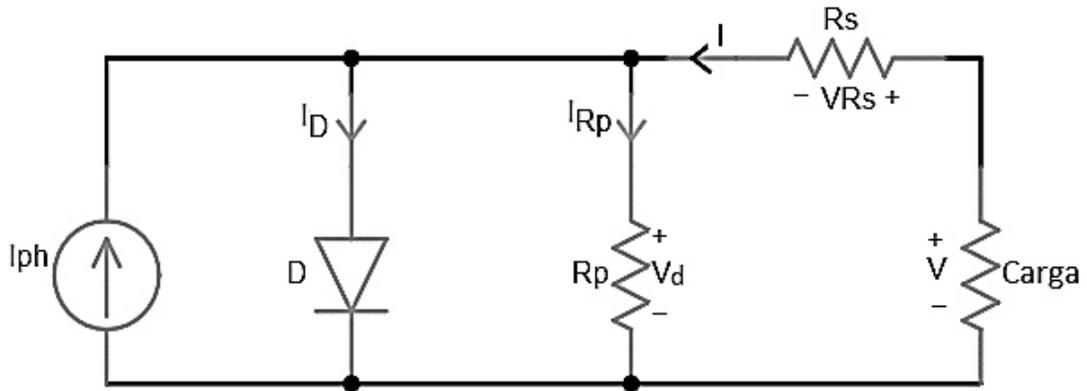


Figura 55. Circuito equivalente modelo un diodo con R_p y R_s con fuente de tensión como carga.

El conjunto de ecuaciones que responden al modelo circuital se presentan a continuación:

Aplicando la ley de tensiones de Kirchhoff o Segunda ley de Kirchhoff se tiene:

$$\sum V = 0 = -V_d + V - V_{R_s} \quad \text{con} \quad V_{R_s} = I * R_s$$

$$V_d = V - (I * R_s) \quad (21)$$

Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff o Primera ley de Kirchhoff se tiene:

$$\sum I = 0 = -I + I_d + I_{R_p} - I_{ph} \quad (22)$$

$$\text{Con } I_{Rp} = \frac{V_d}{R_p} \quad e \quad I_d = I_o * \left[\exp\left(\frac{q * (V_d)}{n * K * T}\right) - 1 \right] \quad (23)$$

Reemplazando la ecuación (21) y el grupo de ecuaciones (23) en la ecuación (22) se tiene la ecuación (24) la cual representa el comportamiento de la celda fotovoltaica.

$$I = I_o * \left[\exp\left(\frac{q * (V - (I * R_s))}{n * K * T}\right) - 1 \right] + \left(\frac{V - (I * R_s)}{R_p}\right) - I_{ph} \quad (24)$$

Donde :

K : Constante de Boltzman ($1.3807e - 23 \frac{J}{K}$)

q : Carga del electrón ($1.602e - 19 C$)

T : Temperatura (300 K).

De la ecuación (24) se puede ver que se tienen 6 variables involucradas, donde V (Voltaje de la fuente) e I (Corriente generado por la celda) son parámetros conocidos.

Sin embargo las variables R_s, R_p, I_{ph}, I_o, n son variables indeterminadas, dependientes de la naturaleza del material y la construcción de la celda a evaluar.

Para llevar a cabo el algoritmo de solución se debe de tener un punto de partida, por lo cual se presenta a continuación una breve descripción de las variables involucradas en el proceso y los parámetros de elección:

- **Corriente fotogenerada (I_{ph}):** De la ecuación de una celda ideal se obtiene la expresión (18), cuando $V=0$ e $I=I_{sc}$, es bien sabido que esto no es cierto para consideraciones reales, sin embargo se supone que el resultado no es tan alejado, por lo tanto el punto de

partida para la corriente fotogenerada I_{ph} es igual a la corriente de cortocircuito I_{sc} .

- **Factor de idealidad (n):** Este parámetros toma en cuenta el tipo de recombinación que ocurre en la unión semiconductor – semiconductor, la cual idealmente se toma por parte de los portadores minoritarios el cual es representada por $n=1$, Por lo tanto se tomara como valor inicial $n=1$.
- **Corriente de saturación inversa (I_o):** Para el valor inicial de corriente de saturación I_o se tendrá el grupo de ecuaciones (25) evaluada para los valores propios de cada celda de estudio. Éste parámetro depende principalmente de la temperatura y el potencial de la unión semiconductor – semiconductor (unión P-N) [16].

$$I_{on} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}q}{nkT_n}\right) - 1}$$

$$I_o = I_{on} \left(\frac{T}{T_{on}}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{qE_g}{Kn}\right)\left(\frac{1}{T_{on}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (25)$$

Donde:

T : Temperatura de evaluación (308K)

T_{on} : Temperatura estándar (298 K)

E_g : Brecha de energía (1.5 eV)

n : Factor de idealidad (1)

K : Constante de Boltzman ($1.3807e - 23 \frac{J}{K}$)

q : Carga del electrón ($1.602e - 19 C$)

- **Resistencia Serie (R_s):** Ésta resistencia representa las perdidas por la unión del metal – semiconductor, al cambiar dicho parámetro se ve afectado el factor de llenado (FF) de la celda, y la corriente

de Corto circuito al tener valores de resistencia muy altos. Lo ideal es que éste parámetro tienda a cero $\xrightarrow{R_s} 0$ ya que entre más pequeño sea el valor, mayor será el factor de llenado.

Aunque el V_{oc} no se ve afectado por este parámetro, cerca del V_{oc} si se tiene una influencia de la Resistencia Serie, por lo tanto el punto de partida para R_s será el inverso de la pendiente (m) de la curva en el punto cercano al circuito abierto V_{oc}

$$R_s = \frac{1}{m|_{V_{oc}}}$$

- **Resistencia Paralelo o Shunt (R_p):** Esta resistencia representa las pérdidas por la juntura entre los semiconductores tipo P y tipo n, el valor de este parámetro afecta el comportamiento del voltaje de la celda y reduce la cantidad de corriente que fluye a través de la celda. A mayor valor de resistencia paralelo mejor será la forma de la curva obteniendo por lo tanto más corriente. Por lo cual, éste parámetro debe tender a infinito $\xrightarrow{R_p} \infty$. El punto de partida de R_p será el inverso de la pendiente de la curva cerca del punto de Corriente de corto circuito I_{sc} .

$$R_p = \frac{1}{m|_{I_{sc}}}$$

Para encontrar la solución de la ecuación se debe de utilizar un método numérico que por medio de condiciones propias de su algoritmo permita realizar diferentes iteraciones hasta cumplir con las condiciones deseadas.

4.3.1 Métodos Numéricos

En ocasiones se hace uso del Análisis numérico o los métodos numéricos para solucionar ecuaciones que debido a la complejidad del problema por simples métodos de análisis se hace imposible obtener una respuesta, por lo cual se hace uso de algoritmos matemáticos que consisten en una serie de instrucciones lógicas que por medio de operaciones algebraicas tiene la capacidad de realimentar el algoritmo en cada iteración entregando finalmente una solución.

Debido a la complejidad del problema la solución que se encuentra con la ayuda del algoritmo no tiene una precisión completa, sin embargo puede entregar soluciones entre un intervalo que permita conocer el comportamiento del fenómeno que se está tratando.

4.3.1.1 Gradiente Descendente

Para éste caso se usó el método de programación no lineal “Gradiente Descendente”, partiendo de un problema en el cual la curva es diferenciable y convexa. Lo que se busca en el gradiente descendente es minimizar una función objetivo dirigiendo la solución del problema según las derivadas parciales de la función objetivo con respecto a cada una de las variables involucradas. Por lo cual el gradiente de la función permitirá conocer la magnitud y dirección del cambio. Se supone por lo tanto que un menor gradiente menor será el cambio de la variable y más cerca se está de la solución. Por lo tanto se construye una sucesión de puntos que convergen al mínimo de la función objetivo, comenzando la serie de iteraciones en un punto preferiblemente cercano al mínimo que se desea encontrar y se desplaza α veces por el gradiente de la función objetivo

Función Objetivo: La función objetivo que se desea minimizar es el error cuadrático medio entre la relación de los valores experimentales de corriente

para cada nivel de tensión con los valores de corriente considerando los parámetros para cada iteración. La función objetivo se muestra en la ecuación (26).

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \sum (I - I_n)^2 \quad (26)$$

Donde

I : Valor experimental (son valores constantes conocidos)

I_n : Valor calculado para cada iteración (variable)

La función objetivo se convierte en una sumatoria debido a que se tienen diferentes puntos de una curva.

En la *Figura 56* se presenta la estructura secuencial del algoritmo desarrollado, en donde se puede ver que la instrucción que determina el paro del método es cuando cada una de las derivadas parciales de la función objetivo con respecto a las variables de la ecuación son menores a la tolerancia deseada, dado el caso de que ocurra lo contrario, se realiza una repetición, que tendrá como valor inicial los parámetros evaluados al principio menos la multiplicación de la derivada parcial de la función por un paso definido para cada variable según su comportamiento, éste ciclo se realizará el número de veces que sea necesario hasta que la condición de solución se cumpla.

En la ecuación (27) se puede ver el cálculo de nuevos parámetros para cada iteración:

$$p_{t+1} = p_t - \nabla f(p_t) * \lambda_v \quad (27)$$

Donde:

p_{t+1} : Variable o parámetro nuevo

p_t : Variable o parámetro actual
 $\nabla f(p_t)$: Gradiente de la variable, evaluado con los parámetros actuales
 λ_v : Paso definido según el comportamiento de cada variable

El paso λ_v es el factor que permitirá a la variable desplazarse dentro de un rango, por lo cual escoger de la mejor forma éste parámetro evitara errores en la solución ya que valores demasiado grandes harán que el algoritmo nunca converja y valores demasiado pequeños se verán reflejados en un mayor número de iteraciones. En este caso para cada parámetro el paso se eligió según el intervalo de acción de cada variable, por ejemplo: para la corriente de saturación inversa (I_o) según estudios realizados en celdas fotovoltaicas se pueden tener valores entre $[1 \times 10^{-13}, 1 \times 10^{-7}] A$ por lo cual el alpha para ésta variable se fijó en 1×10^{-13}

La precisión de la solución obtenida depende del valor de la tolerancia definida, la cual en este caso se fijó en 0.001; tener una tolerancia muy pequeña permitirá tener un menor error relativo, sin embargo se verá reflejado en un mayor número de iteraciones con lo que posiblemente no se obtenga un resultado significativo. Los intervalos de acción para cada variable se pueden ver en la *Tabla 27*:

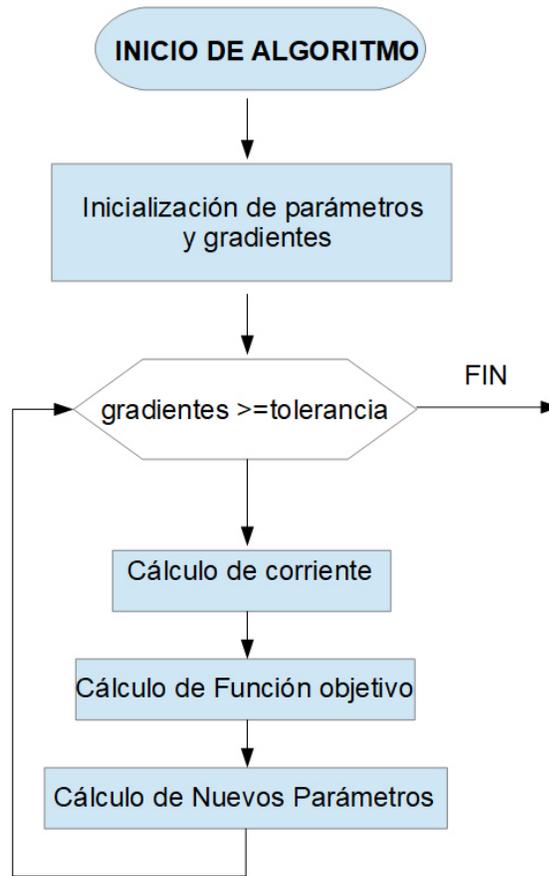


Figura 56. Diagrama de flujo de algoritmo de solución

Parámetro	Intervalo de
I_o	$[1 \times 10^{-13}, 1 \times 10^{-7}] A$
I_{ph}	$[1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-3}] A$
R_s	$[0, 50] \Omega$
R_p	$[0, 10000] \Omega$
n	$[1, 3]$

Tabla 27. Intervalos de solución, Modelo matemático de una celda fotovoltaica.

Derivadas parciales: La característica principal del gradiente descendente es el uso de las derivadas parciales de la función objetivo con respecto a las variables involucradas en el fenómeno, por lo cual en el momento de encontrar los gradientes se debe tener en cuenta que la corriente experimental será una constante del problema.

A continuación se presentan las derivadas parciales de la función objetivo con respecto a las variables:

Derivada Parcial con respecto a R_s

$$\bullet \frac{dI}{dR_s} = \left(\frac{I_o I_{ph} q \exp\left(\frac{q(V-I R_s)}{n K T}\right)}{n K T} + \frac{I}{R_p} \right) * \left(I_{ph} - I_o \left(\exp\left(\frac{q(V-I R_s)}{n K T}\right) - 1 \right) - \frac{(V-I R_s)}{R_p} + I \right)$$

Derivada parcial con respecto a R_p

$$\bullet \frac{dI}{dR_p} = \frac{(V-I R_s) * \left(I_{ph} - I_o * \left(\exp\left(\frac{q(V-I R_s)}{n K T}\right) - 1 \right) - \left(\frac{(V-I R_s)}{R_p} \right) + I \right)}{R_p^2}$$

Derivada parcial con respecto a I_{ph}

$$\bullet \frac{dI}{dI_{ph}} = I_{ph} - I_o * \left(\exp\left(\frac{q(V-I R_s)}{n K T}\right) - 1 \right) - \frac{(V-I R_s)}{R_p} + I$$

Derivada parcial con respecto a I_o

$$\bullet \frac{dI}{dI_o} = 1 - \exp\left(\frac{q*(V-I*R_s)}{n*K*T}\right) * \left(I_{ph} - I_o * \left(\exp\left(\frac{q*(V-I*R_s)}{n*K*T}\right) - 1\right) - \frac{(V-I*R_s)}{R_p} + I\right)$$

Derivada parcial con respecto a n

$$\bullet \frac{dI}{dn} = I_o * q * (V - I * R_s) * \exp\left(\frac{q*(V-I*R_s)}{n*K*T}\right) * \left(I_{ph} - I_o * \left(\exp\left(\frac{q*(V-I*R_s)}{n*K*T}\right) - 1\right) - \frac{(V-I*R_s)}{R_p} + I\right)$$

4.3.2 Experimentos:

El objetivo principal de ésta sección es caracterizar las celdas utilizadas según los parámetros propios de la fabricación de las muestras, Por lo cual se evaluaron las muestras con los mejores resultados de eficiencias pertenecientes a los grupos antes evaluados:

Para la celda 2 del grupo 4 (1h_200nm) en el numeral 0 (página 61), la cual tuvo los mejores resultados de eficiencia, y se evaluó nuevamente en el grupo 6 en el numeral 3.4.7 (página 76) con diferentes configuraciones en los electrodos; se hizo uso del algoritmo diseñado para encontrar los parámetros que cumplen con el modelo matemático de la celda según los valores experimentales obtenidos en el laboratorio. También se tomó en cuenta la celda 1 del grupo 5, en el numeral 3.4.5 (página 68), la cual tiene el mejor factor de forma de las muestras evaluadas. Los electrodos tomados en consideración para cada caso se pueden ver en la *Tabla 28*.

Celda	Contacto	Especificación	Area (cm ²)
2, Grupo 4	1	Aluminio evaporado 100nm + Pintura de plata	0.30
	3	Plata evaporada 100nm + Pintura de plata	0.30
1, Grupo 5	1	Plata evaporada 100nm + Pintura de Plata	0.25
1, Grupo 6	2	Plata evaporada 60nm + Pintura de plata	0.16
	3	Plata evaporada 60nm + Pintura de plata	0.16
2, Grupo 6	1	Plata evaporada 60nm + Pintura de plata	0.25
	2	Plata evaporada 60nm + Pintura de plata	0.25

3, Grupo 6	1	Plata evaporada 60nm + Pintura de plata	0.25
	2	Plata evaporada 300nm + Pintura de plata	0.25

Tabla 28. Electrodo evaluado para la obtención de parámetros del modelo matemático de la celda fotovoltaica.

Los resultados obtenidos para cada caso se muestran a continuación:

Celda		Contacto	Area (cm ²)	Rs (Ω)	Rp (Ω)	Ip (mA)	Io (A)	n	Desviación
2, Grupo 4	Inicial	Aluminio	0.3	63.33	2041.41	4.320	5.74E-11	2.00	2.24E-03
	Solución	Aluminio	0.3	80.92	2041.17	5.642	5.76E-07	1.93	2.06E-05
	Inicial	Plata	0.3	66.20	99.55	6.020	3.64E-11	2.00	1.21E-03
	Solución	Plata	0.3	54.41	40.45	14.675	2.94E-07	1.98	1.76E-05

Tabla 29. Resultados para la celda 2 del grupo 4 con contactos de diferente material

En los resultados obtenidos para ésta celda se puede ver que resistencia paralelo tiende a ser mayor que la resistencia serie, lo cual afirma lo que se muestra en la bibliografía. Se puede ver que la resistencia serie es mayor para el aluminio, lo cual es razonable, teniendo en cuenta que el aluminio tiene una menor conductividad que la plata.

En la

Figura 57 y Figura 58 se puede ver la comparación entre los datos experimentales y la solución obtenida por el algoritmo diseñado para los contactos 1 y 2 de la celda 2 (grupo de celdas 4), en el lado izquierdo de las gráficas se tiene una vista completa de la sucesión de puntos de los datos experimentales representado por la curva azul y curva de color magenta es la sucesión de puntos para la evaluación de los resultados obtenidos por el algoritmo diseñado, en la gráfica derecha se obtiene el acercamiento de la gráfica para la zona de conducción de la celda fotovoltaica. Además se muestra la

ecuación de la celda fotovoltaica con los parámetros encontrados por medio del método numérico.

La curva de inicialización es la muestra de los primeros parámetros con los que el algoritmo comenzó el cálculo de evaluación.

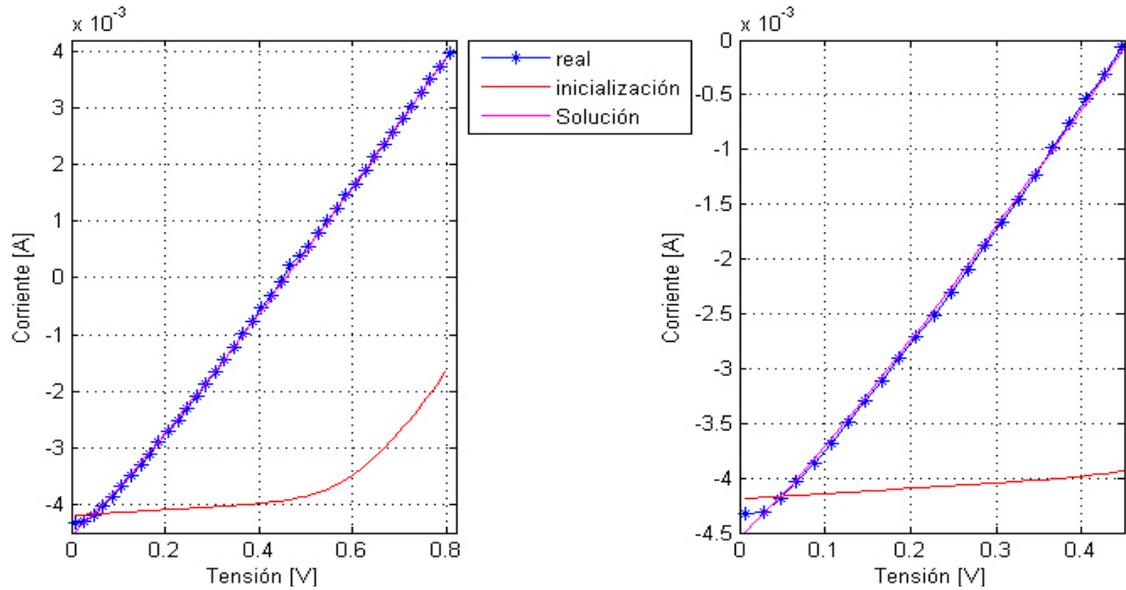


Figura 57. Comparación de soluciones, Celda 2, Grupo 4, cto 1, Aluminio evaporado 100nm + pintura plata. (pág 61).

$$I = 5.76E - 07 * \left[\exp\left(\frac{q * (V - (I * 80.92))}{1.93 * K * T}\right) - 1 \right] + \left(\frac{V - (I * 80.92)}{2041.17}\right) - 5.642E$$

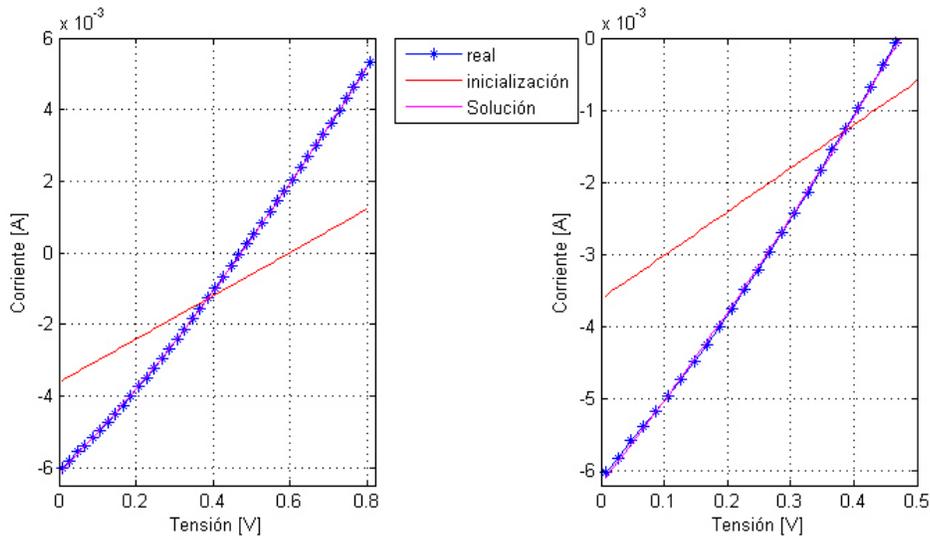


Figura 58. Comparación de soluciones, Celda 2, Grupo 4, cto 3 Plata evaporada 100nm + pintura plata (pág 61).

$$I = 2.94E - 07 * \left[\exp\left(\frac{q*(V-(I*54.41))}{1.98*K*T}\right) - 1 \right] + \left(\frac{V-(I*54.41)}{40.45}\right) - 14.675E-03$$

- Resultados para la celda 1 del grupo 5

En la *Tabla 30* se pueden ver los parámetros obtenidos por el algoritmo diseñado para la celda 1 del grupo 5.

Celda		Contacto	Area (cm^2)	Rs (Ω)	Rp (Ω)	Ip (mA)	Io (A)	n	Desviación
Celda 1	Inicial	1	0.25	273.65	1040.07	0.694	4.31E-12	2.00	3.82E-04
	Solución	1	0.25	75.33	836.42	0.773	2.71E-08	2.08	1.20E-05

Tabla 30. Resultados para la celda 1 del grupo 5.

La *Figura 59* muestra las curvas de inicialización de parámetros junto con la curva experimental y la curva de los parámetros obtenidos por el algoritmo diseñado

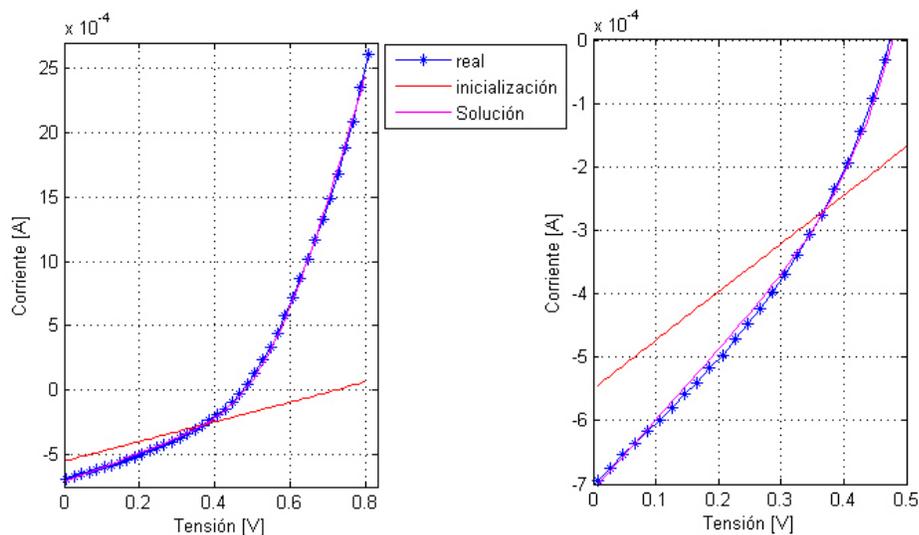


Figura 59. Comparación de soluciones, Celda 1, Grupo 5, cto 1 plata evaporada 100nm + pintura plata (pág 68).

$$I = 2.71E - 08 * \left[\exp\left(\frac{q * (V - (I * 75.33))}{2.08 * K * T}\right) - 1 \right] + \left(\frac{V - (I * 75.33)}{836.42}\right) - 0.773E - 03$$

- Resultados para la celda 1 del grupo 5

En la *Tabla 30* se pueden ver los parámetros obtenidos por el algoritmo diseñado para las celdas 1, 3 y 3 del grupo 6, las cuales tienen las mismas condiciones de preparación.

Celda		Contacto	Area (cm^2)	Rs (Ω)	Rp (Ω)	Ip (mA)	Io (A)	n	Desviación
1	Inicial	1	0.16	191.73	246.18	1.934	1.29E-10	2.00	5.03E-04
	Solución	1	0.16	84.88	131.71	3.265	5.04E-08	2.07	6.66E-06
	Inicial	2	0.16	192.48	253.25	0.002	1.29E-10	2.00	6.22E-04
	Solución	2	0.16	90.328	142.62	0.003	1.88E-07	2.03	1.96E-05
2	Inicial	1	0.25	135.20	220.89	2.243	3.12E-10	2.00	1.79E-03
	Solución	1	0.25	26.85	195.67	2.507	4.50E-07	2.02	4.11E-05
	Inicial	2	0.25	160.83	221.82	2.260	3.09E-10	2.00	6.01E-04

	Solución	2	0.25	93.01	92.52	4.627	1.23E-07	2.01	8.96E-06
3	Inicial	1	0.25	115.77	160.94	1.101	1.75E-06	2.00	1.37E-03
	Solución	1	0.25	40.16	70.41	2.143	7.96E-07	1.92	3.99E-05
	Inicial	2	0.25	161.69	247.63	1.530	1.03E-08	2.00	7.09E-04
	Solución	2	0.25	72.93	107.69	2.766	1.76E-07	2.00	1.53E-05

Tabla 31. Resultados para las celdas del grupo 6.

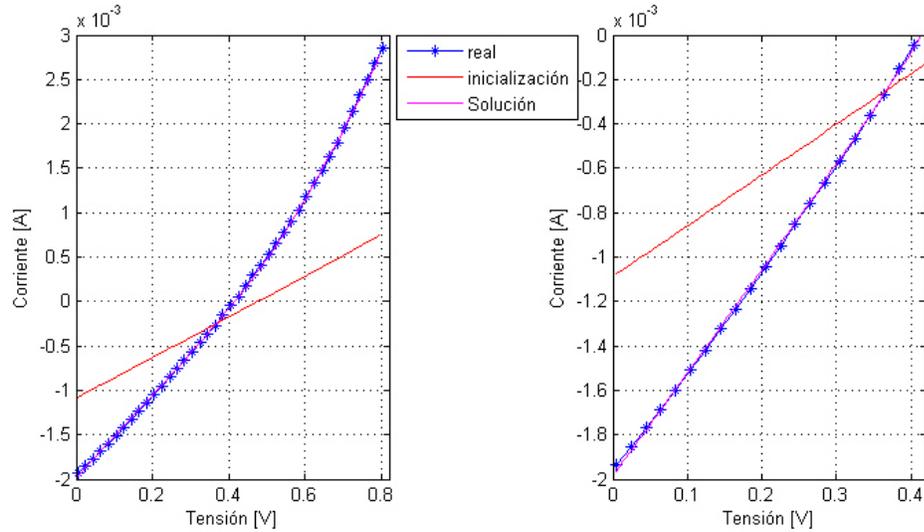


Figura 60. Comparación de soluciones, Celda 1, Grupo 6, cto 2 Plata evaporada 60nm + pintura plata (pág 76).

$$I = 5.04E - 08 * \left[\exp\left(\frac{q * (V - (I * 84.88))}{2.07 * K * T}\right) - 1 \right] + \left(\frac{V - (I * 84.88)}{131.71}\right) - 3.265E - 03$$

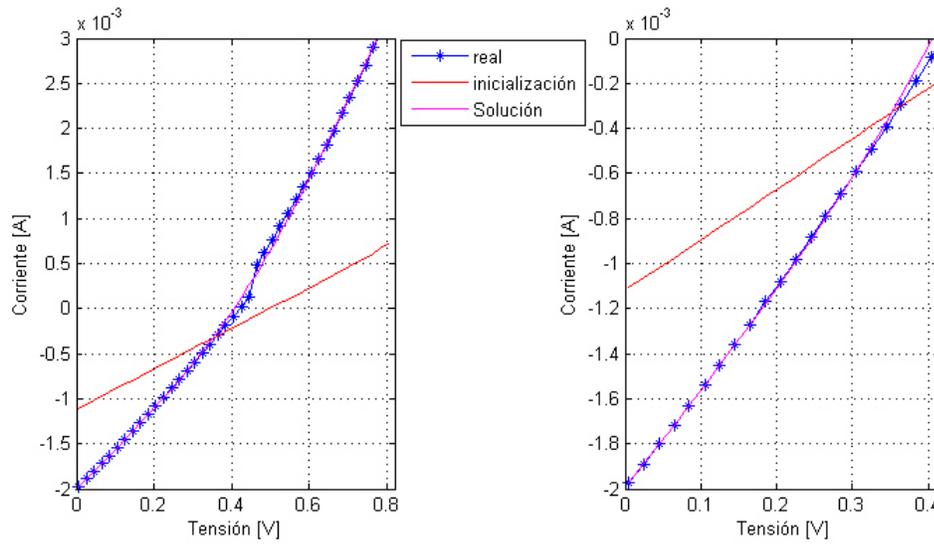


Figura 61. Comparación de soluciones, Celda 1, Grupo 6, cto 3 Plata evaporada 60nm + pintura plata (pág 76)

$$I = 1.88E - 07 * \left[\exp \left(\frac{q * (V - (I * 90.328))}{2.03 * K * T} \right) - 1 \right] + \left(\frac{V - (I * 90.328)}{142.62} \right) - 0.003E - 03$$

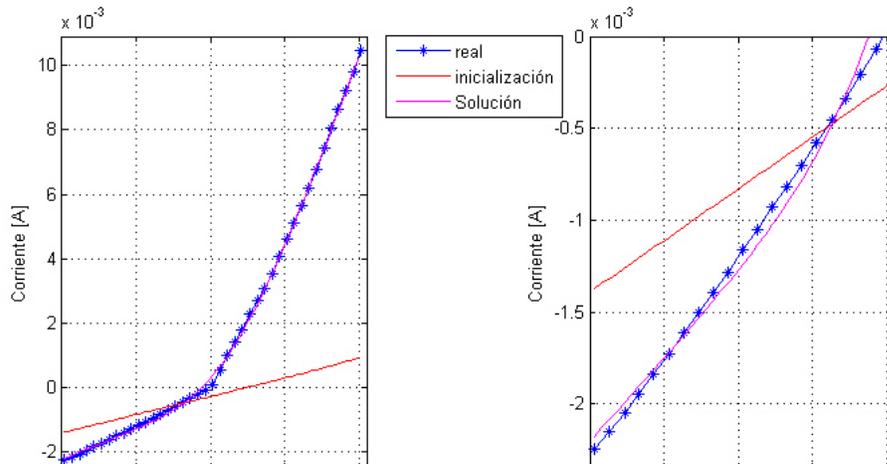


Figura 62. Comparación de soluciones, Celda 2, Grupo 6, cto 1 Plata evaporada 60nm + pintura plata (pág 76)

$$I = 4.50E - 07 * \left[\exp \left(\frac{q * (V - (I * 26.85))}{2.02 * K * T} \right) - 1 \right] + \left(\frac{V - (I * 26.85)}{195.67} \right) - 2.507E - 03$$

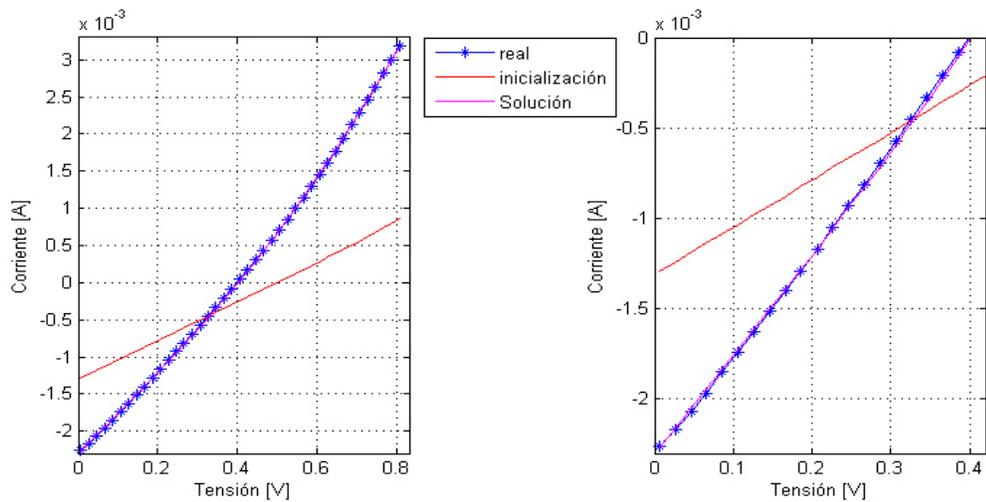


Figura 63. Comparación de soluciones, Celda 2, Grupo 6, cto 2 Plata evaporada 60nm + pintura plata (pág 76)

$$I = 1.23E - 07 * \left[\exp\left(\frac{q * (V - (I * 93.01))}{2.01 * K * T}\right) - 1 \right] + \left(\frac{V - (I * 93.01)}{92.52}\right) - 4.627E - 03$$

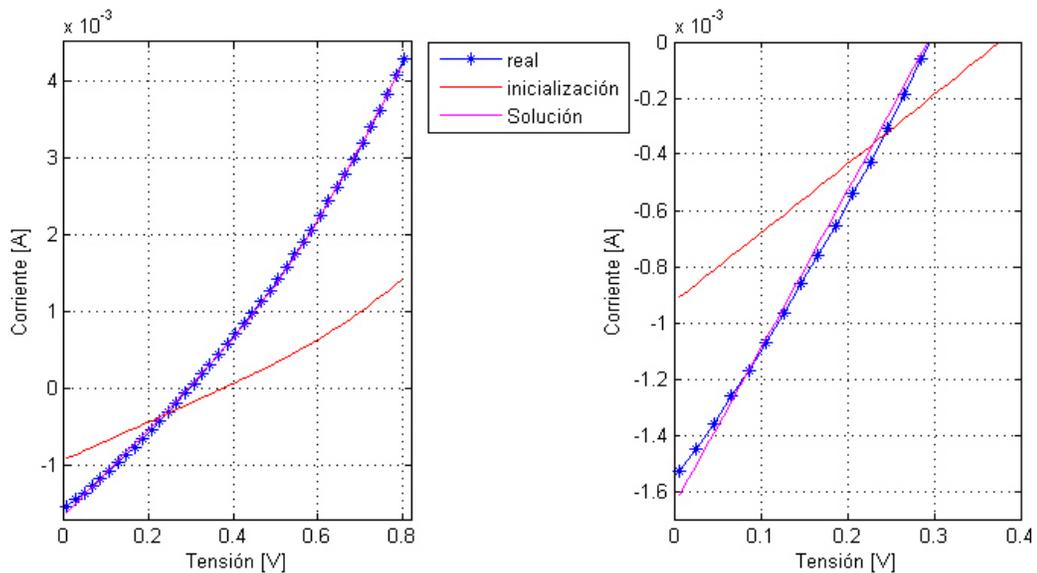


Figura 64. Comparación de soluciones, Celda 3, Grupo 6, cto 1 Plata evaporada 100nm + pintura plata (pág 76)

$$I = 7.96E - 07 * \left[\exp \left(\frac{q * (V - (I * 40.16))}{1.92 * K * T} \right) - 1 \right] + \left(\frac{V - (I * 40.16)}{70.41} \right) - 2.143E - 03$$

Se puede ver que el algoritmo consiguió encontrar buenos resultados para el problema tan complejo, sin embargo se podrían encontrar mejores mejorando aspectos como la implementación de un alfa adaptativo que cambiara según la variación que tuvieran las derivadas parciales de la función objetivo.

Se puede ver que los parámetros de inicialización están relativamente lejos del resultado final, sin embargo son lo suficientemente útiles como para que el algoritmo logre minimizar la función objetivo.

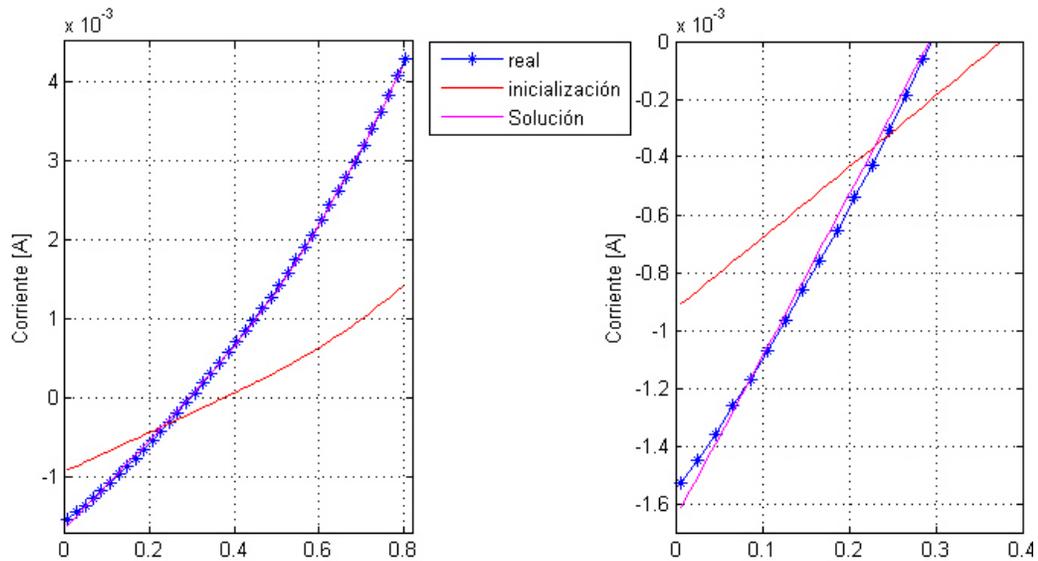


Figura 65. Comparación de soluciones, Celda 3, Grupo 6,cto 2 Plata evaporada 300nm + pintura plata (pág 76)

$$I = 1.76E - 07 * \left[\exp \left(\frac{q * (V - (I * 72.93))}{2.00 * K * T} \right) - 1 \right] + \left(\frac{V - (I * 72.93)}{107.69} \right) - 2.766E - 03$$

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Después de realizar la metodología diseñada se llegó a las siguientes conclusiones:

5.1 CONCLUSIONES DE EXPERIMENTACIÓN

Se pudo ver que al utilizar el tratamiento térmico en aire aplicado a la celda causo una disminución en la eficiencia, lo cual se debe principalmente a un aumento en el valor de las resistencias serie paralelo. Como se pudo ver en el estudio, material que tuvo un mejor rendimiento en el momento de ser utilizado en los electrodos fue la plata depositada por el método de evaporación térmica, sin embargo se pudo ver que aluminio también tuvo un buen desempeño, pero se descarta su uso debido a que el depósito de aluminio se complica debido a su baja densidad comparado con la plata, por lo cual se requiere mucho más volumen de material para conseguir una capa del mismo espesor; El uso de una capa de Óxido de Zinc sobre el sustrato TCO aumento la eficiencia eléctrica de la celda de manera considerable. Además se pudo ver que el utilizar tratamiento térmico con RTP se pudo evidenciar que el factor de forma de la celda aumento en un 2%, sin embargo se recomienda realizar más estudios al respecto para corroborar el beneficio del uso de éste tipo de tratamiento.

La celda con mejor rendimiento fue la que corresponde al grupo de celdas 4 con 1 hora de Sb_2S_3 y un sola capa de 200 nm de plata, sin embargo debido a que su factor de llenado está en el orden del 26% se deben de estudiar diferentes métodos que permitirán aumentarlo y mejorar la eficiencia

A menor distancia entre el electrodo positivo y negativo menos repercusión se tendrá en la eficiencia de la celda, sin embargo se recomienda realizar más estudios para corroborar dicha afirmación. Finalmente se concluyó que el electrodo positivo utilizado para la colección de energía de la celda fotovoltaica de estructura $CdS/Ag(SbSe)_2$ según las condiciones evaluadas en este proyecto debe de ser de plata depositada por medio de evaporación térmica, con un espesor de 60 nm, se le atribuye un mejor rendimiento a la plata depositada por medio de evaporación térmica, debido a la mejor adhesión al material y la homogeneidad de depósito con respecto a la pintura de plata.

5.2 CONCLUSIONES DE SOLUCIÓN DE ECUACIÓN DE LA CELDA FOTOVOLTAICA

Se pudo ver que a pesar de evaluar los mismos parámetros de elaboración de la celda fotovoltaica cada muestra tiene parámetros propios de construcción diferente, de la misma forma para la evaluación de contactos de una misma celda se obtuvieron diferentes valores de parámetros cuando debieron ser aproximadamente iguales, esto se debe a que el depósito de las capas delgadas sobre el sustrato pudo no ser homogéneo. Sin embargo debido a que el orden de los parámetros es el mismo se puede considerar como valores aceptables.

Se recomienda utilizar un alfa adaptativo como mejora para el algoritmo de solución utilizado, ya que al iniciar la solución de la ecuación se obtienen resultados relativamente rápido, sin embargo a medida de que se acerca al punto de solución las derivadas se comienzan a reducir rápidamente, lo que causa un estancamiento en la solución del algoritmo. Se recomienda comenzar con los valores mostrados pero aumentarlos, a medida de que se obtengan resultados deseados.

Además se pudo ver que la debida inicialización del algoritmo permite reducir el tiempo de ejecución y obtener una mayor precisión en el resultado, sin embargo se puede utilizar un tipo de inicialización para todos los casos si en algún momento el algoritmo no encuentra la solución deseada. En ocasiones la inicialización puede estar tan lejana del punto de solución que no permite encontrar el mínimo deseado.

5.3 TRABAJOS FUTUROS

Elaboración de una estrategia de evaluación para la aplicación de la teoría de la unión semiconductor – metal en una celda fotovoltaica: Uno de los conceptos que no se pudieron aplicar en este proyecto fue el de afinidad electrónica para la celda fotovoltaica estudiada, por lo cual sería muy útil un estudio de la afinidad electrónica como caracterización del material y una comparación entre posibles metales y aleaciones para los electrodos conociendo la función de trabajo de los materiales involucrados.

Caracterización de una celda fotovoltaica partiendo de la solución de su modelo matemático: Además de utilizar el método de gradiente descendente como solución de la ecuación de la celda se propone la comparación de métodos como el algoritmo genético y la implementación de un gradiente descendente con un inicialización de parámetros por medio de métodos como Newton Raphson y el concepto de mutación para conocer el efecto de la tendencia de mejora de la población. Además de realizar métodos estadísticos para catalogar las posibles combinaciones en los parámetros de elaboración de las celdas fotovoltaicas, lo cual ayudaría a tener un avance un poco más certero.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. a. A.-H. D. Soliman H. y E. Ibrahim, «Optical properties of thermally vacuum evaporated AgSbSe₂ thin films,» *Journal of Applied Sciences Research*, 2009.
- [2] K. Bindu, J. Campos, M. T. S. Nair, A. Sánchez y P. K. Nair, «Semiconducting AgSbSe₂ thin film and its application in a photovoltaic structure,» *Semiconductor Science and Technology*, vol. 20, p. 496, 2005.
- [3] J. Garza, S. Shaji, A. Rodriguez, T. Das Roy y B. Krishnan, «AgSbSe₂ and AgSb(S,Se)₂ thin films for photovoltaic applications,» *Applied Surface Science*, vol. 257, pp. 10834-10838, #oct# 2011.
- [4] Notimex, «MÉXICO, NÚMERO UNO DESDE 2010 EN PRODUCCIÓN DE PLATA,» 2017.
- [5] E. P. I. Association, «Unlocking the Sunbelt potential of photovoltaics. Bélgica: [s. e.], 2010,» vol. Second Edition, 2010.
- [6] S. d. E. (SENER), «Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN),» 2016.
- [7] M. a. C. G. a. A. M. L. a. G. M. A. a. C. A. D. Tufino, «Hetero union solar cells of CdS/Cd Te Part 2 Processed solar cells by the

cathodic erosion planar-magnetron and GREG techniques.,» *Revista Mexicana de Fisica.*, 1999.

- [8] X. Fang, T. Ma, G. Guan, M. Akiyama, T. Kida y E. Abe, «Effect of the thickness of the Pt film coated on a counter electrode on the performance of a dye-sensitized solar cell,» *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 570, pp. 257-263, 2004.
- [9] A. Hauch y A. Georg, «Diffusion in the electrolyte and charge-transfer reaction at the platinum electrode in dye-sensitized solar cells,» *Electrochimica Acta*, vol. 46, pp. 3457-3466, 2001.
- [10] T. a. A. M. a. A. E. Ma y I. Imai, «High-Efficiency Dye-Sensitized Solar Cell Based on a Nitrogen-Doped Nanostructured Titania Electrode,» 2005.
- [11] Z.-S. W. a. X. P.-H. a. a. H.-M. C. B.-W. Z. and Chun Hui Huang and † Yan-Yi Huang and Yuan-Jun Hou, «A Highly Efficient Solar Cell Made from a Dye-Modified ZnO-Covered TiO Nanoporous Electrode,» 2001.
- [12] J. González, S. Shaji, D. Avellaneda, G. Castillo, T. Roy y B. Krishnan, «Photovoltaic structures using AgSb(SSe) thin films as absorber.,» *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol. 116, pp. 2095-2105, 2014.
- [13] G. D. Boreman, *Fundamentos de electro - optica para ingenieros*, 1999.

- [14] M. B. D. P. D. M.F. Avril, Sol y Piel Beneficios Riesgos y Prevención, Masson, 2004.
- [15] J. G. Velasco, Energías Renovables, Reverté, 2009.
- [16] M. Lamaison, Apuntes: Energía solar fotovoltaica, 2004.
- [17] C. M. S. -. F. M. H. L. C. S. C. Y. C. Y. Z. M. Z. H. -. P. W. C. -. C. C. A. J. Weise Hsu, «Electron - Selective TiO₂ Contact for Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells,» *Scientific Reports*, 2015.
- [18] A. R. Jordehi, «Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 354-371, 2016.
- [19] M. P. Barrera, «Simulacion y caracterizacion de celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales,» 2009.
- [20] S. Zhao, X. Pi, C. Mercier, Z. Yuan, B. Sun y D. Yang, «Silicon-nanocrystal-incorporated ternary hybrid solar cells,» *Nano Energy*, vol. 26, pp. 305-312, 2016.
- [21] S. Yoshimori y M. Kawamura, «Electrical properties of superconducting micro-contact junction made of Y-Ba-Cu-O thin

film,» *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 10, pp. 759-763, 1989.

- [22] Y. Wu, S. Yuan, X. Yu, X. Qiu, H. Zhu, J. Qian y D. Yang, «Impact of carbon co-doping on the performance of crystalline silicon solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 154, pp. 94-98, 2016.
- [23] L. Wang, O. Kisi, M. Zounemat-Kermani, G. A. Salazar, Z. Zhu y W. Gong, «Solar radiation prediction using different techniques: model evaluation and comparison,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 384-397, 2016.
- [24] L. P. a. C. J. C. Viñas, Dispositivos electronicos y fotonicos. Fundamentos..
- [25] C. B. L. Srivastava, «Morphological evidence for electrical synapse of `gap` junction type in another vertebrate receptor,» *Experientia*, vol. 28, pp. 1029-1030, 1972.
- [26] V. Quaschnig y R. Hanitsch, «Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells,» *Solar Energy*, vol. 56, pp. 513-520, 1996.
- [27] C. a. G.-G. P. a. M. M. A. a. M. I. Power, «estudio de la variacion de la brecha de energia en funcion de altas temperaturas (300-750) k de los semiconductores CuInVI2 (S, Se, Te),» *Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2011*, 2011.

- [28] V. V. Obreja, «On the irradiation lattice damage effect upon the electrical characteristics of a semiconductor p-n junction,» *Acta Physica Hungarica*, vol. 74, pp. 31-35, 1994.
- [29] A. Ndiaye, C. M. F. Kébé, P. A. Ndiaye, A. Charki, A. Kobi y V. Sambou, «A Novel Method for Investigating Photovoltaic Module Degradation,» *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 1222-1231, 2013.
- [30] H. Maammeur, A. Hamidat y L. Loukarfi, «A numerical Resolution of The Current-voltage Equation for a Real Photovoltaic Cell,» *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 1212-1221, 2013.
- [31] H. Maammeur, A. Hamidat y L. Loukarfi, «A numerical Resolution of The Current-voltage Equation for a Real Photovoltaic Cell,» *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 1212-1221, 2013.
- [32] T. Ma, X. Fang, M. Akiyama, K. Inoue, H. Noma y E. Abe, «Properties of several types of novel counter electrodes for dye-sensitized solar cells,» *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 574, pp. 77-83, 2004.
- [33] N. B. Kotadiya, A. J. Kothari, D. Tiwari y T. K. Chaudhuri, «Photoconducting nanocrystalline lead sulphide thin films obtained by chemical bath deposition,» *Applied Physics A*, vol. 108, pp. 819-824, 2012.
- [34] J. Eisenlohr, N. Tucher, H. Hauser, M. Graf, J. Benick, B. Bläsi, J. C. Goldschmidt y M. Hermle, «Efficiency increase of crystalline

silicon solar cells with nanoimprinted rear side gratings for enhanced light trapping,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 155, pp. 288-293, 2016.

- [35] C. A. de Melo, G. de Martino Jannuzzi y S. V. Bajay, «Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 222-234, 2016.
- [36] M. Dahlinger, K. Carstens, E. Hoffmann, R. Zapf-Gottwick y J. H. Werner, «23.2% laser processed back contact solar cell: fabrication, characterization and modeling,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, pp. n/a--n/a, 2016.
- [37] D. T. Cofas, P. A. Cofas y S. Kaplanis, «Methods and techniques to determine the dynamic parameters of solar cells: Review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 213-221, 2016.
- [38] R. Chenni, M. Makhlouf, T. Kerbache y A. Bouzid, «A detailed modeling method for photovoltaic cells,» *Energy*, vol. 32, pp. 1724-1730, 2007.
- [39] M. Cavas, R. K. Gupta, A. A. Al-Ghamdi, O. A. Al-Hartomy, F. El-Tantawy y F. Yakuphanoglu, «Fabrication and electrical characterization of transparent NiO/ZnO p--n junction by the sol--gel spin coating method,» *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 64, pp. 219-223, 2012.

- [40] H. Bellia, R. Youcef y M. Fatima, «A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB\»,» *{NRIAG} Journal of Astronomy and Geophysics*, vol. 3, pp. 53-61, 2014.
- [41] Callister, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*.
- [42] S. a. J. K. K. a. S. A. Sharma, «Solar Cells: In Research and Applications - A Review,» *Materials Sciences and Applications*, 2015.
- [43] Y. Chu, «Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies,» *Research Associate, Global Energy Network Institute (GENI)*, 2011.