



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

PROGRAMA DE ENERGÍA

**Diseño de un módulo fotovoltaico para su
posible aplicación en un centro de carga**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN:

**INGENIERÍA EN
SISTEMAS ENERGÉTICOS**

P R E S E N T A :

Aarón Soto Jacinto

Israel Montes Díaz

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo, UACM

CODIRECTOR

Dr. Rogelio Mendoza Pérez, UACM

Ciudad de México, mayo, 2024

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS ©

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

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

Integración del jurado:

Presidente: Dr. Carlos Chávez Baeza, PEUACM

Secretario: Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo, UACM

Vocal: Dr. Rogelio Mendoza Pérez, UACM

1er. Suplente: Dra. Ma. Claudia Roldán Ahumada, PEUACM

2do. Suplente: Dr. Edgar Vicente Torres González, PEUACM

Lugar donde se realizó la carrera:

PLANTEL SAN LORENZO TEZONCO, UACM.

DIRECTOR(A) DE TESIS:

Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo

Universidad Autónoma de la Ciudad de México

Agradecimientos

Aarón

Quiero agradecer a mi director Dr. Alfredo Del Oso Acevedo y codirector de tesis Dr. Rogelio Mendoza Pérez por sus invaluable aportaciones académicas, por su loable experiencia y consejos. Porque a pesar de las horas de trabajo agotadoras, siempre tuvieron una actitud amable e inspiradora, acompañándome en todo el proceso de capacitación e investigación.

A mis padres Margarita Jacinto Cruz y José Basilio Soto Peralta que han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro como una meta más conquistada.

A mis hermanas Brenda, Litzy y Alisson Soto Jacinto por apoyarme en cada momento que las necesite, en mis noches y días de insomnio y que requería de su apoyo para resolver problemas durante mi estancia en la universidad. A mi novia Andrea Ivone Sánchez Martínez por demostrarme siempre su apoyo incondicional durante todos estos años juntos y que a pesar de las adversidades siempre pudimos resolver cada uno de los obstáculos que se nos presentaron.

A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) y al Laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentables (LACyTES) por el apoyo y uso de sus instalaciones que fueron parte de mi formación académica y profesional, por el uso de cada equipo para la realización de este trabajo recepcional de tesis.

A mis compañeros de laboratorio en especial al Maestro Jesús Adán Fierro López, al Maestro Antony Francisco López Sánchez y al Ingeniero Jesús Adrián Núñez Membrillo por todo su apoyo y atención que siempre mostraron en la solución y aportación de ideas para este trabajo, y un especial agradecimiento al otorgamiento de un 70% de lo correspondiente a 10 meses de beca para la elaboración de trabajo recepcional o tesis, apoyo de suma importancia para sacar adelante este trabajo.

Agradecemos al Colegio de Ciencia y Tecnología, por su apoyo en el trabajo titulado: "Celdas híbridas de CdTe/polyethylenimine ethoxylated (PEIE)" Cuyo código asignado es: UACM-CCYT-CON-04 y al proyecto de investigación UACM CCYT-2023-IMP-01.

Israel

A mis padres, Marcelino Montes Juárez, por enseñarme a través del ejemplo la importancia de la responsabilidad, la constancia y valores en los seres humanos como la igualdad y el respeto, herramientas que dieron guía y dirección en esta etapa, a Beatriz Silvia Díaz Tovar por su apoyo, comprensión y amor mostrado a lo largo de mi vida y sobre todo en los momentos adversos durante la licenciatura.

A mi hermana la Mtra. Beatris Adriana Montes Diaz, por mostrarme la importancia de la perseverancia y recalcarme día con día que el elevador social por excelencia es la educación.

Al Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo y codirector de tesis Dr. Rogelio Mendoza Pérez, por haberme acompañado en este proceso y el haber brindado la oportunidad de trabajar bajo su tutela en el LACyTES y conocer su enorme calidad en lo humano y lo profesional, cualidades que me hacen sentir sumamente orgulloso de ser parte de la comunidad de la UACM.

A el Mtro. Jesús Adán Fierro López, Mtro. Antony Francisco López Sánchez y al Ing. Jesús Adrián Núñez Membrillo, por compartir, experiencia y apoyo durante el proceso de aprendizaje y ejecución del presenta trabajo.

A los compañeros que realizan trabajos de tesis y servicio social en LACyTES, por su amistad y colaboración.

A la UACM, por brindarme la oportunidad de pertenecer y formarme dentro de sus aulas, a todos los profesores que me compartieron su tiempo, consejos y conocimiento y un especial agradecimiento al otorgamiento de un 70% de lo correspondiente a 10 meses de beca para la elaboración de trabajo recepcional o tesis, apoyo de suma importancia para sacar adelante este trabajo.

Agradecemos al Colegio de Ciencia y Tecnología, por su apoyo en el trabajo titulado: "Celdas híbridas de CdTe/polyethylenimine ethoxylated (PEIE)" Cuyo código asignado es: UACM-CCYT-CON-04 y al proyecto de investigación UACM CCYT-2023-IMP-01.

Índice

Resumen	1
Introducción.....	2
Capítulo 1. Marco contextual	8
1.1. Antecedentes	8
1.2. Planteamiento del problema.....	12
1.3. Hipótesis	13
1.4. Objetivos.....	13
1.4.1. Objetivo general	13
1.4.2. Objetivos específicos.....	13
Capítulo 2. Marco teórico.....	13
2.1. Energía solar FV	13
2.2. Módulo fotovoltaico de telurio de cadmio (CdTe)	14
2.3. Efecto fotovoltaico.....	14
2.4. Unión P-N	14
2.5. Celda solar modelo del diodo	15
2.6. Parámetros fotovoltaicos de salida (curva I-V)	15
2.6.1. Tensión en circuito abierto (Voc).....	16
2.6.2. Corriente en corto circuito (Isc)	16
2.6.3. Factor de Llenado (FF).....	17
2.6.4. Eficiencia (η)	17
2.6.5. Densidad de corriente (JSC).....	17
Capítulo 3. Desarrollo Experimental	18
3.1. Corte, lijado y limpieza de los substratos conductores de 100 cm ²	18
3.2. Depósito de ZnO y CdS por Sputering-RF y TT	20
3.3. Depósito de CdTe por CSS y su TT con CdCl ₂	22
3.4. Depósito de CdCl ₂ por CSVT	25
3.5. Depósito PEDOT:PSS	28
3.6. Depósito de Cu-Mo por Sputtering-DC.....	29
3.7. Escritura láser	32
3.8. Aislamiento del MFV por serigrafía.....	34

3.9. Interconexión eléctrica de los módulos.....	35
3.10. Adaptación de terminales eléctricas	39
3.11. Caracterización eléctrica de corriente y tensión (I-V)	40
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	42
4.1. Comprobación de la hipótesis.....	42
4.2. Interconexión de los cuatro módulos fotovoltaicos	60
Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros	63
5.1. Conclusiones	63
5.2. Trabajos a futuro	64
Referencias	66
Anexos	69
Anexo 1. Equipos y materiales	69
Anexo 2. Proceso de lavado.....	69
Anexo 3. Diseño y preparación de plantillas	71
Anexo 4. Descripción del resultado de las pruebas experimentales	73

Índice de figuras

Figura 1. Producción anual de radiación solar en México (Ramírez, 2021).	3
Figura 2. Evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de la tecnología solar fotovoltaica 2016-2030 (MW, GWh) (SENER, 2016).	4
Figura 3. Procesos de depósito de materiales semiconductores y metales.	7
Figura 4. Proceso de aislamiento, interconexión y caracterización de parámetros fotovoltaicos.	7
Figura 5. Respuesta I-V del PV-M, formado por 14 celdas interconectadas y la región R1 (8 celdas) interconectadas en serie para ambos casos (Albor et al., 2021).	8
Figura 6. Interconexión serie medio módulo I, medio módulo II y módulo completo RF52 (Fierro, 2021).	10
Figura 7. Caracterización I-V del módulo RF53 con Ag y con Ni (Nuñez, 2022).	11
Figura 8. Muestra con depósito de los contactos de Cu/Mo sobre la heterounión CdS/CdTe (Nuñez, 2022).	12
Figura 9. Portadores de carga unión tipo p-n.	15
Figura 10. Curva característica I-V de una celda solar o un MFV.	16
Figura 11. Lijado de sustrato.	19
Figura 12. Limpieza del sustrato.	19
Figura 13. Sistema de erosión catódica magneto planar de radiofrecuencia (Sputering-RF) para el crecimiento de ZnO/CdS.	20
Figura 14. Muestra con depósito de ZnO/CdS por Sputering-RF sobre SnO ₂ :F.	22
Figura 15. Sistema CSS (Close Space Sublimation) para el crecimiento de CdTe.	23
Figura 16. Muestra con depósito de CdTe sobre ZnO+CdS por CSS en áreas de 100 cm ² , reduciendo el área del CdTe.	25
Figura 17. Sistema CSSVT (Close Space Vapor Transport) para el crecimiento de CdCl ₂	26
Figura 18. Muestra con depósito de película delgada de CdCl ₂ sobre CdTe por CSSVT. .	27
Figura 19. Spin Coating (WS-650) depósito para las películas de PEDOT:PSS.	28
Figura 20. Muestra con depósito de PEDOT:PSS por Spin Coating sobre CdCl ₂	29
Figura 21. Sputering-DC para el crecimiento de Cu-Mo.	31

Figura 22. Muestra con depósito de Cu-Mo en áreas de 100 cm ² , reduciendo el área del Cu-Mo con el uso de cinta kapton por Sputering-DC sobre PEDOT:PSS.....	32
Figura 23. Equipo de rayado láser (IPN).....	33
Figura 24. División en tres subceldas de 2 cm x 8.5 cm.	33
Figura 25. Aislamiento eléctrico del módulo con escritura láser con 3 divisiones.	34
Figura 26. Aislamiento del módulo con tinta policat.	35
Figura 27. a) Tintura de Ni sobre los contactos + Cu-Mo, b) Tintura de Ni sobre los contactos de SnO ₂ :F.	37
Figura 28. a) Interconexión en serie, sextos de módulo, b) Interconexión en paralelo, tercios de módulo	37
Figura 29. Interconexión serie-paralelo-serie (módulo completo) de 100 cm ²	38
Figura 30. Interconexión de los módulos MFV 11, MFV 13, MFV 14 Y MFV 16.....	38
Figura 31. Adaptación de terminales de un MFV de 400 cm ²	40
Figura 32. Simulador solar (Oriel certificado clase AAA).....	41
Figura 33. Escritura laser MFV5.	43
Figura 34. Aislamiento por serigrafía e interconexión con Ni del MFV5.....	43
Figura 35. Plantilla de acero inoxidable.	46
Figura 36. MFV10 Encapsulado.....	64
Figura 37. MFV 400 cm ² , encapsulado.	65
Figura 38. Plantilla para medios módulos.	72
Figura 39. Lijado de plantilla.	72
Figura 40. Plantilla limpia colocada en base de grafito.....	73

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros eléctricos determinados en diferentes regiones del PV-M (A) (Albor et al., 2021).	8
Tabla 2. Parámetros eléctricos proceso de interconexión MFV RF52 (Fierro, 2021).	9
Tabla 3. Parámetros eléctricos del módulo RF53 (Nuñez, 2022).	11
Tabla 4. Parámetros de depósito ZnO y CdS obtenidos por Sputtering-RF.	21
Tabla 5. Parámetros de depósito de CdTe por CSS.	24
Tabla 6. Parámetros de depósito de CdCl ₂	27
Tabla 7. Parámetros de depósito de PEDOT:PSS.	29
Tabla 8. Parámetros de depósito Cu-Mo.	31
Tabla 9. Especificaciones técnicas de la tintura de níquel (Chemtronics).	37
Tabla 10. Resultados de la interconexión en serie y en paralelo del MFV5.	44
Tabla 11. Resultados de parámetros fotovoltaicos del MFV5.	45
Tabla 12. Parámetros curva I-V del MFV 11 completo con tintura conductiva de Ni.	53
Tabla 13. Parámetros curva I-V del MFV 13 completo con tintura conductiva de Ni.	60
Tabla 14. Parámetros curva I-V en serie de los módulos MFV11, MFV13, MFV14, MFV16 y MFV completo con tintura conductiva de Ni.	62
Tabla 15. Comparación de resultados obtenidos con respecto a los de los trabajos anteriores	62
Tabla 16. Equipos, materiales y herramientas.	69
Tabla 17. Muestras de los depósitos y procesos realizados durante el proceso experimental.	73

Índice de gráficas

Gráfica 1. Curva I-V MFV5 de la interconexión de medios módulos en serie y en paralelo.	44
Gráfica 2. Curva I-V del MFV5.	45
Gráfica 3. Mediciones del primer sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.....	47
Gráfica 4. Mediciones del segundo sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.	47
Gráfica 5. Mediciones del tercer sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.	48
Gráfica 6. Mediciones del cuarto sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.	49
Gráfica 7. Mediciones del quinto sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.	49
Gráfica 8. Mediciones del sexto, sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.....	50
Gráfica 9. Interconexión en serie de los seis sextos del MFV 11 con tintura conductiva de Ni.	51
Gráfica 10. Interconexión en paralelo de los tres tercios del MFV 11 con tintura conductiva de Ni.	52
Gráfica 11. Interconexión en paralelo del MFV 11 completo con tintura conductiva de Ni.	53
Gráfica 12. Mediciones del primer sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.....	54
Gráfica 13. Mediciones del segundo sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.	54
Gráfica 14. Mediciones del tercer sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.	55
Gráfica 15. Mediciones del cuarto sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.	56
Gráfica 16. Mediciones del quinto sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.	56
Gráfica 17. Mediciones del sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.	57
Gráfica 18. Interconexión en serie de los seis sextos del MFV 13 con tintura conductiva de Ni.	58
Gráfica 19. Interconexión en paralelo de los tres tercios del MFV 13 con tintura conductiva de Ni.	59
Gráfica 20. Interconexión en paralelo del MFV 13 completo con tintura conductiva de Ni.	60
Gráfica 21. Interconexión de los MFV11, MFV13, MFV14 y MFV16.....	61
Gráfica 22. Interconexión en paralelo de los módulos MFV11, MFV13, MFV14 y MFV16 completo con tintura conductiva de Ni.....	61

Resumen

En este trabajo se diseñó y obtuvo un módulo fotovoltaico (MFV) para su posible aplicación a un centro de carga, de película delgada de CdTe con el polímero orgánico semiconductor Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli(estireno sulfonato), esto es, PEDOT:PSS. El MFV tiene una dimensión de 400 cm^2 , y consta de un arreglo cuya interconexión es Serie-Paralelo-Serie, así mismo, el módulo está dividido en 4 submódulos y a su vez cada submódulo está dividido en 6 partes iguales, cada sexto de submódulo contiene 17 subceldas dando un total de 102 subceldas por módulo que serán interconectadas entre ellas.

El proceso consta de la preparación del sustrato (cortado, lijado y limpieza), depósito de materiales semiconductores y metales (óxido de zinc, sulfuro de cadmio, telurio de cadmio, cloruro de cadmio, PEDOT:PSS, cobre y molibdeno) y la interconexión.

La interconexión comienza con la escritura laser (realizado por el Mtro. Jesús Adán Fierro en el IPN), en seguida se realiza el aislamiento con serigrafía, para proteger de agentes químicos corrosivos, evitar cortocircuitos y proteger de polvo y humedad la zona entre cada una de las subceldas, para eso se aplica una pasta aislante de color blanco compuesta por una tinta epóxica (policat), un catalizador, isoforona y acondicionado.

En seguida se establecen los puntos de conexión entre los elementos conductivos del MFV con ayuda de una tinta conductiva que puede ser Ni (níquel) o Ag (plata), en este caso se utilizó Ni, los puntos de conexión de interés son los contactos posteriores (+) de cobre molibdeno (Cu-Mo) y los contactos frontales (-) de óxido de estaño (SnO_2). Finalizamos con la colocación de terminales borneras. Entre cada uno de estos procesos se realizan la caracterización de los parámetros fotovoltaicos.

Los resultados obtenidos de acuerdo con las leyes de los circuitos y tomando en cuenta que las celdas tienen en promedio una corriente de corto circuito, $I_{SC}=4 \text{ mA}$ y una tensión a circuito abierto, $V_{OC}=0.60 \text{ V}$, al conectar las 17 subceldas en serie de cada sexto se obtuvo en promedio una tensión de 9 V por sexto; después al conectarse en paralelo los seis sextos del submódulo la corriente se incrementa alrededor de los 24 mA . Finalmente se realizó la conexión en serie de los 4 módulos de 100 cm^2 , obteniendo un arreglo fotovoltaico (AFV) con un $V_{OC}= 32 \text{ V}$ y $I_{SC} = 19 \text{ mA}$, cuya potencia máxima de salida es cercana a los 0.2 W .

Introducción

Las energías renovables son uno de los principales ejes en el camino hacia la transición energética y el desarrollo sustentable, porque en el proceso de sustitución de combustibles fósiles para la generación de energía, fomentan la economía, ayudan a la descarbonización y favorecen el bienestar humano en la salud y calidad de vida. Este es un tema de primer orden en la agenda de los gobiernos del mundo, como se pudo observar en La 27^a Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP27). En donde se retoman los objetivos planteados en los Acuerdos de París, que plantea como compromiso principal mantener el aumento de la temperatura de la Tierra en no más de un 1.5 °C.

La problemática que genera la búsqueda de la reducción del calentamiento global y al mismo tiempo satisfacer la demanda energética, exige el trabajo conjunto, del gobierno, el sector privado, la academia y la sociedad, en este sentido el gobierno mexicano participa creando leyes, desarrollando políticas públicas y disponibilidad para adherirse a tratados internacionales, tal como se puede observar con la creación de La Ley de la Industria Eléctrica (LIE), que permite la participación del sector privado a partir del Mercado Eléctrico Mayorista, La Ley de Transición Energética (LTE), el cual contempla las obligaciones en materia de energías limpias y reducción de gases contaminantes que genera la industria eléctrica.

Al mismo tiempo el gobierno de México plantea en El Programa Sectorial de Energía derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024, donde señala dentro de los objetivos prioritarios; alcanzar y mantener la autosuficiencia energética sostenible para satisfacer la demanda energética de la población con producción nacional, elevar el nivel de eficiencia y sustentabilidad en la producción y uso de las energías en el territorio nacional (Programa Sectorial de Energía 2020-2024, 2020).

En cuanto a la acción global, México ha participado activamente en la agenda de los tratados internacionales, siendo de los primeros países en firmar la ratificación de Los Acuerdos de París, donde se compromete a acelerar el crecimiento de las energías limpias, lo que ayudará a conseguir los objetivos de desarrollo sostenible y reforzará la estabilidad, desde el ámbito municipal, estatal y federal (SEMARNAT, 2016); asimismo, en la COP27,

México se comprometió a incrementar de 22 a 35 por ciento su recorte de emisiones de gases de efecto invernadero al 2030. (Sánchez, 2022).

Por otra parte, hay que mencionar que México se encuentra en el cinturón solar, esto es, entre 15° y 35° de latitud norte, región considerada como una de las más favorecida en recursos solares, con un promedio de irradiación solar superior al global, con más de 5 kWh/m² al día y zonas donde la radiación excede los 8 kWh/m² en primavera y verano, como Chihuahua, Durango, Sonora y Baja California; lo anterior según la International Renewable Energy Agency (IREA). En la figura 1, se puede observar un mapa de los 32 estados de la República Mexicana, comparando las zonas de mayor y menor de radiación solar anual diaria sobre el plano horizontal en [kWh/m²].

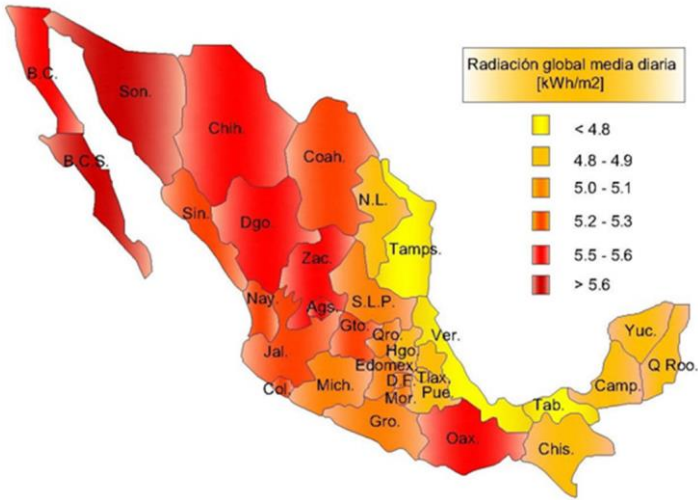


Figura 1. Producción anual de radiación solar en México (Ramírez, 2021).

El potencial de la energía solar y la participación de la iniciativa privada se vio reflejado, en el 2016, posterior a que el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), diera los resultados de la segunda subasta eléctrica, al ganar el 54% del total requerido (4,836, 597.0 MWh), donde la energía limpia adquirida en esta subasta equivale a aproximadamente el 3% de la generación anual de electricidad en México y se tiene previsto un incremento de capacidad instalada de 568.2%, pasando de 1,031.2 MW en 2016 a 6,890.9 MW en 2030 (SENER, 2016). En la figura 2, se puede observar cómo se espera la evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de la tecnología solar fotovoltaica Prospectiva de Energías Renovables 2016 - 2030.

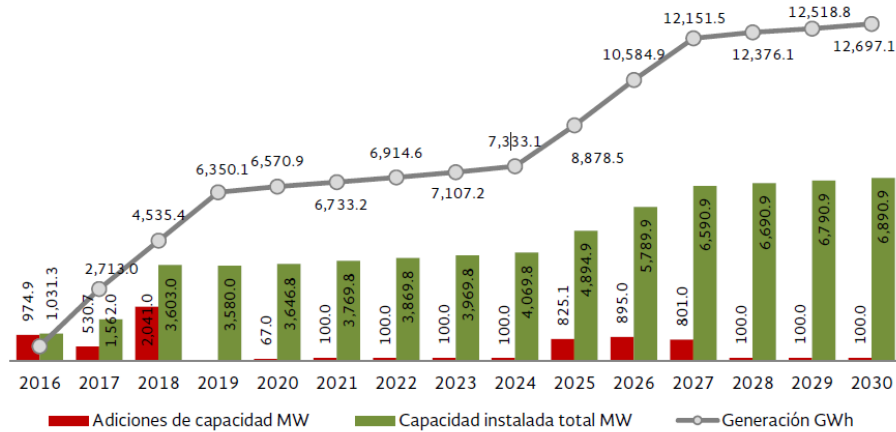


Figura 2. Evolución de las adiciones de capacidad, capacidad instalada y generación de la tecnología solar fotovoltaica 2016-2030 (MW, GWh) (SENER, 2016).

En cuanto al compromiso de la academia en presentar alternativas que apoyen a alcanzar estos objetivos se realizan diversas actividades en investigación, divulgación y desarrollo tecnológico, en este sentido nos enfocaremos en la energía solar fotovoltaica y qué trabajo se ha realizado, respecto al desarrollo de celdas solares.

La generación de energía a partir del recurso solar se remonta a 1839 cuando el físico francés Alexander Bequerel descubrió el efecto fotovoltaico y en 1954 se comenzó con la aplicación en desarrollo de una celda de silicio (Si), para la obtención de electricidad. En la actualidad podemos enmarcar los diferentes tipos de celdas solares en cuatro generaciones; la primera generación pertenece a las celdas de Si, las de segunda generación son las celdas solares de película delgada y están hechas con sulfuro de cadmio (CdS), telurio de cadmio (CdTe) o diselenuro de cobre, indio y galio (CuIn(Ga)Se₂), las celdas solares basadas en los grupos II-V de la tabla periódica de los elementos (II: galio e indio, V: arsénico y antimonio, corresponden a las de tercera generación y las de cuarta generación, son basadas en materiales orgánicos, puntos cuánticos y materiales híbridos orgánico-inorgánicos (Rodríguez, et. al., 2022).

Las celdas de Si, son las que predominan en el mercado, a pesar de que para poder utilizarlo como material fotovoltaico se requiere separarlo y purificarlo lo que se refleja en altos costos, pero al mismo tiempo es un material abundante y estas celdas alcanzan una eficiencia fotovoltaica (η) entre 16 y 27%. En la actualidad la celda de CdTe es la única tecnología de película delgada que se encuentra entre las primeras 10 tecnologías

producidas del mundo, debido a que el CdTe es un material muy robusto y químicamente estable, tiene una brecha de banda prohibida de energía cercana a 1.5 eV según el límite de Shockley-Queisser (designa a la máxima eficiencia teórica de una celda fotovoltaica basada en una unión p-n), por lo que podría ofrecer eficiencias en torno al 32%, (Romero et. al., 2021).

Considerando lo anterior las instituciones educativas más importantes del país como lo son, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través de sus centros de investigación como el Instituto de ingeniería (II), el Instituto de Investigación de Materiales (IIM) y el Instituto de energías renovables (IER) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN) a través del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) y la Escuela Superior de Física y Matemáticas (ESFM), han realizado esfuerzos para avanzar en la investigación y desarrollo de tecnología en este sector.

En el IER, en 2011 se estableció el Laboratorio de Innovación Fotovoltaica y Caracterización de Celdas Solares (LIFYCS) dentro del campus Temixco, Morelos. En este laboratorio se realiza investigación para encontrar nuevos materiales absorbentes, técnicas que aprovechen todo el espectro solar y estructuras de celdas solares que exploten el uso de películas delgadas, semiconductores orgánicos, sensibilización con tintes y nanopartículas (UNAM, 2018).

El CINVESTAV, se muestra como pionero en esta área, remontándose a los años 70's, con investigaciones en materiales y celdas solares, lograron producir celdas solares de silicio cristalino y en 1982 creando una planta piloto con capacidad de 25 kW/año con celdas solares de silicio.

En este tenor la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), en el Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES), se lleva a cabo el desarrollo e investigación de MFV'S de 100 cm² de CdTe/PEDOT:PSS. En este trabajo se realizan aportaciones que ayuden al avance en estas investigaciones, para esto se presenta la elaboración y manufactura de un módulo fotovoltaico (MFV) de película delgada de CdTe con un polímero orgánico semiconductor PEDOT:PSS; el cual tiene una dimensión de 400 cm².

En el Capítulo 1, se describen los trabajos que se toman como antecedentes, el trabajo de la Dra. María De Lourdes Albor Aguilera, demuestra que la reducción del área de aprovechamiento incide en los en los parámetros fotovoltaicos, de ahí nos planteamos como objetivo la reducción del área de aprovechamiento con el fin de mejorar los parámetros fotovoltaicos, al mismo tiempo la reproductividad mostrada en cuanto al depósito de los materiales semiconductores y metales que se registró en los trabajos tanto del Mtro. Jesús Adán Fierro López y el Ing. Jesús Adrián Núñez Membrillo, permitió avanzar con mayor celeridad en estos procesos, las observaciones referidas en los trabajos antes mencionados, como el tipo de tinta conductiva y el material aislante han ofrecido un avance en la determinación del tipo de interconexión y el mejor manejo de los procesos, lo que se vio reflejado en los resultados obtenidos.

En los trabajos antes mencionados se diseñaron medios de módulo, en el presente trabajo se realizaron sextos de módulo, la reducción del área de contacto se reflejó en un incremento en el factor de llenado y mejores resultados en los parámetros eléctricos. El presente trabajo presenta un avance en se mayor corriente de corto circuito, voltaje a circuito abierto, factor de llenado y mejor eficiencia en comparación en los trabajos referidos.

En el Capítulo 2, se describen los conceptos de mayor importancia que se ven involucrados en este trabajo, como los son cada uno de los parámetro fotovoltaicos, en el Capítulo 3, se describe el desarrollo experimental que conlleva la elaboración de un MFV, partiendo de la preparación del sustrato, las plantillas de depósito y posteriormente se describen los equipos con los que se realiza cada deposito, así como el proceso de los depósitos de materiales semiconductores y metales, en la figura 3. se muestra cada uno de estos depósitos y el promedio de material depositado.

Posterior a los depósitos, se realiza la escritura laser, se aísla por medio de serigrafía cada celda y se caracterizan los parámetros fotovoltaicos en el simulador solar Oriel Clase AAA certificado, con el objetivo de verificar que los parámetros se mantengan después de cada proceso y así poder garantizar la reproducibilidad de estos, ya para finalizar se realiza la colocación de las terminales borneras y se encapsula el MFV, lo anterior se describe en la figura 4.



Figura 3. Procesos de depósito de materiales semiconductores y metales.

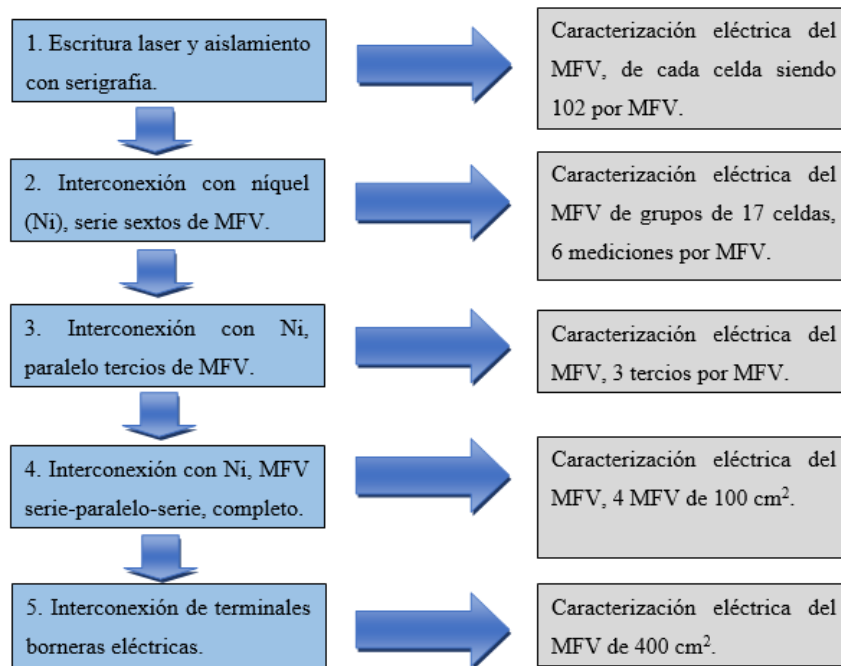


Figura 4. Proceso de aislamiento, interconexión y caracterización de parámetros fotovoltaicos.

En el Capítulo 4, se muestra la demostración de la hipótesis y como a partir de ahí se determinó el área de aprovechamiento de cada celda, el tipo de interconexión y se muestran los resultados obtenidos en el simulador solar, así como las curvas I-V obtenidas en el MFV11, como muestra de lo que se realizó con los demás MFV'S que componen este trabajo.

Capítulo 1. Marco contextual

1.1. Antecedentes

La ESFM cuenta, con aportaciones importantes, como el trabajo realizado por la Dra. María De Lourdes Albor Aguilera, profesora investigadora de la ESFM, en su artículo “Caracterización de mini módulos de CdTe y rendimiento fotovoltaico en condiciones exteriores”. En este trabajo se seccionó la celda en cinco regiones con diferentes áreas mediante un rayado manual; donde R_1 consiste en ocho celdas interconectadas en serie con un área efectiva de 13.35 cm^2 , R_2 es una celda sin interconexión con un área efectiva de 1.4 cm^2 y finalmente las regiones R_3 , R_4 y R_5 , que son celdas aisladas con un área efectiva de 0.3 cm^2 , a esta región se le denominó PB-M (Albor et al., 2021). Los resultados de la interconexión en una gráfica I-V, se muestran en la figura 5 y en tabla 1.

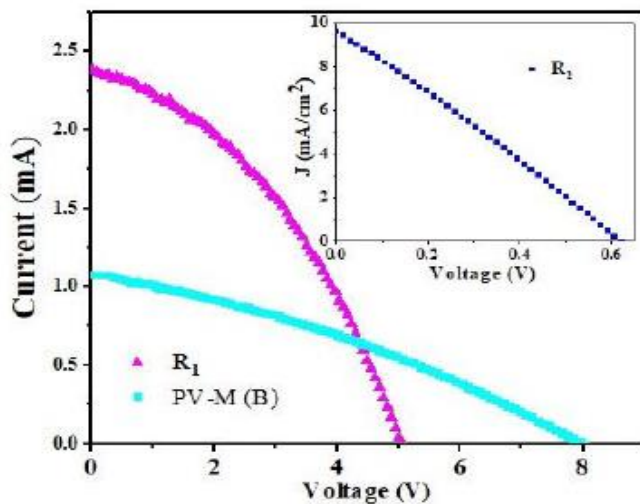


Figura 5. Respuesta I-V del PV-M, formado por 14 celdas interconectadas y la región R1 (8 celdas) interconectadas en serie para ambos casos (Albor et al., 2021).

Tabla 1. Parámetros eléctricos determinados en diferentes regiones del PV-M (A) (Albor et al., 2021).

Región	Área (cm^2)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	I (mA)	FF (%)	η (%)
R_1	13.35	5.06	–	2.38	0.39	4.7
R_2	14	0.62	9.66	–	0.26	1.6
R_3	0.3	0.69	22.17	–	0.51	7.9
R_4	0.3	0.68	22.54	–	0.44	6.8
R_5	0.3	0.61	20.90	–	0.43	5.6

En esta misma línea la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) es una institución comprometida con la problemáticas y retos que enfrenta México y la Ciudad de México (CDMX); en este sentido en el Laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentables (LACyTES) perteneciente a la UACM, se lleva a cabo el desarrollo e investigación de MFV'S de 100 cm² de CdTe/PEDOT:PSS. Los trabajos que se aprovecharon como antecedente son, la tesis de Maestría: “Procesamiento, interconexión y encapsulado de prototipos de módulos fotovoltaicos nacionales de CdTe”, En este trabajo se encontró que el proceso de interconexión eléctrica serie permite desarrollar una respuesta fotovoltaica optima en cada módulo, debido a las buenas propiedades conductivas del Ni, además de no presentar pérdidas considerables durante el proceso de interconexión. Sin importar la respuesta fotovoltaica de cada módulo, obtenida a partir del procesamiento de depósito de los materiales semiconductores, este no influye en el proceso de interconexión eléctrica, donde siempre se tiene como resultado la suma de las tensiones de cada una de las subceldas y una corriente constante cumpliendo con la característica de la conexión eléctrica serie llevada a cabo (Fierro, 2021).

En el trabajo del Maestro Jesús Adán Fierro López se reportó los siguientes valores después de la interconexión del medio módulo I correspondientes a las subceldas (1-11) y los valores del medio módulo II correspondientes a las subceldas (12-22), estos valores se pueden observar en la tabla 2. La respuesta fotovoltaica del módulo completo es a partir de los valores obtenidos de la interconexión del medio módulo I y medio módulo II, de esta manera el valor de V_{OC} de módulo completo fue de 11.51 V y un valor de I_{SC} de 13.45 mA, los valores son determinados a partir de la interconexión eléctrica en serie, en la figura 6, se muestra la curva I-V.

Tabla 2. Parámetros eléctricos proceso de interconexión MFV RF52 (Fierro, 2021).

I-V	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	FF	Eff (η)
Medio módulo I	5.14	11.96	24.99	0.55
Medio módulo II	6.22	13.82	24.99	0.76
Módulo completo	11.51	13.45	24.92	0.70

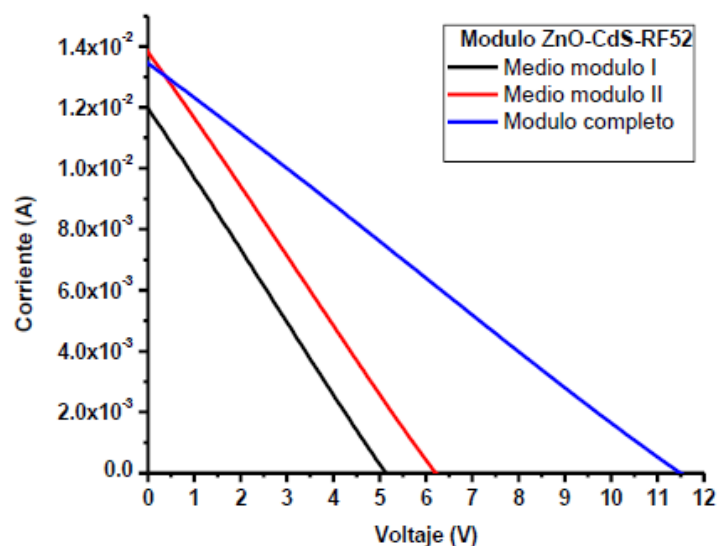


Figura 6. Interconexión serie medio módulo I, medio módulo II y módulo completo RF52 (Fierro, 2021).

Y la tesis de licenciatura: “Interconexión de prototipos de módulos fotovoltaicos híbridos de CdTe y PEDOT:PSS”. De los resultados obtenidos de este trabajo se puede resaltar lo siguiente: que en cuanto a la cantidad de material que se coloca en la chalupa para el procesamiento de la película de CdTe, se debe colocar entre los 200 y 250 mg, con lo que se tiene un mejor control del espesor de la película durante la sublimación de este (Nuñez, 2022).

Al usar una película con características tipo p+ como lo es el PEDOT:PSS, se encontró un aumento tanto en el V_{oc} y la I_{sc} , con lo que se lograron obtener subceldas con un I_{sc} de 8.7 mA en comparación a la muestra que no tiene, con una diferencia de 3.9 mA con el valor más alto sin PEDOT:PSS es de 4.8 mA (Nuñez, 2022).

Los resultados obtenidos, con respecto a usar tintura de Ni o tintura de Ag en un módulo con espesor relativamente homogéneo en la capa de CdTe, se pueden obtener valores promedios de I_{sc} de hasta 18.9 mA con Ni (RF53_Medio módulo II). Por otra parte, al usar tintura de Ag se obtienen valores promedio de I_{sc} de hasta 25.51 mA (RF53_Medio modulo I) (Nuñez, 2022). Los resultados de la curva I-V se pueden observar en la figura 7, que el I_{sc} es mejor con Ag que con Ni, y el resultado de los parámetros fotovoltaicos del módulo RF53, en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros eléctricos del módulo RF53 (Nuñez, 2022).

Módulo	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	Factor de llenado	η (%)
RF53_Medio módulo I	6.37	25.51	27.7	1.8
RF53_Medio módulo II	7.11	18.9	28.1	1.2

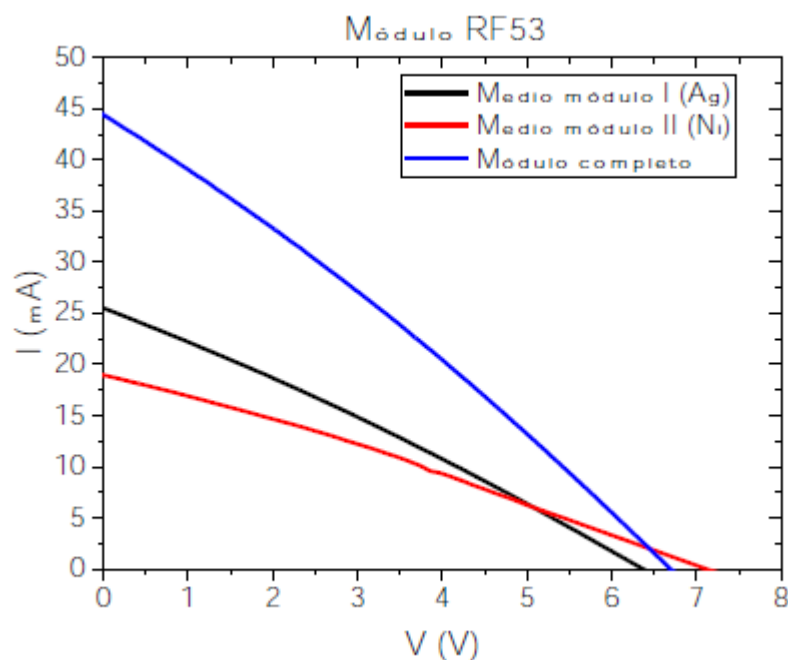


Figura 7. Caracterización I-V del módulo RF53 con Ag y con Ni (Nuñez, 2022).

Los resultados presentados en los trabajos mencionados anteriormente en cuanto al depósito de los materiales semiconductores y metales permitieron avanzar con mayor certeza en estos procesos, las observaciones referidas en los trabajos antes mencionados, como el tipo de tinta conductiva y el material aislante han ofrecido un avance en la determinación del tipo de interconexión y el mejor manejo de los procesos. A diferencia de los trabajos antes mencionados donde se trabajó en medios módulos (figura 8), en el presente trabajo se realizó en sextos de módulo, de esta forma al reducir del área de contacto nos da como resultado un incremento en el factor de llenado y mejores resultados en los parámetros eléctricos como la corriente de corto circuito (I_{SC}), la tensión a circuito abierto (V_{OC}), el factor de llenado (FF) y eficiencia (η).

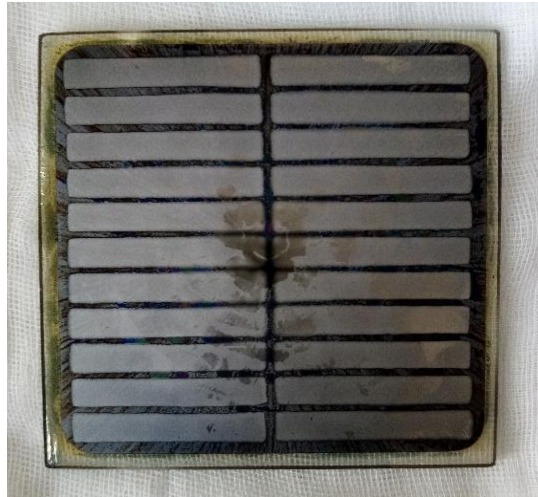


Figura 8. Muestra con depósito de los contactos de Cu/Mo sobre la heterounión CdS/CdTe (Nuñez, 2022).

El presente trabajo además muestra el proceso y desarrollo en la elaboración del Módulo Fotovoltaico (MFV), que parte de la preparación del substrato, depósito de materiales semiconductores del grupo II-VI y metales de Cu-Mo, depósito del polímero orgánico semiconductor PEDOT:PSS, así como el proceso de aislamiento e interconexión de un MFV de 400 cm². El aporte principal es que a partir de reducir el área de aprovechamiento se mejoran los parámetros fotovoltaicos, por lo tanto, de tener 22 subceldas por MFV a tener 102 subceldas por MFV, para obtener subceldas de 0.5 cm².

1.2. Planteamiento del problema

Uno de los ejes para ir hacia la transición energética es el desarrollo de tecnológico con el fin de aprovechar los recursos naturales sin depender de tecnologías extranjeras, lo que ayuda a alcanzar la soberanía energética y al mismo tiempo funciona como herramienta para cumplir con los tratados internacionales y con los objetivos planteados en la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) y el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2018-2024.

Por lo anterior este trabajo plantea el desarrollo y mejoramiento de celdas de CdTe/PEDOT:PSS de película delgada, el CdTe representa una alternativa debido a que su producción es menos costosa, además es químicamente estable, con brecha de banda de ~ 1.4 eV y eficiencia del ~16%, en este sentido a partir de reducir el área de aprovechamiento de la celda se plantea obtener un mejor factor de llenado y así incrementar los parámetros fotovoltaicos.

1.3. Hipótesis

Si se reduce el área de aprovechamiento, de tener 22 subceldas de 2.5 cm^2 , por MFV a tener 102 subceldas por MFV, para obtener subceldas de 0.5 cm^2 , entonces se deben mejorar los parámetros fotovoltaicos y garantizar el control de los procesos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Diseñar y obtener un MFV para su posible aplicación a un centro de carga, que en un futuro pueda implementarse en el plantel San Lorenzo Tezonco de la UACM.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Conocer el proceso de obtención de MFV de 100 cm^2 de forma reproducible y controlada.
2. Diseñar plantillas para realizar depósitos de los materiales semiconductores en menores áreas.
3. Obtener menores áreas de contacto y aumentar los parámetros FV.
4. Obtener un MFV de 100 cm^2 con mejores parámetros FV (aislado e interconexión).
5. Verificar los parámetros FV en cada uno de los procesos involucrados de la obtención del MFV de 100 cm^2 .
6. Interconectar 4 MFV de 100 cm^2 , para formar un MFV de 400 cm^2 .
7. Obtener los parámetros FV del MFV de 400 cm^2 .
8. Colocar borneras, sellar y encapsular con su respectiva verificación de los parámetros FV.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Energía solar FV

Es una energía del tipo renovable que es sencillamente la energía obtenido mediante la captación de la luz solar para la generación de electricidad. La radiación que genera el Sol llega a nuestro planeta y puede ser aprovechada a través de una celda solar, cuenta con una potencia variable respecto al horario del día, pero en condiciones terrestres su irradiancia es de 1000 W/m^2 .

2.2. Módulo fotovoltaico de telurio de cadmio (CdTe)

Son módulos fotovoltaicos (MFV) de segunda generación de película delgada y se basan en el uso de sólidos policristalinos porque a medida que se obtengan granos de mayor tamaño en su crecimiento del CdTe tendrá mejores propiedades eléctricas, morfológicas y estructurales. Así mismo, tiene la ventaja de contar con un valor alto de absorción, un ancho de la banda prohibida de 1.4 eV a temperatura ambiente y además de que sus espesores están en el orden de micras, permitiendo que los costos de este tipo de MFV sean menores, una de sus desventajas es que los valores de la I_{SC} son muy bajos (Rodríguez, 2020).

2.3. Efecto fotovoltaico

Fenómeno en el cual los fotones inciden sobre una superficie de un material semiconductor, por consecuencia éste liberará electrones ya que tienen una mayor capacidad de movimiento por lo que pueden generar una corriente eléctrica, una de sus características de un semiconductor es que al ser iluminados mejoran su capacidad de conducción eléctrica.

Pero para que este fenómeno suceda no basta con solo iluminarlo para que libere los electrones, sino que también es necesaria la presencia de una diferencia de potencial con la finalidad de que los electrones que se liberaron sean direccionados. La forma más sencilla es unir dos semiconductores, es que uno debe contar con exceso de electrones (tipo n) y el otro con un déficit de electrones (tipo p), y a la unión de estos dos semiconductores se le nombrara celda solar. (Rodríguez, 2020)

2.4. Unión P-N

Las celdas solares son formadas a partir de la unión entre dos semiconductores (p-n) y para poder lograrlo es necesario una región conductiva tipo p y n, a partir de esta unión existirá una generación, recombinación y difusión de portadores de carga. (Mendoza, 2020)

La unión que se forma por un semiconductor tipo p y tipo n del mismo material se le conoce como homounión (entre diferentes semiconductores se le conoce como heterounión) y al existir la incidencia de fotones sobre las regiones conductivas p y n los electrones de la banda de valencia pasaran a la banda de conducción, lo que provocara la generación de los portadores de carga, así es como da inicio a la difusión de los portadores de carga de mayor número provocando que los electrones del semiconductor tipo n fluyan hacia el

semiconductor tipo p y será ahí donde los electrones se recombinan con los huecos del lado p, creando una zona de carga negativa por las impurezas receptoras fijas que son ionizadas negativamente (A^-). Aunque, por otra parte, los huecos fluyen del semiconductor tipo p al tipo n, es así como los huecos en exceso se recombinan con los electrones del lado n, produciendo impurezas donadoras ionizadas cargadas positivamente (D^+). La generación de cargas fijas ionizadas (A^- , D^+) generan un campo eléctrico interno en la heterounión también llamada barrera de potencial E_{int} , al presentarse este campo eléctrico no permitirá que más electrones se difundan hacia el material tipo p y huecos hacia el material tipo n. En la Figura 9, se observa cómo está formada la unión p-n. (Mendoza et al., 2022).

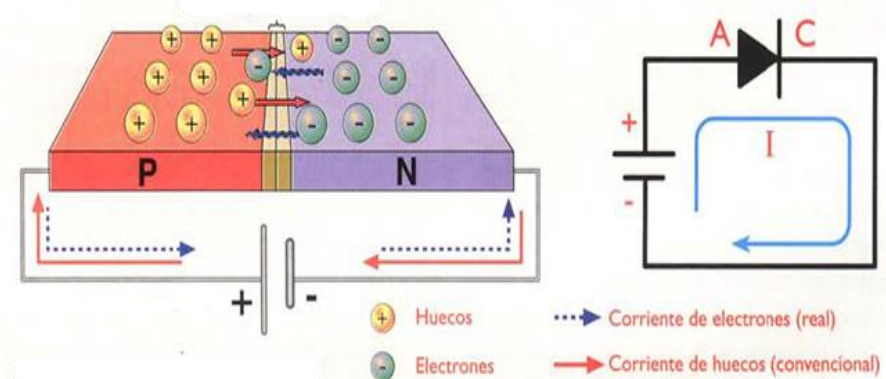


Figura 9. Portadores de carga unión tipo p-n.

2.5. Celda solar modelo del diodo

Una celda solar es un dispositivo semiconductor optoelectrónico que convierte la luz en electricidad.

2.6. Parámetros fotovoltaicos de salida (curva I-V)

Los parámetros eléctricos de cualquier tipo de celda solar nos ayudan a conocer ciertas características en particular y para determinar la curva I-V la celda solar debe de exponerse a una irradiación de 1000 W/m^2 , temperatura de 25°C y un índice de masa de aire 1.5 estos parámetros forman parte de las llamadas condiciones STC por sus siglas en inglés (Standar Test Condition), las cuales deben estar establecidas en cualquier tipo de laboratorio donde se desea conocer el desempeño de una celda solar.

2.6.1. Tensión en circuito abierto (V_{oc})

Esta diferencia de potencial solo tiene valor cuando la corriente es nula lo que quiere decir que no se encuentra alimentada a ningún tipo de carga y por lo tanto será la máxima tensión que se genera entre las dos terminales de una celda solar y depende de un factor el cual es la temperatura de trabajo (V_{mp}) de una celda solar o un MFV, lo que nos indica que cuando se tiene una temperatura mayor el V_{oc} , llamado así por su acrónimo en inglés voltaje at open circuit, el cual tiene tendencia a ser menor.

Un circuito eléctrico se considera abierto cuando no hay corriente circulando por él, esto se debe a que está siendo interrumpido o no tiene ningún conductor eléctrico, es justo en ese momento cuando la diferencia de tensión entre los polos del módulo fotovoltaico es máxima por lo que se le otorga el valor de la tensión en circuito abierto (V_{oc}), como se puede observar en la figura 10.

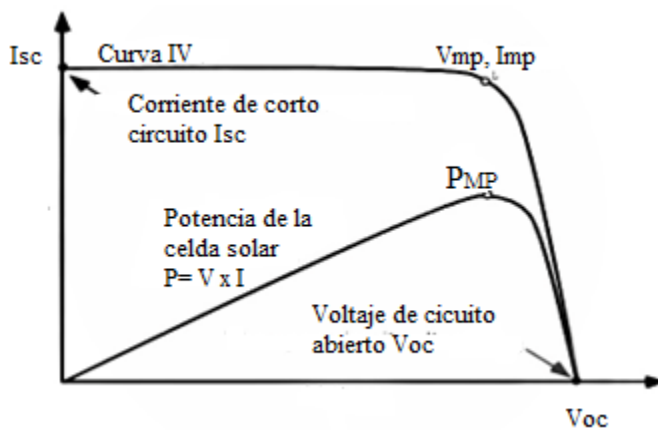


Figura 10. Curva característica I-V de una celda solar o un MFV.

2.6.2. Corriente en corto circuito (I_{sc})

Se define como la corriente que pasa una celda solar cuando la tensión es cero en sus terminales esto se debe a que la celda se encuentra en corto circuito, esta corriente I_{sc} , llamado así por su acrónimo en inglés Short circuit current, será la máxima corriente que puede ser extraída de una celda solar, puede depender de varios factores pero los más importantes son: el área ya que una celda absorberá mayor número de fotones si el área de recolección es mayor, el espectro de radiación por lo tanto incidirá en el número de fotones absorbidos y la generación y recolección de los portadores de carga. (Mendoza, 2020)

Por lo que, la corriente de corto circuito de un MFV se produce durante el corto periodo de tiempo en el que la resistencia del panel es cercana a cero, esta corriente corresponde con su intensidad máxima y cuando esta se produce, la tensión del módulo tiende a cero.

2.6.3. Factor de Llenado (FF)

También llamado Fill Factor por sus siglas en inglés, es un factor de forma que se encuentra asociado con los parámetros fotovoltaicos I-V y es un parámetro muy importante porque nos indica la calidad de la celda solar o el MFV.

Se encuentra definida por la siguiente fórmula la cual nos dice que es la razón de la corriente de máxima potencia (I_{max}) por la tensión a máxima potencia (V_{max}) entre el producto de la tensión a circuito abierto (V_{OC}) y la corriente de corto circuito (I_{SC}) como se puede observar en la ecuación 1. (Membrillo, 2022).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} * V_{sc}} = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{sc}} \quad (1)$$

2.6.4. Eficiencia (η)

Este parámetro es el más popular a la hora de comparar su desempeño con respecto a otras celdas ya existentes y se expresa con el símbolo de sus unidades son en %, básicamente representa la relación entre la potencia de la luz que incide sobre una celda y la potencia que se obtiene de la celda, y la cual viene dada por la ecuación 2.

Donde La eficiencia de una celda solar describe que proporción de la potencia óptica P_{OP} incidente en la celda es proporcionada por la misma como potencia eléctrica P_{MPP} , G es la irradiancia, y A es el. (Membrillo, 2022).

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{OP}} = \frac{P_{MPP}}{(G)(A)} = \frac{(FF)(V_{OC})(I_{SC})}{(G)(A)} \quad (2)$$

2.6.5. Densidad de corriente (J_{sc})

La densidad de corriente está en función del área, a mayor área más son los fotones absorbidos. Para normalizar la J_{sc} usamos la densidad de corriente J por unidad de área

corriente entre centímetros cuadrados y es directamente proporcional a la intensidad de la luz solar y a la eficiencia cuántica interna (Membrillo, 2022).

Capítulo 3. Desarrollo Experimental

3.1. Corte, lijado y limpieza de los sustratos conductores de 100 cm²

El sustrato de vidrio conductor (Vidrio-SnO₂:F) esencialmente es vidrio corning 50 (sodalima) del tipo LOF (Libbey Owens Ford) TEC Glass de 3.2 mm de espesor (A. Romeo, 2003).

- En su composición contiene Sodio (Na)
- Banda de ancha prohibida de energía o “gap” se encuentra alrededor (3.5 eV)
- Coeficiente de expansión térmica $9.35 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Temperatura de fusión de 800 °C
- Costo de \$5 dólares/m²
- Transmitancia óptica 83% (baja reflexión luminosa), en la región espectral de interés (400-860 nm)
- Resistividad laminar 10 Ohm/cuadrado
- Excelente estabilidad química y térmica (500 °C-700 °C)

El vidrio Corning contiene una parte conductora en la parte frontal y lo proporciona el óxido de estaño impurificado con flúor (SnO₂:F), es un óxido conductor transparente aunque también se conoce como TCO (Transparent Conductive Oxide) y es depositado por la técnica química de Rocío Químico (N. Romero, 1999). Es por eso por lo que se usa este tipo de vidrio conductor como contacto frontal para las celdas solares de CdS/CdTe.

Para su preparación del sustrato de vidrio conductor se usó vidrio TEC-10 de la marca Pilkington, se requiere de una cortadora de vidrio ya que el proveedor tiene la presentación con una medida de 1 pie² (30.48 cm x 30.48 cm) y para realizar nuestros módulos requerimos sustratos de vidrio de 10 cm x 10 cm.

Una vez que se tienen cortados los sustratos se procede a lijarlos para eliminar las orillas y excedentes que pudieran llegar a tener con la finalidad de que al introducirlos en el porta sustratos de cada equipo embonen correctamente, como se observa en la figura 11.



Figura 11. Lijado de sustrato.

En la figura 12, se observa parte del proceso de limpieza, ya que se requiere eliminar todas las impurezas del sustrato de vidrio conductor, que llegara a tener por la manipulación constante, este proceso es de gran importancia; ya que, si se llegara a realizar su limpieza equivocadamente los resultados posteriores a cada proceso no serían los adecuados, de esta manera, nos basamos rigurosamente en el instructivo detallado del proceso de limpieza (ver Anexo 2).



Figura 12. Limpieza del sustrato.

3.2. Depósito de ZnO y CdS por Sputtering-RF y TT

El óxido de zinc (ZnO) es el primer material que es depositado sobre el sustrato de vidrio conductor SnO₂:F, seguido del sulfuro de cadmio (CdS) estos materiales son semiconductores tipo-n, su ancho de banda prohibida de energía (E_g) está al alrededor de 3.37 eV y 2.47 eV, respectivamente. El depósito de estos materiales se realiza mediante la técnica de erosión catódica magneto planar (Sputtering-RF) ya que se pueden lograr crecimientos de estos materiales con una buena adherencia, un espesor controlado y a escalables o mayores áreas (Vallejo, 2011).

El sistema Sputtering-RF, se muestra en la figura 13. Tiene en su interior tres magnetrones con diferentes targets de materiales solidos (ZnO, CdS y In₂S₃), el sistema Sputtering-RF al contar con estos magnetrones en su interior, puede realizar hasta 3 depósitos de forma secuencial sin abrir la cámara del sistema; el principio de funcionamiento del sistema Sputtering se basa en generar plasma a partir de la ionización de partículas dentro del sistema.



Figura 13. Sistema de erosión catódica magneto planar de radiofrecuencia (Sputtering-RF) para el crecimiento de ZnO/CdS.

Una vez que se introduce el sustrato de vidrio conductor en el porta-sustratos se debe lograr una ionización por lo que se requiere que la cámara del sistema se encuentre en

vacío, el sistema de vacío tiene una bomba mecánica convencional para el vacío primario que puede alcanzar una presión ($\sim 5 \times 10^{-4}$ bar) y una bomba turbo molecular con la que se logra alto vacío ($\sim 6.3 \times 10^{-9}$) para medir estas presiones se utiliza un DCU (Unidad de Visualización y Operación), una vez llegando a las presiones de operación se debe encender el enfriador de agua (Industrial Chiller S&A CW-6000).

Posterior a este paso se introduce un gas inerte de argón (Ar) con una alta pureza (99.999%) para controlar el gas se utilizan dos controladores de flujo (Mass Flow Controller MKS Instrument) y un flujómetro (MKS instrument type 247), el cual nos indicara la cantidad de gas que entra al sistema, de esta manera cuando se introduce el gas en los magnetrones y suministrando potencia con ayuda de una fuente de alimentación de radio frecuencia (Kurt J. Lesker R301) y un controlador de red de coincidencia automática (Kurt J. Lesker MC2) para que regule la potencia que llegue a ser reflejada y así poder lograr erosionar el material sobre el sustrato, cuando se tienen los parámetros de presión, flujo y antes de llegar a la potencia indicada nos apoyaremos con una fuente de calefacción TDK-Lambda (Omega serie Cni), finalmente para medir la velocidad de depósito y el espesor de cada una de las películas (ZnO-CdS) se ocupa un medidor de espesores (INFICON SQM-160). En este trabajo se procesaron cuatro módulos fotovoltaicos (MFV11, 13, 14 y 15), cuyos parámetros de depósito para el ZnO y el CdS se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de depósito ZnO y CdS obtenidos por Sputtering-RF.

MFV	Ts (°C)		P (W)		td (min)		d (nm)	
	ZnO	CdS	ZnO	CdS	ZnO	CdS	ZnO	CdS
MFV 11	300	225	230	100	21:50	26:50	100	140
MFV 13					23:60	27:30		
MFV 14					24:25	26:20		
MFV 16					23:30	26:37		

Al terminar el proceso del depósito en el Sputtering-RF, el vidrio-SnO₂:F/ZnO+CdS se coloca en una mufla de calentamiento (Thermo SCIENTIFIC Thermolyne FB1415M) para

realizar un tratamiento térmico a 500 °C durante 60 minutos. Esto con la finalidad de lograr un reordenamiento cristalino de los materiales. En la figura 14, se visualiza el substrato de vidrio-SnO₂:F con la película de ZnO/CdS aunque en realidad la película que se muestra con mayor nitidez es la del CdS esto se debe a que la primer película de ZnO tiene un color morado azulado suave; mientras que, el CdS es de color amarillo lo cual hace resaltar más el CdS.



Figura 14. Muestra con depósito de ZnO/CdS por Sputering-RF sobre SnO₂:F.

3.3. Depósito de CdTe por CSS y su TT con CdCl₂

La película de telurio de cadmio (CdTe) es otro semiconductor; pero de tipo p, también se le conoce como capa absorbente. El CdTe en la fabricación de módulos fotovoltaicos cuenta con un potencial debido a su banda de ancha prohibida de energía de 1.44 eV y con un coeficiente de absorción de 10^5 cm^{-1} por lo que llega a absorber más del 90% de la radiación que incide sobre él en una capa de 2 μm de espesor, con lo que es posible obtener celdas solares con espesores de CdTe de 1 a 3 μm . (Mendoza, et al., 2022).

El material semiconductor CdTe se deposita en el sistema Sublimación en Espacio Cercano (Close Space Sublimation-CSS-) por sus siglas en inglés, ver figura 15. Este proceso es rápido y garantiza la reproducibilidad en serie, la sublimación es un proceso físico y endotérmico por lo que se evapora un material precursor el CdTe que se encuentra en fase sólida y es evaporado sin pasar por el estado líquido sobre la superficie del ZnO+CdS. Para

llevar a cabo este proceso la fuente y el sustrato deben tener una separación mínima, la fuente debe adquirir una temperatura mayor que el sustrato.

El CSS cuenta con una bomba mecánica convencional para el vacío primario que puede alcanzar una presión ($\sim 5^{-4}$ bar) y una bomba turbo molecular con la que se logra alto vacío ($\sim 6.3^{-9}$), para medir estas presiones se utiliza un DCU (Unidad de Visualización y Operación) además contiene en su interior dos bloques de grafito de alta densidad y baja porosidad, ambos bloques cuentan con 5 lámparas halógenas las cuales sirven para calentar los bloques con ayuda de dos controladores de temperatura (Autonics TCN4S) para cada bloque y dos termopares para su lectura y así poder alcanzar las temperaturas deseadas. Para introducir los gases de argón (Ar) de alta pureza (99.999%) y oxígeno (O_2) de alta pureza (99.999%) se ocupan dos canales, para controlar los gases, se utilizan dos controladores de flujo (Mass Flow Controller MKS Instrument) y un flujómetro (MKS instrumentstype 247) el cual nos indicara la cantidad de gas que entra al sistema.

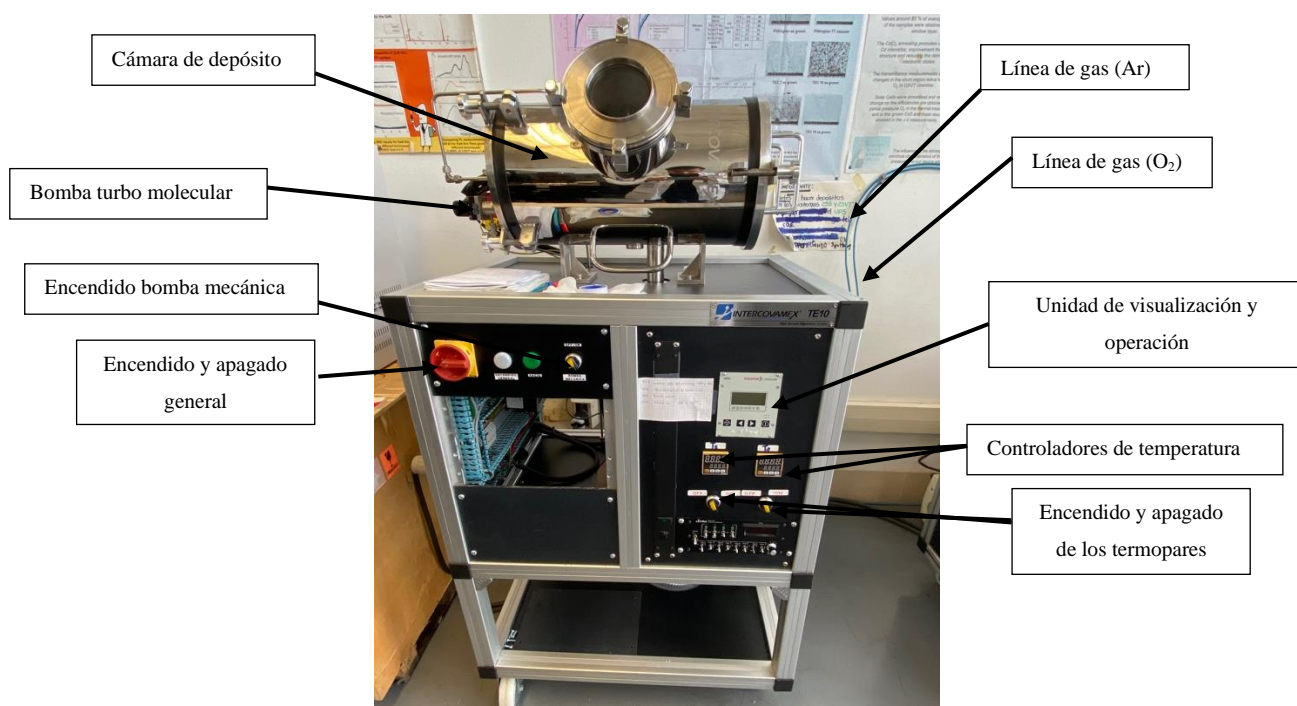


Figura 15. Sistema CSS (Close Space Sublimation) para el crecimiento de CdTe.

A continuación, se describe el proceso y los parámetros de crecimiento que se empleó en los 4 MFV de CdTe, como el proceso es reproducible y controlado se ocupó el mismo proceso para cada una de las muestras:

1. En una balanza analítica se pesan 235 mg de polvo CdTe con 99.999% de pureza, el material es colocado y distribuido dentro de un bloque de grafito empleado únicamente para este depósito.
2. El sustrato de vidrio-SnO₂:F/ZnO+CdS se coloca sobre una plantilla de acero inoxidable, este es introducido en la placa de grafito con el polvo CdTe, la película de ZnO+CdS debe de estar de frente al polvo de CdTe una vez colocado, ambos se colocan entre los dos bloques de grafito (sustrato y fuente)
3. Se cierra el sistema para realizar un vacío primario ($\sim 4.6 \times 10^{-2}$ hPa) y un alto vacío ($\sim 1.6 \times 10^{-4}$).
4. Para generar una atmosfera se introducen los gases Ar y O₂ (~ 15.2 sccm y 14.8 sccm) respectivamente.
5. Con ayuda de los controladores de temperatura se programan las temperaturas a las que deben llegar (sustrato y fuente), logrando con esto un gradiente de temperatura entre ambos bloques $\Delta T = 110$ °C, con este gradiente de temperatura será suficiente para que permita la sublimación del polvo de CdTe durante el tiempo del depósito ($t_d = 4:30$ minutos).
6. Al finalizar el tiempo de depósito se procede a bajar las temperaturas (sustrato y fuente), dejar de introducir Ar y posteriormente O₂, esperar la estabilización del sistema y apagar el equipo.

En la tabla 5 se visualizan los parámetros de depósito de CdTe y en la figura 16 el resultado del depósito de CdTe.

Tabla 5. Parámetros de depósito de CdTe por CSS.

MFV	T _s (°C)	T _f (°C)	t _d (min)	ΔT (°C)	d (μm)
MFV 11	490	600	4:30	110	8.5
MFV 13					8.4
MFV 14					8.2
MFV 16					8.4

Cuando la muestra se extrae del sistema debe de ser caracterizado para conocer el espesor de la película de CdTe y se ocupa un perfilómetro (KLA-Tenkor P-7).



Figura 16. Muestra con depósito de CdTe sobre ZnO+CdS por CSS en áreas de 100 cm², reduciendo el área del CdTe.

3.4. Depósito de CdCl₂ por CSVT

Se ha demostrado que los tratamientos térmicos con CdCl₂ mejoran las propiedades físicas de los materiales ventana (CdS) y absorbente (CdTe), como es la tensión a circuito abierto (V_{oc}) y el factor de llenado (FF); esto se debe a que se reduce la corriente de saturación y la resistencia en serie, así como el incremento de la resistencia de fuga (paralelo), además de aumentar su respuesta espectral para el rango de las longitudes de ondas cortas (Galán, 2004).

En la figura 17 se muestra el sistema CSSVT donde se realizará el depósito de CdCl₂ sobre la película de CdTe.



Figura 17. Sistema CSSVT (Close Space Vapor Transport) para el crecimiento de CdCl_2 .

El método para generar la película de CdCl_2 es el de Transporte de Vapor en Espacio Cercano (CSVT) por sus siglas en inglés, Close Space Vapor Transport, como se puede ver. Para lograr la sublimación de este material se necesita un diferencial de temperatura entre dos bloques de grafito de alta pureza y baja porosidad (fuente y sustrato) en su interior cuenta con tres lámparas infrarrojas y un gas inerte como lo es el Argón (Ar) de alta pureza (99.999%) este gas se transporta hacia el sustrato, la distancia entre los bloques del sustrato y la fuente debe de ser mínima, debe de ajustarse la fuente con una mayor temperatura que la del sustrato debido a que esta diferencia de temperatura es el mecanismo prevaleciente para el correcto transporte del CdCl_2 , el proceso de crecimiento empleado en las muestras se describe a continuación:

1. Se pesan 2300 mg de polvo CdCl_2 con 79.999% de pureza dentro de una chalupa hecha de grafito empleada únicamente para este depósito y se distribuye de manera uniforme procurando ocupar la misma área del depósito del CdTe , después se coloca entre los bloques del sistema (sustrato y fuente).
2. Procedemos a cerrar el sistema para realizar un vacío primario ($\sim 3.5 \times 10^{-2}$ Torr) y un alto vacío ($\sim 8 \times 10^{-4}$), después de 60 minutos se apaga la bomba turbo y únicamente se trabaja con la bomba mecánica.
3. Se introduce el gas inerte Ar al sistema con un flujo de 13.5 sccm.

4. Se programan las temperaturas a las que se desea llegar (sustrato y fuente) con los controladores de temperatura.
5. Para conseguir que se deposite el material debe de existir un gradiente de temperatura entre ambos bloques $\sim \Delta T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, con este gradiente de temperatura será suficiente para que se consiga la película de CdCl_2 durante el tiempo del depósito ($t_d = 3:00$ minutos).
6. Una vez finalizando el tiempo de depósito se debe esperar a que las temperaturas (sustrato y fuente) se encuentren a temperatura ambiente, dejar de introducir Ar, esperar a que se estabilice el sistema, sacar la muestra y apagar el equipo.

Cuando la muestra vidrio- $\text{SnO}_2\text{:F/ZnO}+\text{CdS/CdTe}+\text{CdCl}_2$ se obtiene del CSSVT se le debe realizar un tratamiento térmico (TT) para que el CdCl_2 se evapore y ayude a oxidar la película CdTe, en la mufla a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo de 30 minutos, pasando el tiempo del TT la muestra debe ser limpiada superficialmente con agua desionizada y secada con nitrógeno (N), este proceso se repite nuevamente. En la figura 18, se muestra el depósito CdCl_2 y en la tabla 6, se pueden ver los parámetros que se utilizaron en cada muestra.

Tabla 6. Parámetros de depósito de CdCl_2 .

	T_S ($^{\circ}\text{C}$)	T_F ($^{\circ}\text{C}$)	t_d (min)
MFV 11	220	360	5
MFV 13			
MFV 14			
MFV 16			

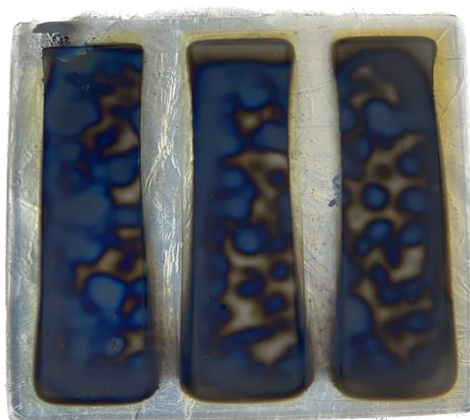


Figura 18. Muestra con depósito de película delgada de CdCl_2 sobre CdTe por CSSVT.

3.5. Depósito PEDOT:PSS

El depósito para la película de PEDOT:PSS fue realizado con un equipo spin coating (WS-650) este equipo se visualiza en la figura 19, en donde se consiguen películas delgadas y uniformes sobre diferentes superficies; en este sistema, se les depósito el polímero semiconductor a las muestras ya que este polímero mejora la dispersión y estabilidad del PEDOT:PSS, debido a su alta función de trabajo de 5 eV es un candidato perfecto como contacto óhmico con el CdTe.

Por otro lado, cubre pinholes que surgen a partir del depósito de CdTe y por ende evita rutas de corto circuito, cubre las fronteras del CdTe mejorando la heterounión p-n y el V_{oc} además de reducir los centros de recombinación eléctrica de los pares electrón-hueco que se lleguen a generar.



Figura 19. Spin Coating (WS-650) depósito para las películas de PEDOT:PSS.

Este proceso al ser controlado se puede reproducir con facilidad por lo que las cuatro muestras fueron realizadas de la misma manera, en la tabla 7 se observan los parámetros del depósito.

Después de depositar la película de PEDOT:PSS, posteriormente se realiza un tratamiento térmico (TT) a una temperatura de 100 °C durante 30 minutos con la finalidad de eliminar

el agua que pudiera llegar a presentarse durante el depósito, y en la figura 20 se visualiza el depósito PEDOT:PSS.

Tabla 7. Parámetros de depósito de PEDOT:PSS.

	Cantidad (μl)	RPM	t_d (min)	TT ($^{\circ}\text{C}$)	t_{TT} (min)
MFV 11,13,14 Y 16	4 000	2 000	1:00	100	30:00



Figura 20. Muestra con depósito de PEDOT:PSS por Spin Coating sobre CdCl_2 .

3.6. Depósito de Cu-Mo por Sputtering-DC

Finalmente, para los contactos posteriores usamos Cobre-Molibdeno (Cu-Mo) ya que estos materiales deben de ser óhmicos y que permitan el paso de los portadores de carga; sin embargo, el Cu al ser un metal que se difunde con facilidad y que tiende a oxidarse con facilidad se le necesita adherir otro metal como es el Molibdeno (Mo). El depósito de estos materiales se realizó por medio de un sistema de erosión catódica magneto planar de corriente directa (Sputtering-DC), y como se trata de erosionar metales se usa una fuente de potencia de corriente directa (DC), en vez de la fuente de potencia RF que se usa en materiales altamente resistivos o aislante.

El sistema Sputering-DC se observa en la figura 21, cuenta en su interior con dos magnetrones con diferentes targets de materiales solidos (Cu y Mo) al contar con estos magnetrones no será necesario abrir la cámara del sistema para depositar los dos metales únicamente cambiar de magnetrón.

Su principio de funcionamiento es generar plasma a partir de la ionización de partículas dentro del sistema, una vez que se introduce el vidrio-SnO₂:F/ZnO+CdS/CdTe+CdCl₂/PEDOT+PSS en el porta-substratos; se debe lograr una ionización por lo que se requiere que la cámara del sistema se encuentre en vacío, el sistema de vacío tiene una bomba mecánica convencional para el vacío primario que puede alcanzar una presión ($\sim 4 \times 10^{-4}$ Torr) y una bomba turbo molecular con la que se logra alto vacío ($\sim 6 \times 10^{-6}$), para medir estas presiones se utiliza un medidor de cátodo frío (MKS 943) y un controlador de presión mejorado por convección (MKS 947).

Una vez llegando a las presiones de operación se debe encender el enfriador de agua (Thermo NESLAB MERLIN M33) posterior a este paso se introduce un gas inerte como lo es el Argón (Ar) con una alta pureza (99.999%) para controlar el gas se utilizan dos controladores de flujo (Mass Flow Controller MKS Instrument) y un flujómetro (MKS instrumentstype 247) el cual nos indicara la cantidad de gas que entra al sistema, de esta manera cuando se introduce el gas en los magnetrones y suministrando potencia con ayuda de una fuente de alimentación con corriente continua (Maxim 1500 DC Magnetron) y poder lograr erosionar el material y que se deposite sobre el vidrio-SnO₂:F/ZnO+CdS/CdTe+CdCl₂/PEDOT+PSS, cuando se tienen los parámetros de presión y flujo y antes de llegar a la potencia indicada nos apoyaremos con una fuente de calefacción (Serensen DCS150-7E) que se programa en el controlador de temperatura (EUROTHERM 2408).

Para medir la velocidad y el espesor de cada una de las películas (Cu-Mo) se ocupa un medidor de espesores (INFICON SQM-160). Nuevamente se procesaron cuatro muestras con los mismos parámetros como se observa en la tabla 8 y en la figura 22 se visualiza el depósito Cu-Mo.

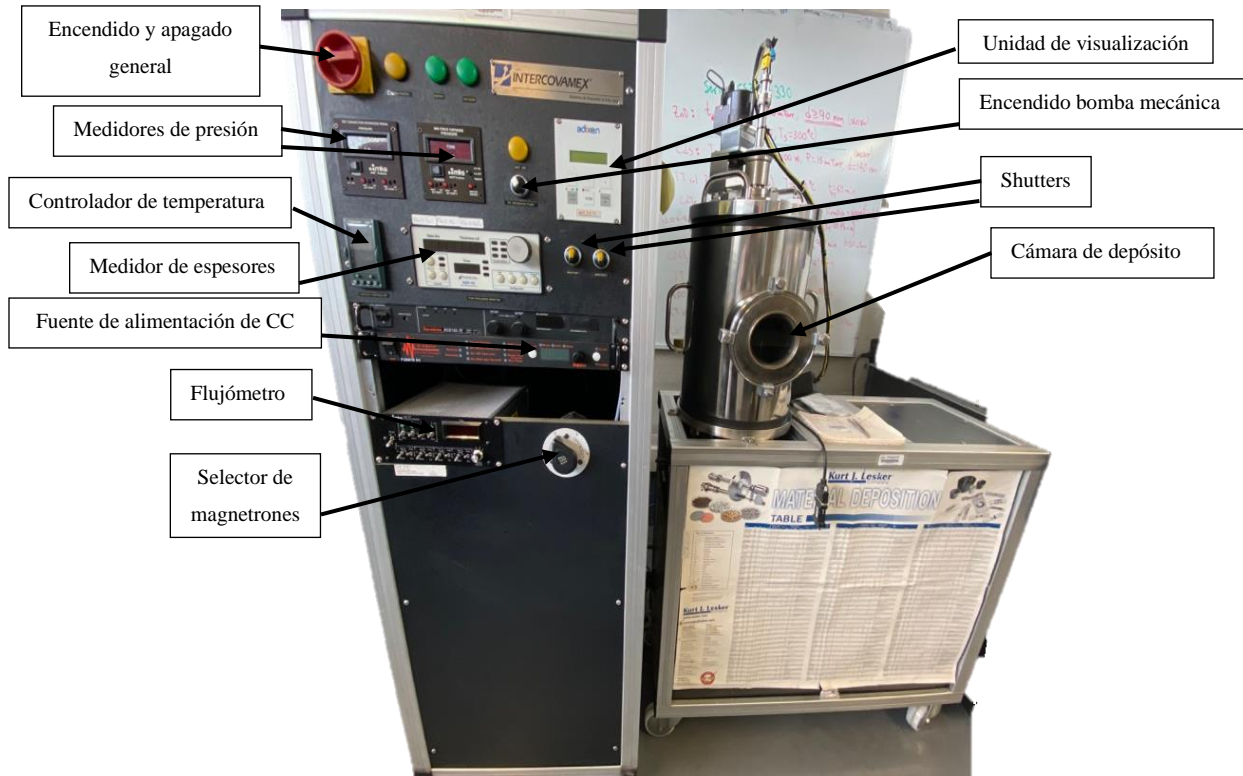


Figura 21. Sputtering-DC para el crecimiento de Cu-Mo.

Tabla 8. Parámetros de depósito Cu-Mo.

	Material	T_s (°C)	P (W)	t_d (min)	d (nm)
MFV 11, 13,14 Y 16	Cu	200	100	1:30	15
	Mo		250	27:00	300

Por último, a la muestra se le realiza un tratamiento térmico, dentro del sistema Sputtering-DC a 200 °C durante 20 minutos, en una atmosfera de Ar a una presión de 680 mTorr para la difusión del Cu-Mo sobre la muestra, con el objetivo de lograr un contacto óhmico y al finalizar el tratamiento térmico se debe esperar a que el sistema se encuentre a temperatura ambiente y poder sacar la muestra.



Figura 22. Muestra con depósito de Cu-Mo en áreas de 100 cm^2 , reduciendo el área del Cu-Mo con el uso de cinta kapton por Sputering-DC sobre PEDOT:PSS.

3.7. Escritura láser

El aislamiento de cada subcelda se logró a través de un sistema de escritura láser, el láser que se utilizó (CLASS 3B Spectral-Physucs, Laser Explorer, 1-10 ns, 0-0.5 kHz de 349 nm) que por medio de dos servomotores se desarrolla un sistema de movimiento en los ejes (X,Y) para el desplazamiento del haz de luz, todo el sistema de escritura láser se controla por medio de un software (LabVIEW, National Instruments), gracias a estos equipos es posible generar un haz de luz con la potencia suficiente para erosionar este tipo de material, una vez erosionando el material se procede a realizar los trazos. El proceso de escritura es realizado en colaboración con el Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el maestro Jesús Adán Fierro López y se describe mediante los siguientes pasos:

1. Se posiciona el módulo en el área de escritura.
2. Se ajustan los parámetros de operación de láser en 4000 Hz a 4 A de potencia.
3. Se realiza el desprendimiento de material por el sistema de escritura láser.

Después del proceso de escritura láser, el módulo queda dividido en 102 subceldas logrando un aislamiento eléctrico entre cada una de las subceldas formadas (Fierro, 2021).

En la figura 23, se muestra el sistema de escritura láser que se utiliza para llevar a cabo la erosión del material en el módulo.

En la figura 24 se pueden observar tres subceldas con dimensiones de (2 cm x 8.5 cm) y un área de 17 cm² cada una, dando un total de 51 cm² por módulo así que para reducir el área de las tres subceldas se tomó la decisión de dividir los 17 cm² a 0.5 cm² (1 cm x 0.5 cm) para cada tercio del módulo entonces se pasó de tener una subcelda (17 cm²) a tener 34 subceldas (0.5 cm²) por tercio del módulo, dando un total de 102 subceldas, además de que se logró el aislamiento eléctrico entre cada una de las 102 subceldas.

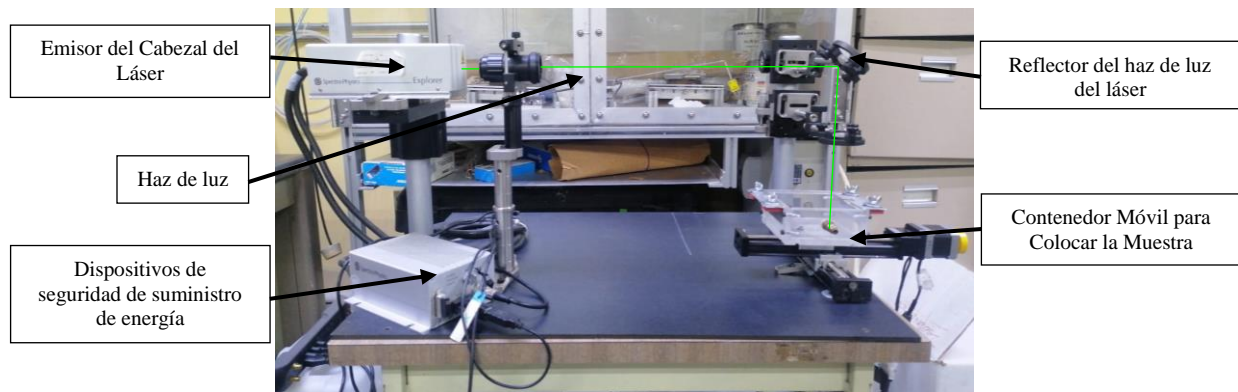


Figura 23. Equipo de rayado láser (IPN).

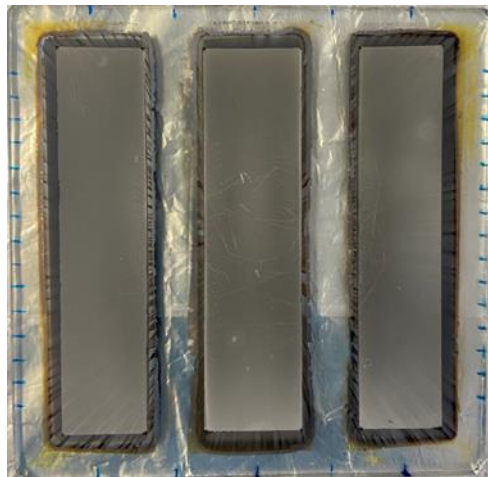


Figura 24. División en tres subceldas de 2 cm x 8.5 cm.

En la figura 25, se muestra un módulo aislado eléctricamente por el sistema de escritura láser, donde se observan las 102 subceldas.

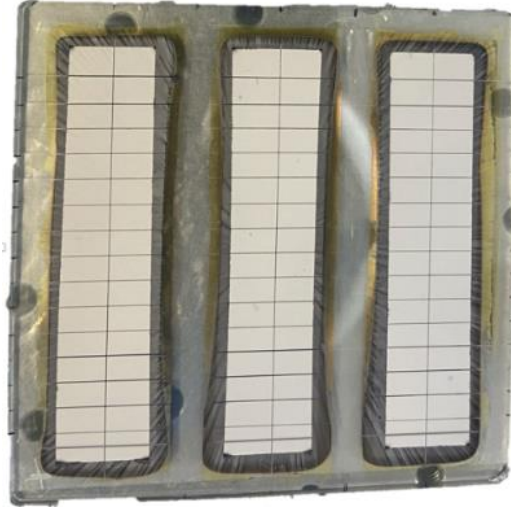


Figura 25. Aislamiento eléctrico del módulo con escritura láser con 3 divisiones.

3.8. Aislamiento del MFV por serigrafía

Este proceso es muy importante ya que las 102 subceldas se encuentran aisladas pero deben de ser interconectadas una con otra puenteando cada uno de sus terminales Cu-Mo(+) y SnO₂:F (-), pero para poder interconectarlas primero se debe de colocar un aislante que no permita la humedad, corrosión y la entrada de cualquier tipo de agentes externos de ser así el módulo entrara en corto-circuito, para evitarlo nos apoyaremos de una tinta epóxica que en conjunto con un catalizador, isoforona y acondicionador harán que la tinta cambie de fase líquida a sólida, la tinta debe ser dirigida en las pistas que se hicieron con el láser como se visualiza en la figura 26, para cubrir los materiales (ZnO/CdS/CdTe/CdCl₂/PEDOT:PSS) a excepción de los contactos frontales (Cu-Mo) e inferiores (SnO₂:F); si la tinta epóxica no cubre los materiales cuando se interconecten las subceldas entrarán en corto-circuito. El proceso para llevar a cabo el aislamiento por serigrafía se describe a continuación:

1. En un recipiente se deberán mezclar con ayuda de una balanza 4.5 g de resina epóxica, 1.5 g de catalizador, 0.45 g de acondicionador y dos gotas de isoforona.
2. Una vez obteniendo una mezcla homogénea con un punzón para uñas se procede a aplicarla sobre nuestro módulo y se aplica de tal forma que coincida con el trazo realizado por el proceso de escrituración láser.

3. El paso 2 se realizara en cada uno de los trazos que aíslan a las 102 subceldas del módulo, además de cubrir las zonas en que puedan quedar expuestos los otros semiconductores como lo es el ZnO, CdS, CdTe, CdCl₂ o el PEDOT:PSS.
4. Cuando se termina de serigrafiar las 102 subceldas se deja secar el módulo sobre una parrilla durante unos 60 minutos a 60°C.



Figura 26. Aislamiento del módulo con tinta policat.

3.9. Interconexión eléctrica de los módulos

Cuando se tienen aisladas las 102 subceldas de cada módulo (MFV11, MFV13, MFV14 Y MFV16) se deben interconectar con el fin de que cada subcelda contribuya a una mejor respuesta del módulo fotovoltaico. La interconexión consiste en un arreglo (serie-paralelo-serie), el módulo está dividido en sextos esto quiere decir que cada sexto se interconectara en serie, con el fin de aumentar la tensión mientras que la corriente permanecerá constante, el primer sexto con el segundo sexto en paralelo donde ahora la corriente aumentara y la tensión permanece igual y así sucesivamente. Por último, quedaran interconectados en tercios y esos tres tercios se interconectaron en serie para nuevamente incrementar la tensión y mantener constante la corriente ya adquirida; a continuación, se menciona el proceso de la interconexión eléctrica:

1. Se utilizó un plumón conductor de níquel (Ni) para la interconexión de las 102 subceldas, las especificaciones del plumón se mencionan en la tabla 9, aunque se puede utilizar un plumón conductor de plata (Ag) por que ya se tiene un antecedente de que la plata aumenta los parámetros fotovoltaicos (V_{oc} , I_{sc} , η), pero por cuestiones de tiempo y de que el plumón de Ag se encontraba agotado en el mercado, se sugirió utilizar Ni, por su bajo costo, fácil manipulación y por sus propiedades conductivas y es por eso que primero se debe colocar Ni sobre las 102 subceldas del grosor del punzón de uñas y cuidar de no salirse de los contactos frontales (Cu-Mo) con lo que ayudara a incrementar el flujo de corriente. El proceso se visualiza en la figura 27 a).
2. Posteriormente el Ni se debe colocar sobre el contacto negativo ($SnO_2:F$), como se observa en la figura 27 b), con ayuda de un simulador solar (Oriel certificado clase AAA) se medirán cada una de las 102 subceldas para corroborar que cada subcelda de respuesta fotovoltaica de lo contrario se deberá aislar con la tinta epóxica (policat blanco) de tal forma que las subceldas que resulten desfavorecidas no afecten la interconexión en serie de cada sexto del módulo.
3. Después se deben de conectar cada una de las 17 subceldas de cada sexto del módulo en serie (contacto negativo de la primer subcelda con su contacto positivo de la segunda subcelda) y así sucesivamente con los seis sextos del módulo figura 28 a), nuevamente se debe de medir su respuesta fotovoltaica para corroborar que efectivamente la tensión aumenta y la corriente se mantiene constante.
4. A continuación, se interconectará ahora en paralelo el primer sexto del módulo con el segundo sexto del módulo y así progresivamente hasta interconectar el quinto sexto con el último sexto del módulo véase la figura 28 b), procedemos a medir su respuesta fotovoltaica y ver que la tensión permanece contante y la corriente aumenta.
5. Como ya se tienen interconectados los sextos del módulo, finalmente se tienen tercios de módulo y esos tercios deberán de interconectarse nuevamente en serie como se visualiza en la figura 29, al realizar las mediciones nos percatamos que efectivamente la corriente prevalece y la tensión aumenta.

Tabla 9. Especificaciones técnicas de la tintura de níquel (Chemtronics).

Características	Valor
Conductividad	1-1.5 Ω /sq/mil
Tiempo de fraguado	24 horas (25 °C)
Buenas flexibilidad Buena resistencia química Altamente adherente a la mayoría de los materiales	

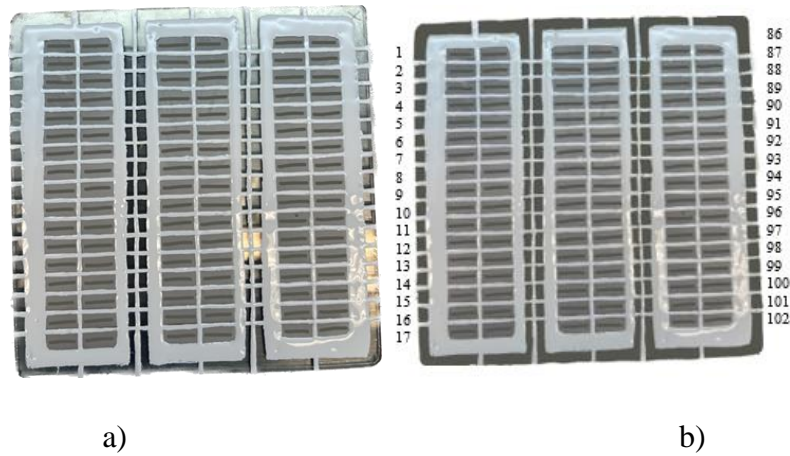


Figura 27. a) Tintura de Ni sobre los contactos + Cu-Mo, b) Tintura de Ni sobre los contactos de SnO₂:F.



Figura 28. a) Interconexión en serie, sextos de módulo, b) Interconexión en paralelo, tercios de módulo

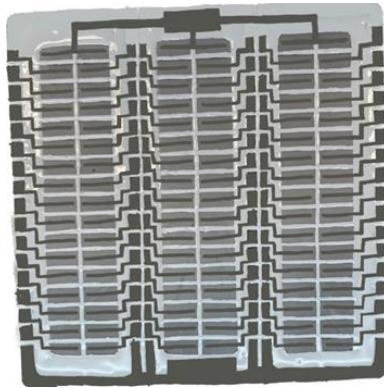


Figura 29. Interconexión serie-paralelo-serie (módulo completo) de 100 cm².

El proceso que se describe fue utilizado para cada uno de los módulos (MFV 11, MFV 13, MFV 14 Y MFV 16) y cabe mencionar que algunas subceldas tuvieron valores con respuesta fotovoltaica bajas así que esas celdas tuvieron que ser aisladas con tinta epóxica (policat-blanco) ya que de tomarlas en cuenta la respuesta I-V resultaría desfavorecida a causa de esas subceldas, en la figura 30 se observa la interconexión de los cuatro módulos.

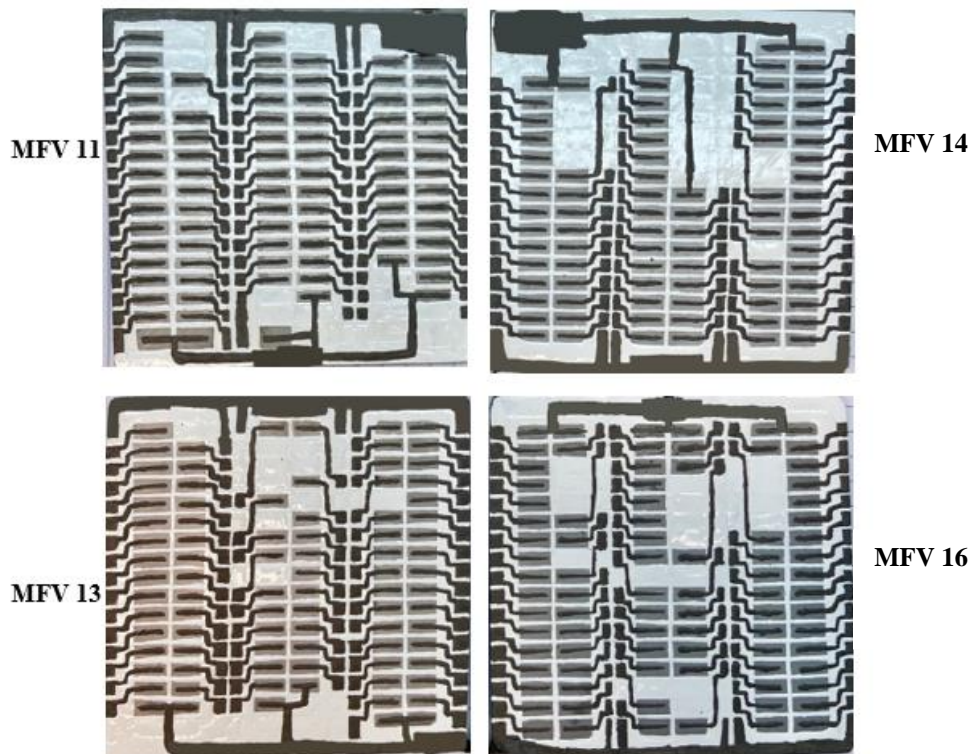


Figura 30. Interconexión de los módulos MFV 11, MFV 13, MFV 14 Y MFV 16.

3.10. Adaptación de terminales eléctricas

Este proceso es de gran importancia, pero se debe tener mucho cuidado ya que debemos asegurarnos de que tenga una salida de la corriente eléctrica de los cuatro módulos una con polaridad negativa (-) y otra con polaridad positiva (+), estas terminales nos ayudaran a la medición I-V de todo el módulo completo, el proceso de adaptación de las terminales se describe de la siguiente manera:

Como se tienen cuatro módulos debemos de elegir cuál de ellos se le colocaran las borneras, esto se debe a que las borneras ocupan un área mayor al de las subceldas por lo que debemos de asegurarnos de tener un área apropiada para su colocación.

Cortar 3 trozos de cinta conductiva de cobre (Cu) una de 3 cm (base) y otras dos de 4 cm (abrazadera), los trozos de 4 cm deberán abrazar al trozo de cinta de 3 cm, una al lado de la otra, se colocan dos trozos porque la bornera tiene como base un porta-fusible y el ancho de este es mayor al ancho de la cinta de Cu, además de que ayudara a que el pegamento de la cinta no haga contacto con la tinta conductora de Ni por donde saldrá la corriente eléctrica de cada módulo; una vez que se tengan las cintas de Cu abrazando a la base se deberán de colocar en la posición de salida de las terminales (+ y -) de cada módulo.

1. Calentar el Cautín (80 °C) y con soldadura de estaño (Sn) soldar la bornera encima de la cinta conductora de Cu; tener cuidado de que la soldadura de Sn toque alguna subcelda y de no calentar mucho tiempo la cinta de Cu debido a que la cinta contiene pegamento y si este se derrite por el calentamiento del cautín se desprenderá del módulo y el proceso se deberá realizar nuevamente.
2. Colocar tinta conductora de Ni sobre la soldadura de Sn y la cinta conductiva de Cu ya que protegerá de que se introduzca algún agente externo entre la cinta conductiva de Cu y la soldadura ayudando a que no tengamos perdidas eléctricas por no tener un contacto directo.
3. Ahora para los MFV 13 y MFV 14 se usará cable del No. 12 (CONDUMEX), para unir los cuatro módulos en una conexión en serie, y se repetirán los pasos anteriores, pero sólo se ocupará un trozo de cinta como abrazadera ya que el cable tiene menor diámetro que el porta-fusible.

En la figura 31, se observa como quedo el proceso de adaptación de terminales y la conexión de los cuatro módulos.

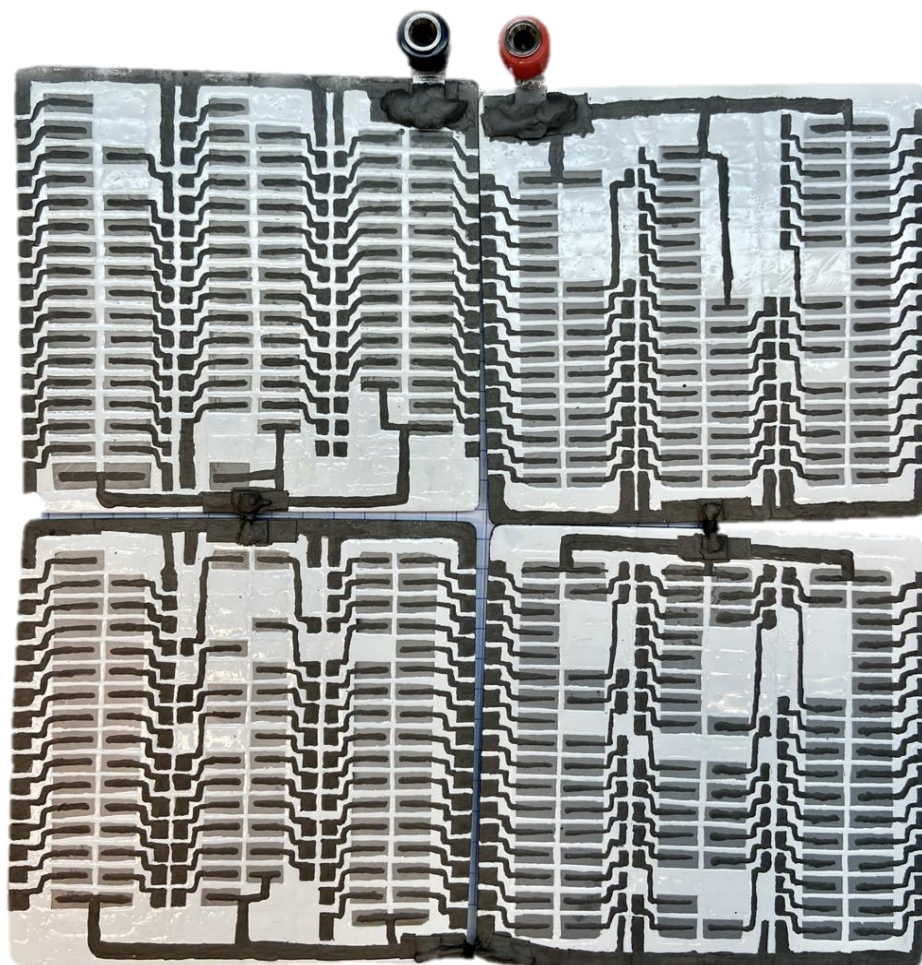


Figura 31. Adaptación de terminales de un MFV de 400 cm².

3.11. Caracterización eléctrica de corriente y tensión (I-V)

Al finalizar con el procesamiento, aislamiento e interconexión eléctrica tanto de los módulos de 100 cm² como del MFV de 400 cm² se deberán realizar mediciones de corriente y tensión (I-V) de cada módulo, estas mediciones nos ayudan a conocer la respuesta fotovoltaica de cada módulo durante cada proceso que se realizó después de su procesamiento, para realizar estas mediciones se ocupará un simulador solar (Oriol certificado clase AAA), como se puede ver en la figura 32 y el cual opera bajo las STC (Standar Test Conditions) por sus siglas en inglés. Estas condiciones son: aire másico (AM

1.5), temperatura (25 °C) y una irradiancia de 1 Sol (1,000 W/m²) y su funcionamiento es descrito a continuación:

1. Encender el UPS, después la fuente de tensión (Keihley 2420 Source Meter) y la fuente de alimentación radiométrica digital (Newport oriel 69931), una vez que encienda la fuente de alimentación encender el shutter del simulador solar, se encenderá en 600 W y se deberá subir hasta los 1,000 W.
2. Encender el UPS de la computadora, y abrir el software (Oriel IV test station), la fuente de tensión entrará en fase con el software y ya estará listo para realizar mediciones (I-V).



Figura 32. Simulador solar (Oriel certificado clase AAA).

Las caracterizaciones que se realizaron fueron de los cuatro módulos de 100 cm², esta caracterización sigue un orden el cual será descrito:

1. Aislamiento con policat blanco de las 102 subceldas.
 - 1.1. Medición I-V de las 102 subceldas de los contactos posteriores (Cu-Mo), si alguna subcelda no cuenta con respuesta fotovoltaica o es inferior al resto de las subceldas se deberán aislar.
2. Colocar tinta conductiva de Ni sobre los contactos (+) posteriores Cu-Mo y los contactos (-) SnO₂:F.

- 2.1. Medición I-V de las 102 subceldas con tinta de Ni.
3. Interconexión en serie con tinta conductiva de Ni por sextos de módulo (17 subceldas).
 - 3.1. Medición I-V de los sextos de módulo, seis con tinta conductiva de Ni.
4. Interconexión en paralelo con tinta conductiva de Ni por tercios de módulo (34 subceldas).
 - 4.1. Medición I-V de los tercios de módulo con tinta conductiva de Ni.
5. Interconexión en serie con tinta conductiva de Ni del módulo completo (102 subceldas).
 - 5.1. Medición I-V del módulo completo de 100 cm² con tinta conductiva de Ni.
6. Colocación de borneras y cables para la unión de los cuatro módulos en serie con la cinta conductiva de Cu, soldadura de Sn y la tinta conductiva de Ni sobre la soldadura de Sn.
 - 6.1 Medición I-V del módulo completo de 400 cm².

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1. Comprobación de la hipótesis

Los primeros depósitos realizados que corresponden a los MFV1, MFV2, MFV3 y MFV4, funcionaron como proceso de capacitación; preparación de sustratos (cortado, lijado, limpieza), depósito de materiales semiconductores y metales, tratamiento térmico (TT) y mediciones en el simulador solar.

Posteriormente se realizaron pruebas con cinta adhesiva kapton (resiste una temperatura de 260 °C), estas pruebas consistieron en realizar depósitos delimitando el área de depósito con la cinta kapton, para controlar los depósitos del ZnO+CdS, y de los contactos de Cu+Mo. Este proceso es parte fundamental de este trabajo, ya que aquí se demostró que la reducción del área de aprovechamiento está relacionada con el comportamiento de los parámetros fotovoltaicos J_{CS} , FF, V_{OC} , I_{SC} y η . Se dividió el MFV5 en medios de módulo y un medio de módulo en tercios de módulo, uno de los tercios de módulo con ayuda de la cinta kapton se delimitó en áreas de aprovechamiento más pequeñas, con la finalidad de demostrar lo que se describe en el artículo de la Dra. Lourdes del IPN,

Posteriormente con el apoyo del Mtro. Adán Fierro se delimitó el área de las subceldas con escritura laser como se puede observar en la figura 33, el aislamiento por serigrafía y la interconexión con se realizó con Ni se observa en la figura 34.



Figura 33. Escritura laser MFV5.

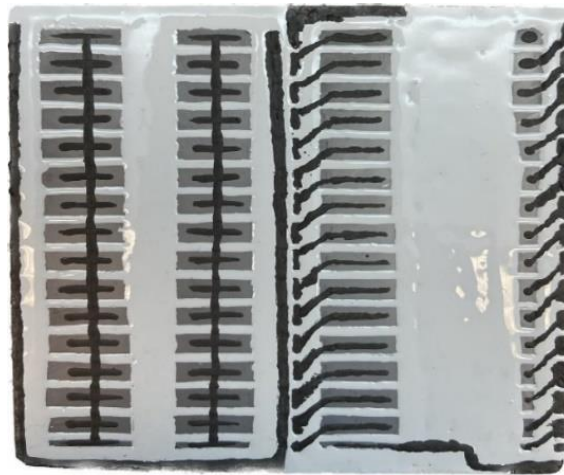
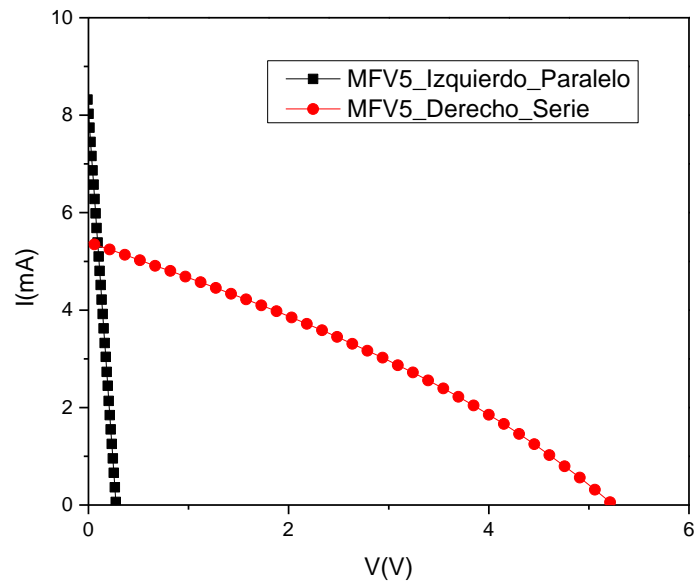


Figura 34. Aislamiento por serigrafía e interconexión con Ni del MFV5.

Con el objetivo de analizar el comportamiento de los parámetros fotovoltaicos, según la interconexión, el resultado obtenido al medir los parámetros fotovoltaicos en el simulador solar Simulador Solar AAA Certificado, fue que a menor área de aprovechamiento se obtiene mejores resultados con respecto a los parámetros fotovoltaicos y al mismo tiempo al interconectar la mitad del módulo en paralelo y la otra mitad en serie se encontró que el FF era mejor en serie que en paralelo como se puede observar en la gráfica 1 y la tabla 10.

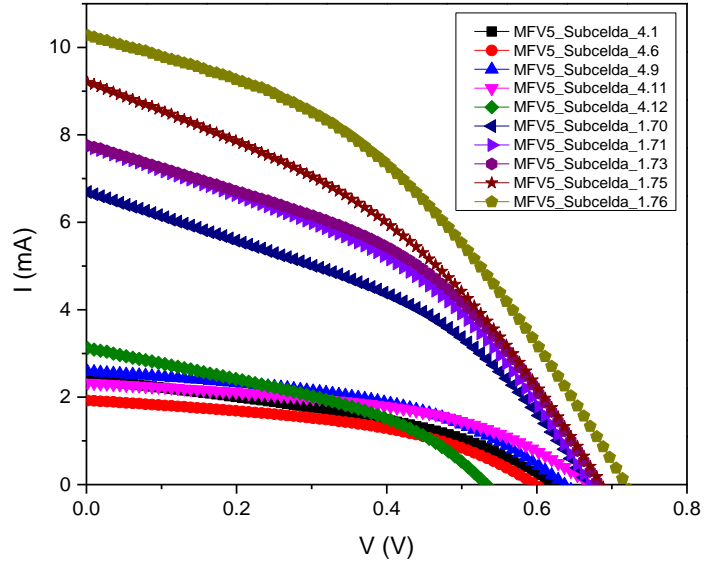


Gráfica 1. Curva I-V MFV5 de la interconexión de medios módulos en serie y en paralelo.

Tabla 10. Resultados de la interconexión en serie y en paralelo del MFV5.

Interconexión	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	Factor de Llenado	Eficiencia
Serie	5.2	5.3	31.5	0.9
Paralelo	0.3	8	25.13	0.03

Para poder analizar más a detalle el comportamiento de los parámetros fotovoltaicos del MFV5, se tomaron 5 subceldas de área de 0.75 cm² y 5 subceldas de área de 0.25 cm², donde se puede confirmar, que en las subceldas de menor área presentan un mayor factor de llenado (FF), al tomar, la subcelda del MFV5_Subcelda_4.12, arroja como resultado un V_{OC} = 0.69 V y una I_{SC} = 2.35 mA, en comparación con la subcelda del MFV5_Subcelda_1.76, que tiene como resultado un V_{OC} = 0.72 V y una I_{SC} = 10.28 mA. El resultado de la curva I-V se puede observar en la gráfica 2 y en la tabla 11.



Gráfica 2. Curva I-V del MFV5.

Tabla 11. Resultados de parámetros fotovoltaicos del MFV5.

Subcelda	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	J _{sc} (mA/cm ²)	Factor de llenado	η (%)
MFV5_Subcelda_4.1	0.60	2.41	12.7	39.7	3.2
MFV5_Subcelda_4.6	0.60	1.93	13.8	44.6	3.8
MFV5_Subcelda_4.9	0.64	2.58	8.9	46.0	2.7
MFV5_Subcelda_4.11	0.67	2.33	16.6	47.7	5.5
MFV5_Subcelda_4.12	0.69	2.35	23.5	48.4	8.1
MFV5_Subcelda_1.70	0.67	6.70	9.6	39.6	2.6
MFV5_Subcelda_1.71	0.67	7.75	11.1	40.4	3.1
MFV5_Subcelda_1.73	0.68	7.78	11.1	41.7	3.3
MFV5_Subcelda_1.75	0.69	9.21	13.2	38.1	3.6
MFV5_Subcelda_1.76	0.72	10.28	14.7	39.9	4.4

De los resultados anteriores, fue la base para el diseño de plantillas de acero inoxidable que permitieron realizar los depósitos a menor área y mayor temperatura ya que la cinta Kapton

no permite realizar depósitos a las temperaturas necesarias que permitan que los depósitos de los materiales sean los adecuados. En la figura 35 se puede observar una plantilla para el depósito de telurio de cadmio (CdTe), sobre el diseño y preparación de las plantillas y se detalla en el Anexo 3.



Figura 35. Plantilla de acero inoxidable.

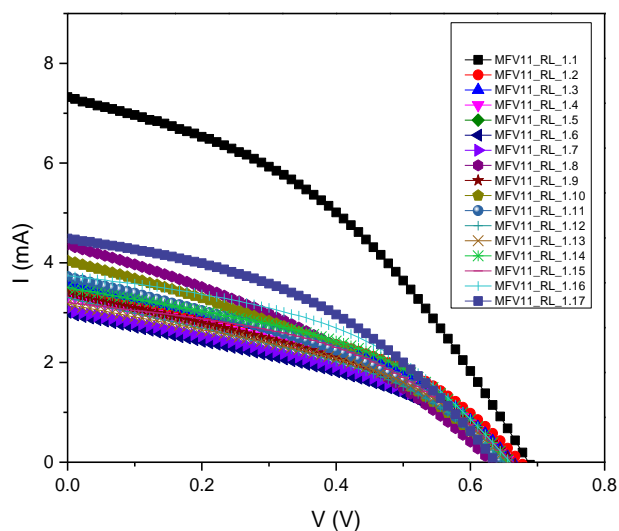
4.2. Caracterización I-V de los módulos fotovoltaicos

En este apartado se describen los resultados obtenidos de los parámetros fotovoltaicos que se obtienen después de cada proceso y se explica, por qué se cancelaron algunas subceldas con el objetivo de obtener mejores resultados.

4.3.1. Caracterización I-V del MFV11

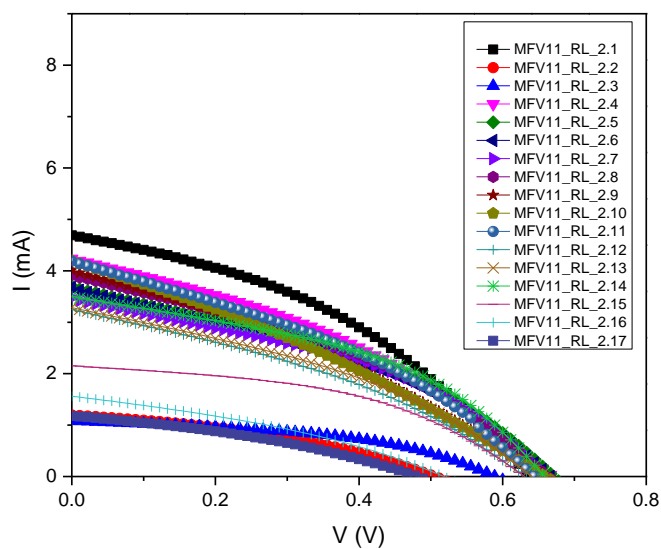
A continuación, se observarán seis graficas las cuales muestran las mediciones de las 102 subceldas del MFV11 sin tintura de Níquel (Ni), el cual fue dividido en seis sextos, para poder ser interconectadas todas las subceldas, en ellas se visualizan las curvas I-V de las diferentes secciones en que fue dividido el MFV11. En la gráfica 3, se observan 17 curvas, correspondientes a las mediciones realizadas por el primer sexto que fue dividido el MFV11, en esta sección las subceldas no contienen tintura de Ni.

Para poder ser interconectadas en serie las 17 subceldas de cada sexto del módulo se tomaron como referencia una eficiencia ≥ 0.8 % por lo que en la primera sección del sexto todas las subceldas se interconectarán en serie.



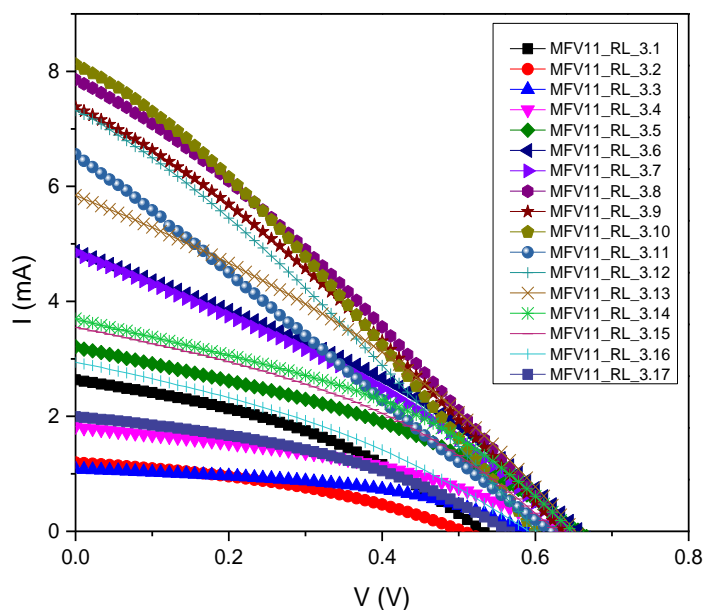
Gráfica 3. Mediciones del primer sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.

En la gráfica 4, se visualizan nuevamente las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. La subcelda 2.5 ubicada en el segundo sexto del MFV11 tuvo que ser aislada ya que su eficiencia fue menor al 0.8 % de tal manera que las 16 subceldas restantes serán interconectadas en serie.



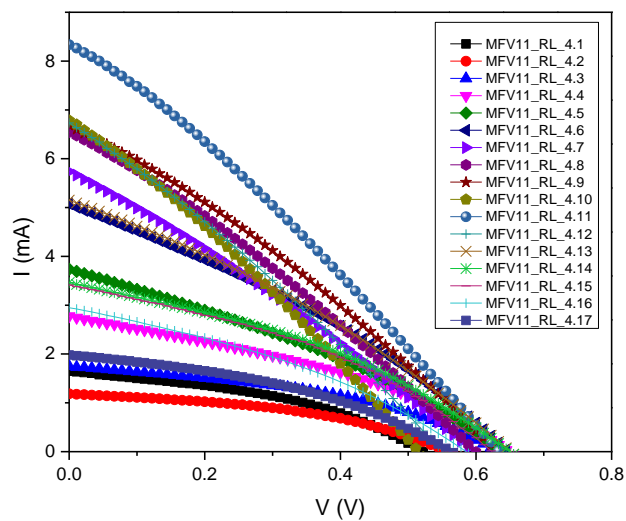
Gráfica 4. Mediciones del segundo sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.

En la gráfica 5 nuevamente se realizaron las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. La subcelda 3.2, 3.3, 3.5, 3.16 y 3.17 ubicada en el tercer sexto del MFV11 tuvieron que ser aisladas, así que únicamente se tendrán que interconectar 12 subceldas en serie.



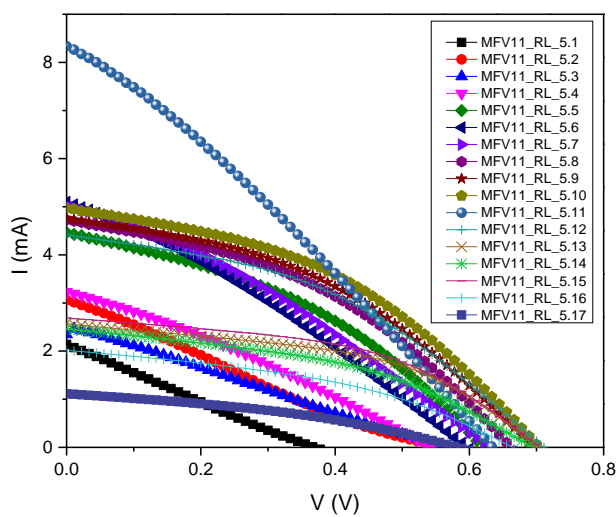
Gráfica 5. Mediciones del tercer sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.

En la gráfica 6, de igual manera se realizó las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. Las subceldas que tuvieron que ser aisladas fueron 4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.9 y 4.17 estas subceldas se encuentran en el cuarto sexto del MFV11 únicamente se tendrán que interconectar 11 subceldas en serie.



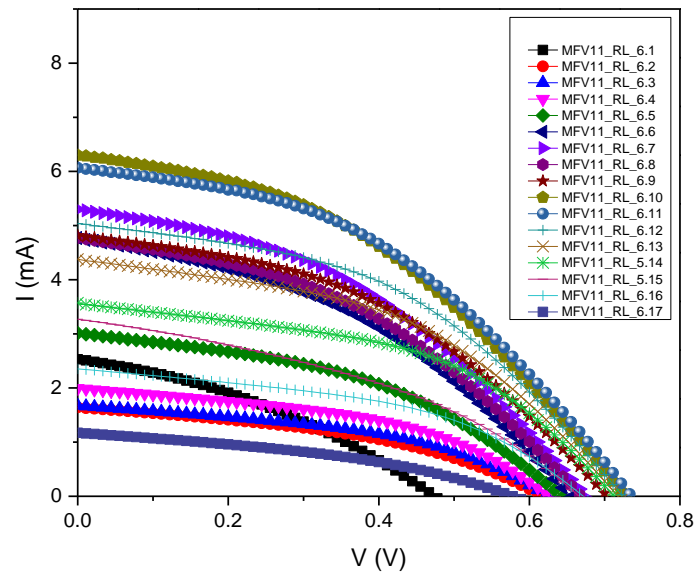
Gráfica 6. Mediciones del cuarto sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.

En la gráfica 7, otra vez se realizó las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. Las subceldas que se aislaron fueron 5.1 y 5.17 estas subceldas se encuentran en el penúltimo sexto del MFV11 por lo que se tendrán que interconectar 15 subceldas en serie.



Gráfica 7. Mediciones del quinto sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.

En la gráfica 8, se realizó las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. La subcelda que tuvo baja eficiencia y por lo tanto se aisló fue la 6.17 esta subcelda se encuentran en el último sexto del MFV11 así que se interconectarán 16 subceldas en serie.

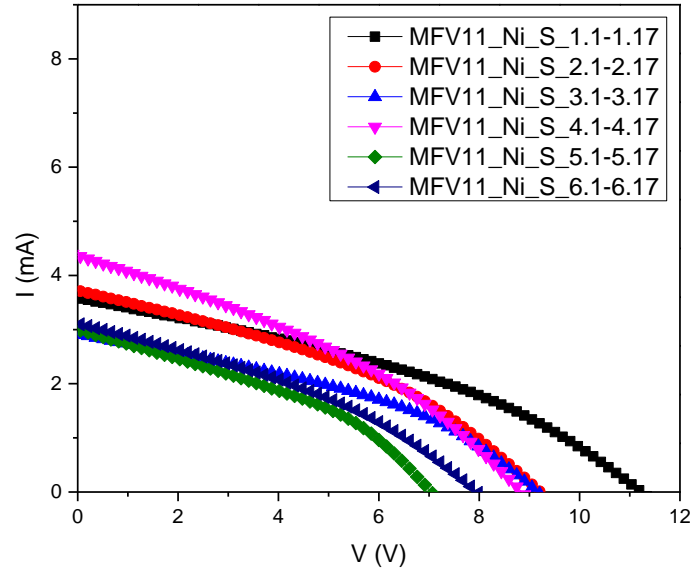


Gráfica 8. Mediciones del sexto, sexto del MFV 11 sin tintura conductiva de Ni.

Al finalizar con las mediciones de las curvas I-V de cada uno de los sextos del MFV11 y aislar cada subcelda ya señalada con polícat blanco se interconectó cada sexto del módulo en serie con el propósito de aumentar la tensión por lo que la corriente continuara conservándose.

El MFV11 de la interconexión en serie de cada sexto que debería tener cada módulo, pero como el MFV11 tuvo algunas subceldas con eficiencia menor al 0.8 % y se aislaron como, la interconexión que se realizó fue con tintura conductiva de Ni y al realizar las seis mediciones de las curvas I-V del MFV11 se tuvieron los resultados de la gráfica 9.

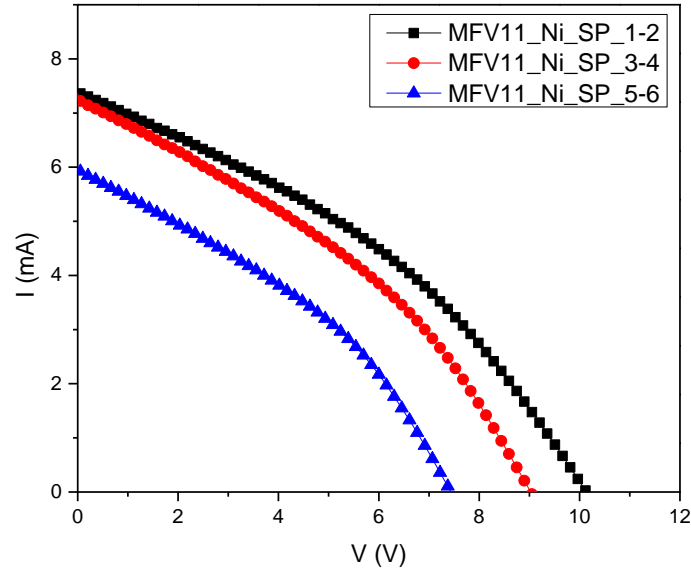
Estas seis mediciones corresponden de las subceldas que van de la 1.1-1.17, 2.1-2.17, 3.1-3.17, 4.1-4.17, 5.1-5.17 y 6.1-6.17 interconectadas ya en serie y se observa que efectivamente aumento la tensión.



Gráfica 9. Interconexión en serie de los seis sextos del MFV 11 con tintura conductiva de Ni.

Posteriormente se requiere aumentar la corriente y se consigue interconectando en paralelo, las subceldas que se interconectaron en paralelo, los cuales se nombraron tercios del módulo. Interconectando los submódulos que corresponden a las subceldas 1.1-1.7 y 2.1-2.17, este conjunto corresponde al primer tercio del módulo, las subceldas 3.1-3.7 y 4.1-4.17 corresponde al segundo tercio del módulo y por último las subceldas 5.1-5.17 y 6.1-6.17 al tercer tercio del módulo.

Al realizar la interconexión en paralelo con tintura conductiva de Ni, se notó que la corriente aumento, mientras que la tensión se promedió respecto a las interconexiones realizadas manteniendo una tensión similar a la ya registrada con anterioridad, como se observa en la gráfica 10.



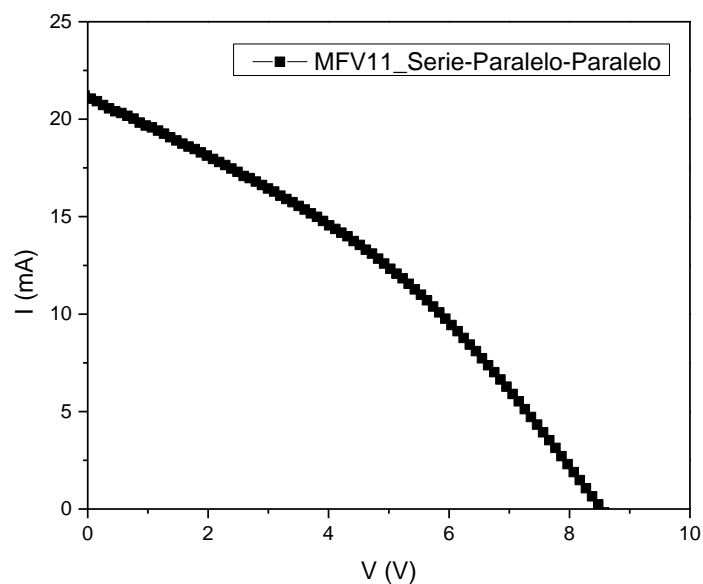
Gráfica 10. Interconexión en paralelo de los tres tercios del MFV 11 con tintura conductiva de Ni.

Para realizar la última medición del MFV11 se tuvo que volver a realizar una interconexión en paralelo con tintura conductiva de Ni.

Se realizó la última medición de la curva I-V del MFV11 donde nos percatamos que nuevamente la corriente aumento y la tensión se sigue manteniendo, una medición en promedio de las tres mediciones anteriores dando como resultado los valores obtenidos en la tabla 12, en donde se muestran el V_{OC} , I_{SC} , Factor de llenado (FF) y su Eficiencia (η) del MFV11 interconectado completo.

De las 102 subceldas que conforman al MFV11, se tuvieron que cancelar un total de 15 subceldas las cuales no se interconectaron por su baja eficiencia, tomando como referencia una eficiencia $\geq 0.8 \%$, cada subcelda tienen un valor promedio $V_{OC} = 0.6 \text{ V}$, $I_{SC} = 4 \text{ mA}$, $FF = 35$ y una $\eta = 1 \%$.

Al realizar las interconexiones con tintura conductiva de Ni de todo el MFV11 los resultados aumentaron como se observa en la gráfica 10 y la tabla 12.



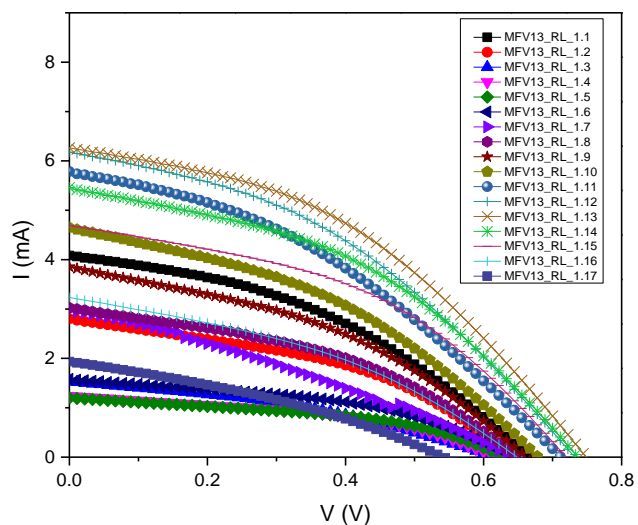
Gráfica 11. Interconexión en paralelo del MFV 11 completo con tintura conductiva de Ni.

Tabla 12. Parámetros curva I-V del MFV 11 completo con tintura conductiva de Ni

V_{oc} [V]	I_{sc} [mA]	Factor de llenado	Eficiencia
8.5	21	34.4	1.5

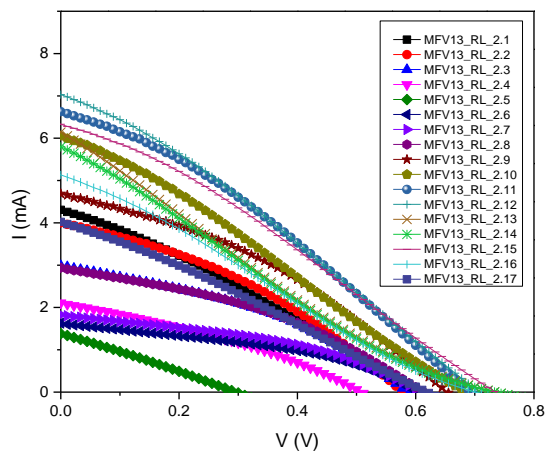
Se observan seis gráficas las cuales muestran las mediciones de las 102 subceldas del MFV13 sin tintura de Níquel (Ni), el módulo fue dividido en seis sextos, para posteriormente ser interconectadas todas las subceldas en ellas se visualizan las curvas I-V de las diferentes secciones en que fue dividido el MFV13. En la gráfica 12, se observan 17 curvas, correspondientes a las mediciones realizadas por el primer sexto que fue dividido el MFV13, en esta sección las subceldas no contienen tintura de Ni.

Para poder ser interconectadas en serie las 17 subceldas de cada sexto del módulo se tomaron como referencia una eficiencia ≥ 0.8 % por lo que en la primera sección del sexto nuevamente todas las subceldas se interconectarán en serie.



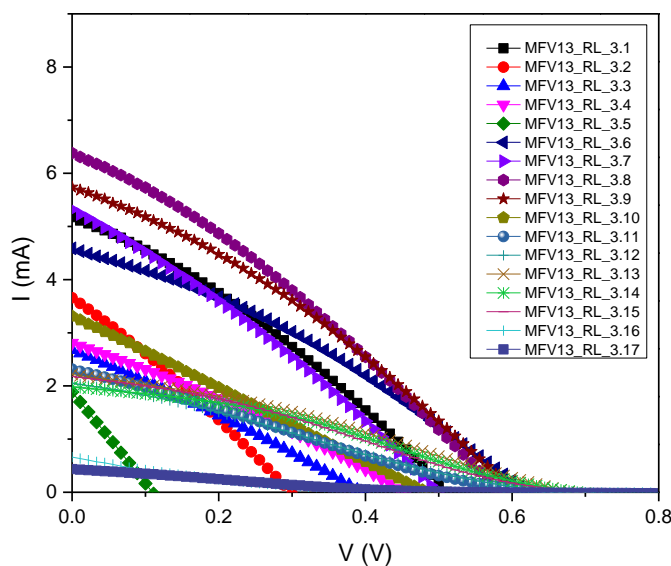
Gráfica 12. Mediciones del primer sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.

En la gráfica 13 se visualizan nuevamente las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. La subcelda 2.5 ubicada en el segundo sexto del MFV13 tuvo que ser aislada ya que su eficiencia fue menor al 0.8 % de tal manera que las 16 subceldas restantes serán interconectadas en serie.



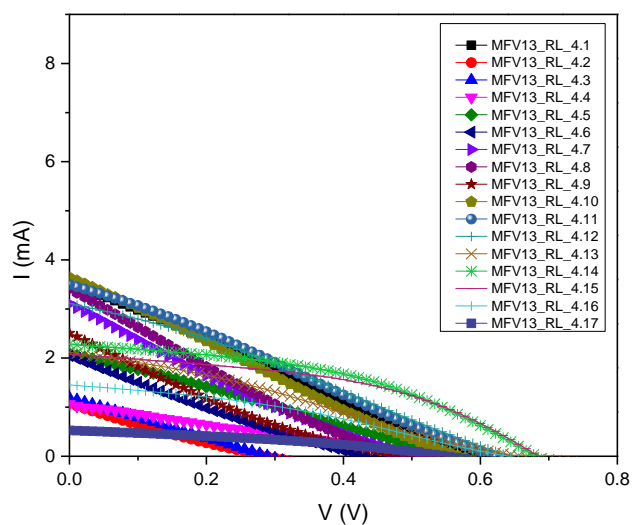
Gráfica 13. Mediciones del segundo sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.

En la gráfica 14, nuevamente se realizaron las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. La subcelda 3.2, 3.3, 3.5, 3.16 y 3.17 ubicada en el tercer sexto del MFV13 tuvieron que ser aisladas así que únicamente se tendrán que interconectar 12 subceldas en serie.



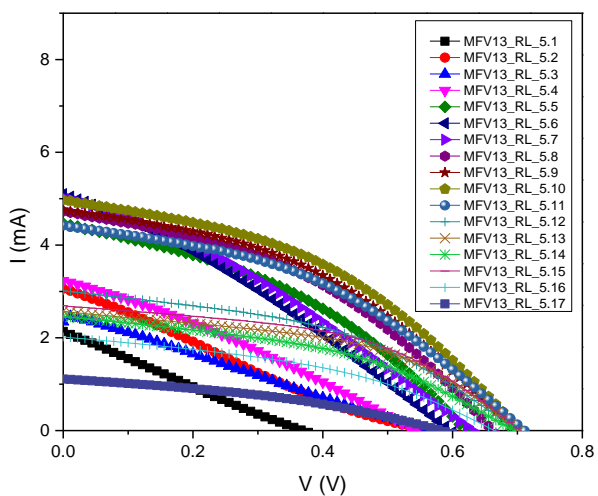
Gráfica 14. Mediciones del tercer sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.

En la gráfica 15, de igual manera se realizó las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. Las subceldas que tuvieron que ser aisladas fueron 4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.9 y 4.17 estas subceldas se encuentran en el cuarto sexto del MFV13 únicamente se tendrán que interconectar 11 subceldas en serie.



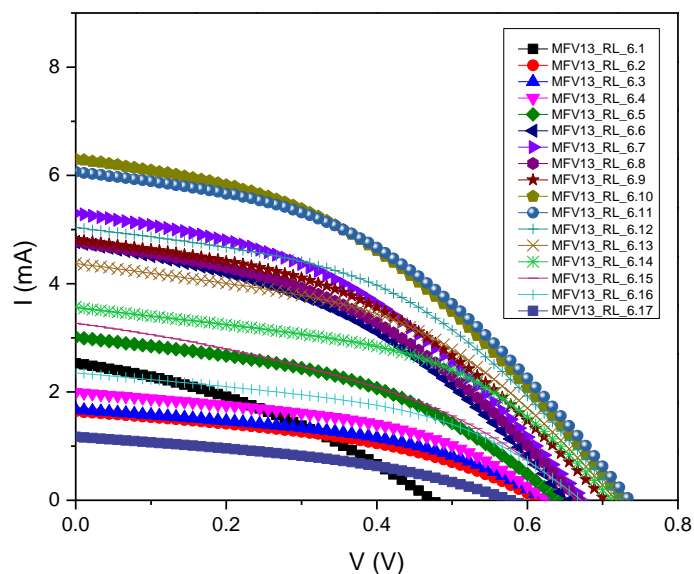
Gráfica 15. Mediciones del cuarto sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.

En la gráfica 16, otra vez se realizó las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. Las subceldas que se aislaron fueron 5.1 y 5.17 estas subceldas se encuentran en el penúltimo sexto del MFV13 por lo que se tendrán que interconectar 15 subceldas en serie.



Gráfica 16. Mediciones del quinto sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.

Por último, en la gráfica 17, se realizó las mediciones de las curvas I-V de las 17 subceldas sin tintura conductiva de Ni. La subcelda que tuvo baja eficiencia y por lo tanto se aisló fue la 6.17 esta subcelda se encuentran en el último sexto del MFV13 así que se interconectarán 16 subceldas en serie.

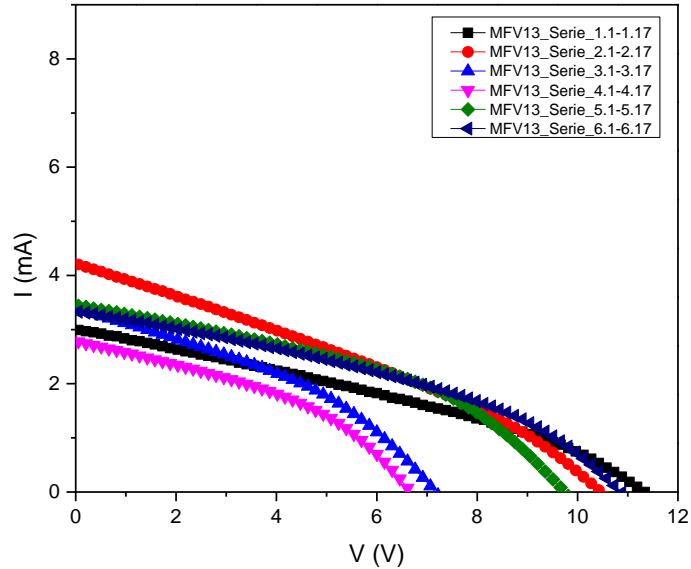


Gráfica 17. Mediciones del sexto del MFV 13 sin tintura conductiva de Ni.

Al finalizar con las mediciones de las curvas I-V de cada uno de los sextos del MFV13 y aislar cada subcelda ya señalada con policat blanco se interconectó cada sexto del módulo en serie con el propósito de aumentar la tensión por lo que la corriente continuara conservándose.

El MFV13 tuvo algunas subceldas con eficiencia menor al 0.8 % y se aislaron. La interconexión que se realizó fue con tintura conductiva de Ni y al realizar las seis mediciones de las curvas I-V del MFV13 se tuvieron los resultados de la gráfica 18.

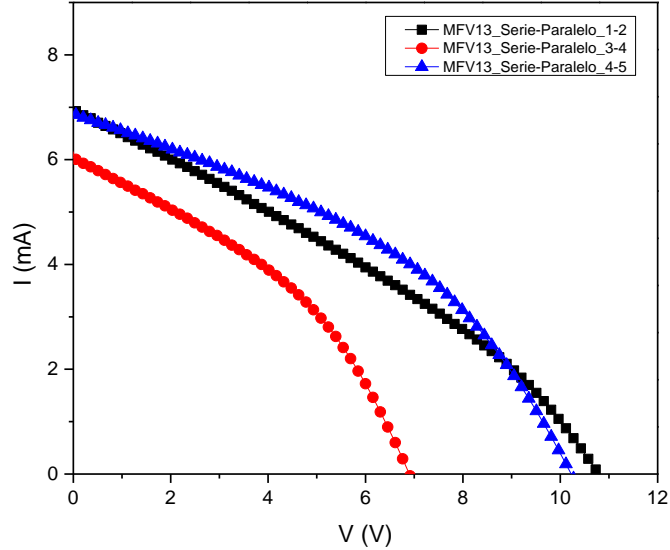
Estas seis mediciones corresponden de las subceldas que van de la 1.1-1.17, 2.1-2.17, 3.1-3.17, 4.1-4.17, 5.1-5.17 y 6.1-6.17 interconectadas ya en serie y se observa que efectivamente aumento la tensión.



Gráfica 18. Interconexión en serie de los seis sextos del MFV 13 con tintura conductiva de Ni.

Como se requiere aumentar la corriente, para lograrlo se debe interconectar en paralelo, las subceldas que se interconectaron en paralelo se nombraron tercios del módulo. Interconectando los submódulos que corresponden a las subceldas 1.1-1.7 y 2.1-2.17, este conjunto corresponde al primer tercio del módulo, las subceldas 3.1-3.7 y 4.1-4.17 corresponde al segundo tercio del módulo y por último las subceldas 5.1-5.17 y 6.1-6.17 al tercer tercio del módulo.

Al finalizar la interconexión en paralelo con tintura conductiva de Ni, se notó que la corriente aumento, como se muestra en la gráfica 19, mientras que la tensión se promedió respecto a las interconexiones realizadas manteniendo una tensión similar a la ya registrada con anterioridad.



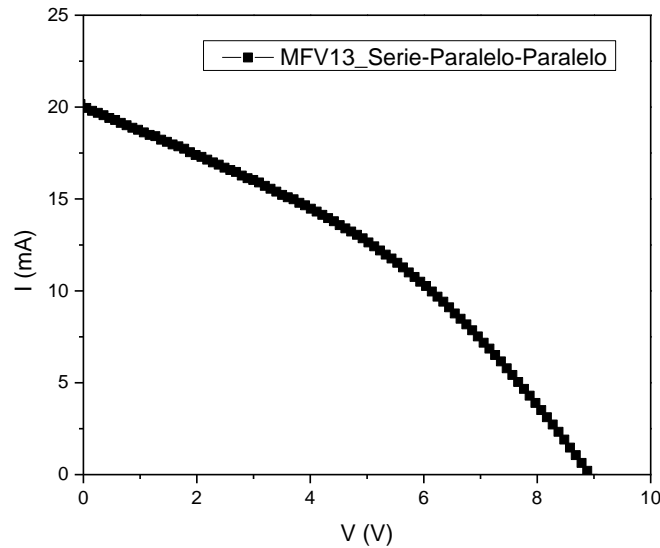
Gráfica 19. Interconexión en paralelo de los tres tercios del MFV 13 con tintura conductiva de Ni.

Para realizar la última medición del MFV13 se tuvo que volver a realizar una interconexión en paralelo con tintura conductiva de Ni.

Se realizó la última medición de la curva I-V del MFV13 donde nos percatamos que nuevamente la corriente aumentó y la tensión sigue manteniendo una medición en promedio de las tres mediciones anteriores dando como resultado los valores obtenidos en la tabla 13, en donde se muestran V_{OC} , I_{SC} , Factor de llenado (FF) y su Eficiencia (η) del MFV13 interconectado completo.

De las 102 subceldas que conforman al MFV13 se tuvieron que cancelar un total de 15 subceldas las cuales no se interconectaron por su baja eficiencia, tomando como referencia una eficiencia $\geq 0.8 \%$, cada subcelda tienen un valor promedio $V_{OC} = 0.62 \text{ V}$, $I_{SC} = 5 \text{ mA}$, $FF=40$ y una $\eta=1.2 \%$.

Al realizar las interconexiones con tintura conductiva de Ni de todo el MFV13 los resultados aumentaron como se observa en la gráfica 20 y tabla 13.



Gráfica 20. Interconexión en paralelo del MFV 13 completo con tintura conductiva de Ni.

Tabla 13. Parámetros curva I-V del MFV 13 completo con tintura conductiva de Ni.

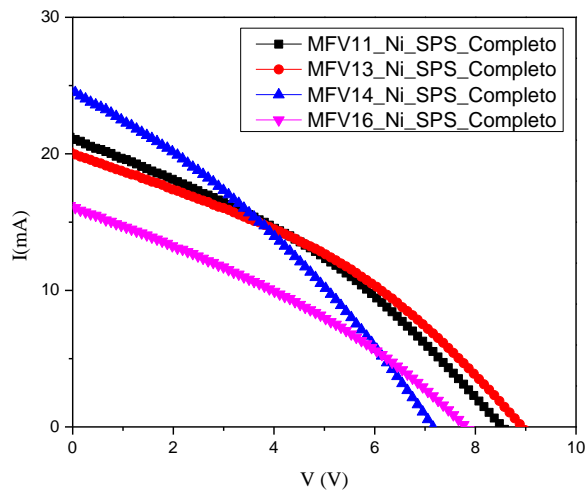
V_{oc} [V]	I_{sc} [mA]	Factor de llenado	Eficiencia
8.9	20	35.8	1.6

4.2. Interconexión de los cuatro módulos fotovoltaicos

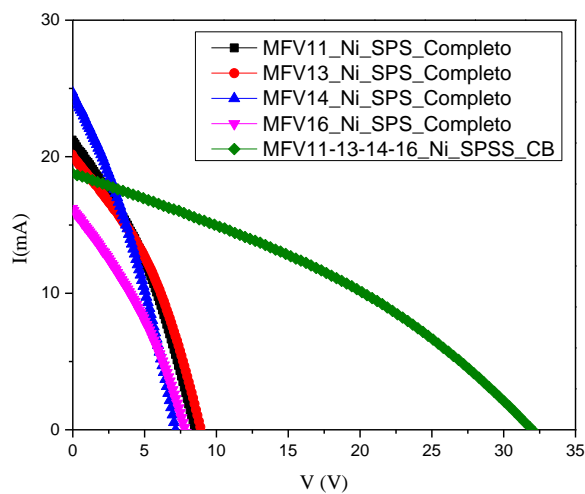
El mismo proceso que se realizó para el MFV11 se realizó para los MFV13, 14 y 16, los resultados se muestran a continuación son los obtenidos de las mediciones de las curvas I-V de los módulos MFV11, MFV13, MFV14 y MFV16 interconectados con tintura conductiva de Ni completos, entonces en la gráfica 21, se pueden visualizar los cuatro módulos por separado, posteriormente se interconectaron los cuatro módulos en serie, donde se le adaptaron dos terminales positiva (+) y negativa (-), posteriormente se realizó la medición de la curva I-V del módulo fotovoltaico completo con un área de 400 cm^2 , al ser interconectados los cuatro módulos en serie la tensión aumento y la corriente se promedió obteniendo un valor constante respecto a la tensión que aumento, en la gráfica 22, se muestran las curvas I-V de los cuatro módulos por separado y el módulo de 400 cm^2 y en la tabla 14, se confirman los resultados que se esperaban al interconectar los cuatro módulos

en serie para formar un módulo completo, pasando de tener en promedio un $V_{OC}=0.6V$ y $I_{SC}=5$ mA por subcelda a un $V_{OC}=31.95$ V y $I_{SC}=19$ mA como un módulo completo de 400 cm^2 .

Cada módulo tiene 102 subceldas dando un total de 408 subceldas sin tomar en cuenta las 67 subceldas que fueron aisladas debido a su eficiencia que fue menor al 0.8 % y se tienen 341 subceldas, las cuales al ser interconectadas aumentaron la tensión y la corriente.



Gráfica 21. Interconexión de los MFV11, MFV13, MFV14 y MFV16.



Gráfica 22. Interconexión en paralelo de los módulos MFV11, MFV13, MFV14 y MFV16 completo con tinta conductiva de Ni.

Tabla 14. Parámetros curva I-V en serie de los módulos MFV11, MFV13, MFV14, MFV16 y MFV completo con tintura conductiva de Ni.

V_{oc} [V]	I_{sc} [mA]	Factor de llenado	Eficiencia
31.95	19	34.1	1.3

En un análisis con respecto a los trabajos de tesis de licenciatura y maestría, que fueron parte fundamental para la elaboración de este trabajo de tesis en la tabla 15, se puede observar una comparación de los resultados finales obtenidos, el I_{sc} del RF53_Completo de la tesis de licenciatura es mayor porque tiene una interconexión en paralelo a diferencia del presente trabajo que esta interconectado en serie, serie, paralelo.

Tabla 15. Comparación de resultados obtenidos con respecto a los de los trabajos anteriores

Módulo	Área [cm²]	V_{oc} [V]	I_{sc} [mA]	FF	η (%)	P [mW]
RF52_Completo (Tesis maestría)	55.88	11.4	13.1	24.9	0.6	37.31
RF53_Completo (Tesis licenciatura)	55.88	6.7	44.39	28.1	1.6	-
MFV11_Completo	43	8.5	21	34.4	1.5	62.04
MFV13_Completo	43.5	8.9	20	35.8	1.6	63.87
MFV14_Completo	41	7.1	25	31.9	1.5	56.04
MFV16_Completo	42.5	7.8	16	32.3	1.0	40.54
MFV11-13-14-16 Completo	170	31.95	19	34.1	1.3	204.19

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

Se realizó el procesamiento, de aislado e interconexión de 4 MFV de 100 cm^2 de forma reproducible y controlada, esto se demuestra en las curvas I-V y las tablas de resultados de cada módulo fotovoltaico (MFV), cuyos parámetros fotovoltaicos (FV) característicos obtenidos fueron: $V_{OC} = 31.69 \text{ V}$, $I_{SC}=18.8 \text{ mA}$, $FF=34$, $\eta=1.3$ y $P_{max}=0.2 \text{ W}$. Cabe mencionar que actualmente no se ha reportado en nuestro país ningún prototipo de módulo fotovoltaico interconectado de estas dimensiones (400 cm^2) en donde se integren módulos híbridos de CdTe y PEDOT:PSS, y lo destacable de este trabajo, es que fue realizado en nuestra institución, la UACM en las instalaciones de la LACyTES.

Para cada uno de estos MFV se realizó su respectiva interconexión con tinta conductiva de Ni, no se realizó con Ag, por la poca existencia en el mercado lo que ocasionó que su precio fuese muy elevado, en consecuencia, los parámetros fotovoltaicos como el I_{SC} y la η se vieron disminuidos entre un 30% y 40%. Al realizar su interconexión en serie de cada módulo por separado en serie de 17 subceldas, por submódulo, los valores FV promedio de V_{OC} , I_{SC} , FF y η , obtenidos en el simulador solar solar Oriel Newport clase AAA Certificado, nos permitieron comprobar que al interconectar en serie se mantiene la corriente (I) y se sumó la tensión (V), siguiendo las leyes de los circuitos eléctricos y así mismo, al conectar en paralelo cada una de las 6 celdas de cada módulo se mantiene constante el V y se suma la I.

El prototipo del MFV de 400 cm^2 se encapsulo, pero no se obtuvo una respuesta favorable respecto a los resultados obtenidos antes de su encapsulado, esto se atribuye a la variación de la calidad de la resina entre un lote y otro, porque se realizó un encapsulado del MFV9 de 100 cm^2 y el resultado fue favorable, posteriormente al encapsular el módulo del presente trabajo se cortocircuito en el MFV14 y se atribuye a que el material se filtró hasta cortocircuitar el MFV por no tener la misma densidad del material utilizado.

La aportación principal del presente trabajo es el incremento en el FF, por medio de reducir el área de aprovechamiento, esto se observa a partir de los trabajos anteriores, donde se reportaron valores más bajos, en la tesis de maestría se reportó un $FF= 2.9$, en la tesis de licenciatura se reportó un $FF= 28.1$ y en el presente trabajo se obtuvo un promedio de

FF= 34.1. Otro aporte es la descripción a detalle de todos los procesos que conllevan a la elaboración de un MFV y de los equipos utilizados.

5.2. Trabajos a futuro

Con respecto al proceso de encapsulado, aun se presentan algunas inconsistencias en área de 400 cm² debido a que el control de calidad de la resina que se ha utilizado, presento diferentes resultados entre productos con diferentes fechas de elaboración y esto ocasionó que el fraguado sea diferente en densidad, lo que provoca que al colocar la primera capa en la parte trasera del MFV se cortocircuité, pero con lo que respecta a las pruebas de los fenómenos atmosféricos como son lluvia, viento y granizo en área de 100 cm², el encapsulado muestra una respuesta correcta, como se observa en la figura 36.

Se sugiere que antes de realizar este último proceso se realicen pruebas de encapsulado y hasta no encontrar un encapsulado que mantenga casi constantes los mismos parámetros fotovoltaicos, entonces no se encapsulen los prototipos que se llegaran a fabricar. Otro aspecto para considerar es que después de los seis meses de tener expuesto el MFV a la intemperie las 24 horas, comienza a presentar un color amarillo, lo que ocasiona que se sea menos eficiente.

En el momento que se tengan controlado el encapsulado, se pretende construir un quiosco en el plantel San Lorenzo Tezonco que permita a su comunidad cargar su teléfono celular y al mismo tiempo enlazarse mediante un código QR a un video donde se muestre todo el procedimiento que se lleva para la construcción del MFV y además se promueva el trabajo realizado por los estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería Energética (LISE).



Figura 36. MFV10 Encapsulado.

El MFV de 400 cm² mantuvo sus parámetros fotovoltaicos hasta antes del encapsulado de la parte posterior.

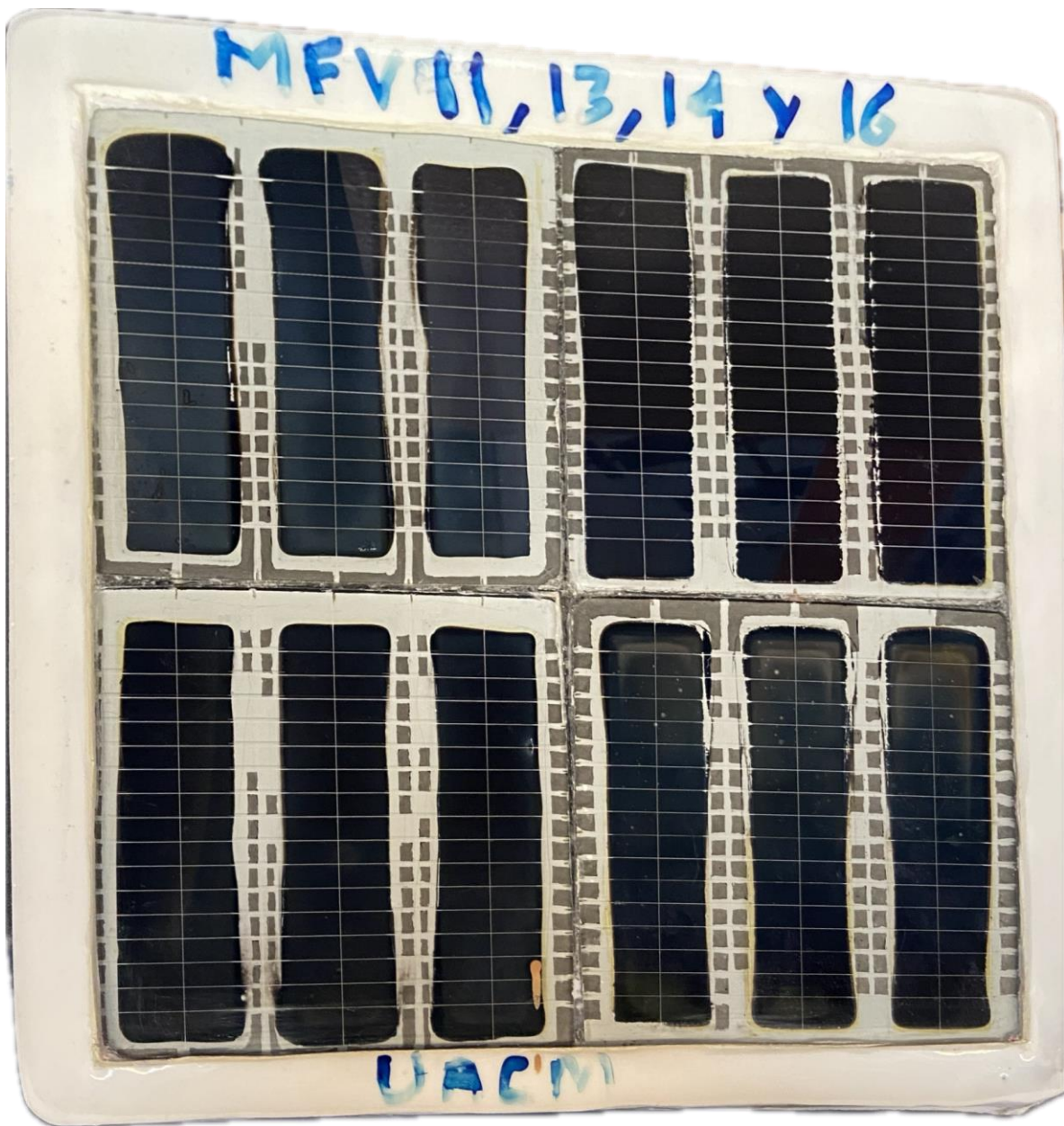


Figura 37. MFV 400 cm², encapsulado.

Referencias

- Albor M. L., Esquivel A., Ruiz A., González M., Hernández C., Santoyo J., Tufiño M., Rueda G., Vigil O y Contreras G. (14 de noviembre de 2021). CdTe mini-modules characterization and photovoltaic performance under outdoors conditions. Instituto Politécnico Nacional-Escuela Superior de Física y Matemáticas, Depto. de Física, Escuela Superior de Computo, Formación Básica, U.P.A.L.M. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Depto. de Física.
- Fierro J. A. (2021). Procesamiento, interconexión y encapsulado de prototipos de módulos fotovoltaicos nacionales de CdTe. Universidad Politécnica de Sinaloa. Tesis de Maestría.
- Karen Rodríguez Rosales, F. J. (2020). Energía solar fotovoltaica. Ciencia, (13 de enero de 2022) (pag.6).https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/online/X1_71_3_1267_EnergiaSolar.pdf
- Mendoza R., Rodríguez L.M., Del Oso J., Sastré J., Hernández M., Aguilera A. Hernández G. y G. (agosto 2022). Effect of thermal treatment and deposition conditions of ZnO by Radio Frequency Sputtering on the photovoltaic response of CdTe solar cells. Thin Solid Films. DOI: 10.1016/j.tsf.2022.139427
- Mendoza R. (2007). Desarrollo de celdas solares prototipo de CdTe con CdS procesado por baño químico. Tesis Doctoral. Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México. <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/825?show=full>
- N. Romero, A. B. (1999). A highly efficient and stable CdTe/CdS thin film solar cell. Solar Energy Materials. (25 de enero de 2023). (Pág. 8) baño químico. México: Instituto Politécnico Nacional. http://profs.sci.univr.it/~romeo/Publications/nromeo_99.pdf
- Nuñez A. (2022). Interconexión de prototipos de módulos fotovoltaicos híbridos de CdTe y PEDOT:PSS. UACM. Tesis Licenciatura.

- Galán O. (2004). Influencia del tratamiento térmico con CdCl_2 sobre las características finales de las celdas solares CdS/CdTe procesadas por transporte de vapor en espacio cercano. (29 de noviembre de 2021). (págs. 353-357). Revista mexicana de física. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0035_001X2004000400006&script=sci_abstract
- Pérez T. (s.f.). Películas nanoestructuras de óxido de zinc (ZnO). En Películas nanoestructuras de óxido de zinc (ZnO). (15 de noviembre de 2021). (Págs. 416-421). Scientia et technica. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84920503076.pdf>
- Ramírez M. (24 de febrero del 2021). Top Energy: una alternativa en energías renovables. CONECTA. Tecnológico de Monterrey. <https://conecta.tec.mx/es/noticias/aguascalientes/emprendedores/top-energy-una-alternativa-en-energias-renovables>
- Rodríguez K., De Moure F. y Quiñones J. (julio-septiembre de 2020). Energía solar fotovoltaica. Ciencia. Volumen 71 número 3. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/online/X1_71_3_1267_EnergiaSolar.pdf
- Romeo A. y Artegiani E. (18 de marzo de 2021). CdTe-Based Thin Film Solar Cells Past, Present and Future Energies. MDPI, Energies. <https://doi.org/10.3390/en1406168>
- Sánchez A. (12 de noviembre de 2022). México anuncia en la COP27 nuevo recorte de emisiones de carbono. La Jornada. Recuperado de: <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/11/12/politica/mexico-anuncia-en-la-cop27-nuevo-recorte-de-emisiones-de-carbono/?from=homeonline&block=primeraojeada>
- Sánchez, M. e. (2022). Manual de procedimiento para el correcto lavado de vidrios. México: Universidad Autónoma de la Ciudad de México.
- SENER. (2016). Prospectiva de Energías Renovables. Secretaría de Energía https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2016-2030.pdf

SEGOB. (8 de julio del 2022). Programa Sectorial de Energía 2020-2024. Secretaría de Energía. Programa Sectorial derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024.https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596374&fecha=08/07/2020#gsc.tab=0

SEMARNAT. (16 de septiembre de 2016). México entregó a la ONU la ratificación del Acuerdo de París. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/mexico-entrego-a-la-onu-la-ratificacion-del-acuerdo-de-paris>

Solar, F. (2013). CENER. Tecnología Fotovoltaica de CdTe de First Solar: Evaluación Medioambiental, de Salud y Seguridad. (13 de febrero de 2023). Fundación de Chile:

https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/Sustainability-Peer-Reviews/ES-First-Solar-Peer-Review-CENER_FCh_Espanol_Informe_Final.ashx

UNAM. (2018). Antecedentes LIFyCC. Coordinación de Investigación Científica. <http://labunam.unam.mx/micrositios/LIFyCC/antecedentes.php?il=>

Vallejo A. (2011). Desarrollo de materiales fotovoltaicos usados como ventana óptica en celdas solares. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7728>

Anexos

Anexo 1. Equipos y materiales

En tabla 16 se muestran los equipos, materiales y herramientas que se utilizaron en el proceso de elaboración del MFV.

Tabla 16. Equipos, materiales y herramientas.

Equipos	Herramientas	Eléctrico	Aislamiento
Equipos de depósito de materiales semiconductores y metálicos	Desarmador, plano y cruz	Fusibles	Policat
Simulador solar Oriel Newport clase AAA Certificado.	Pinzas	Borneras	Catalizador
Balanza analítica de precisión	Flexómetro	Cable No. 10	Isoforona
Plancha de calentamiento digital	Arco para segueta	Cinta de cobre	Acondicionador
Multímetro	Tijeras	Soldadura	Tinta conductiva
Estación de soldadura	Limatón		
Campana de extracción	Vaso de precipitado		
Molde encapsulado 1 de 100 cm ²	Varilla de agitación		
Molde encapsulado 2 de 400 cm ²	Pipeta graduada		
Plantilla de acero inoxidable	Pistola de silicón		

Anexo 2. Proceso de lavado

1. Preparar una solución de jabón alcalino en el vaso de precipitado de 100 ml, en proporción 2 a 10%, es decir, por cada 2 ml de jabón vierte 20 ml de agua destilada.
2. Precalentar 1200 ml de agua destilada en el vaso de precipitado de 2000 ml a 80 °C en el hotplate y taparlo con un trozo de aluminio.
3. Verter 1000 ml de agua destilada en el vaso de precipitado del mismo volumen, tener listo el vaso de 100 ml ya que se utilizará para el punto 6.

4. Enjuagar cada vidrio con agua común y frota ambas caras con los dedos usando guantes durante 1 minuto, a manera de retirar contaminantes que estén presentes en la superficie del vidrio.
5. Posteriormente con ayuda de una gasa mojada en la solución jabonosa preparada en el punto 1, frotar los vidrios por ambas caras durante 2 minutos.
6. Cada vidrio se enjuaga con abundante agua destilada para retirar el exceso de jabón, para ello, usar el vaso de 100 ml para tomar la cantidad suficiente de agua contenida en el vaso de 1000 ml preparado en el punto 3; enjuagar después, cada vidrio sin restos de jabón y se colocará en el porta-substratos de teflón, este se introduce en 1200 ml de agua destilada en el vaso de 2000 ml y verificar que el nivel de agua cubra todos los vidrios y que todos se encuentren bien colocados en las ranuras del porta-substrato.
7. Cuidadosamente trasladar a la campana número 1, el vaso de precipitado con los vidrios sumergidos cambiar el porta-substrato al agua destilada precalentada a 80 °C y subir la temperatura a 110 °C, en este punto se da inicio al proceso de calentamiento; este proceso puede demorar más de 20 minutos, ya que el agua se lleva al punto de ebullición, una vez alcanzado el hervor, se debe espera un tiempo de 10 minutos.
8. Durante el proceso de calentamiento del agua, se debe preparar la tina del baño ultrasónico, y cerciorarse del nivel del agua para su funcionamiento, marcado en la tina para evitar derrames,
9. Una vez concluido el proceso de calentamiento del agua, con cuidado ingresar el vaso de precipitado al baño ultrasónico durante 10 minutos.
10. En el transcurso del baño ultrasónico, preparar el segundo vaso de precipitado de 2000 ml con 1200 ml de acetona, para continuar con el calentamiento; es importante seguir el orden de los líquidos durante todo el proceso ya que cada uno tiene una función específica. El agua utilizada en los puntos anteriores se puede desechar al desagüe sin ningún problema.
11. Una vez terminado el baño ultrasónico, cambiar el porta-substratos a los 1200 ml de acetona y colocar el vaso en el hotplate a 60 °C, al hasta llegar al hervor y esperar nuevamente 10 minutos.

12. Concluido el proceso de calentamiento de la acetona, se debe ingresar el vaso de precipitado al baño ultrasónico durante 10 minutos.
13. Durante el baño ultrasónico de la acetona, preparar el vaso de precipitado de 2000 ml, con 1200 ml de alcohol isopropílico.
14. Terminando el baño ultrasónico de la acetona, sumergir el porta-substrato en 1200 ml de alcohol isopropílico y colocar en el hotplate a una temperatura de 85 °C, una vez llegado al hervor esperar durante 10 minutos.
15. Durante el proceso de calentamiento del alcohol, con ayuda del embudo se puede verter la acetona a uno de los envases color ámbar marcados con la leyenda “acetona o alcohol reciclados” según sea el caso. Terminando el calentamiento del alcohol cambiar el vaso al baño ultrasónico y esperar durante 10 minutos.
16. Al concluir el baño ultrasónico del alcohol, retirar el vaso de precipitado, a continuación, se procede a sacar los vidrios, esto se hará uno por uno, y se recomienda que se use guantes nuevos en este último paso, ya que, al manipularlos con los guantes sucios, se corre el riesgo de contaminar los vidrios al sacarlos del alcohol. Con ayuda de las pinzas sostener de una esquina y con cuidado se tiene que retirar del alcohol y secarlos con nitrógeno.
17. Una vez secos inspeccionar que los vidrios se encuentren bien lavados y que no tengan algún desperfecto como rayones o contaminantes, si todo esta correcto proceder a envolver los vidrios en papel aluminio.
18. Al terminar de envolver los vidrios hay que colocarlos en una bolsa ziploc y etiquetarlos con la siguiente leyenda: Vidrios limpios, calibre Tec 10 y fecha.
19. Recordar de vaciar cada fluido utilizado en su respectivo envase de reciclado (Sánchez, 2022).

Anexo 3. Diseño y preparación de plantillas

Las plantillas de acero inoxidable se diseñaron con el objetivo de aprovechar al máximo el área del vidrio sustrato que es de 100 cm² y se pudieran realizar los depósitos a mayor temperatura, la primera plantilla que se mandó a fabricar era para medios módulos, posteriormente en base a la literatura existente se tomó la decisión de dividir el módulo en tercios. En la figura 38 se puede observar el modelo de la plantilla realizado en AutoCAD,

en la figura 39 se observa parte del proceso que es retirar los residuos de material que quedan después de su elaboración, posteriormente pasa a un proceso de lavado similar al del vidrio sustrato descrito en el Anexo 2 y en la figura 40 se observa la plantilla lista para realizar el depósito.

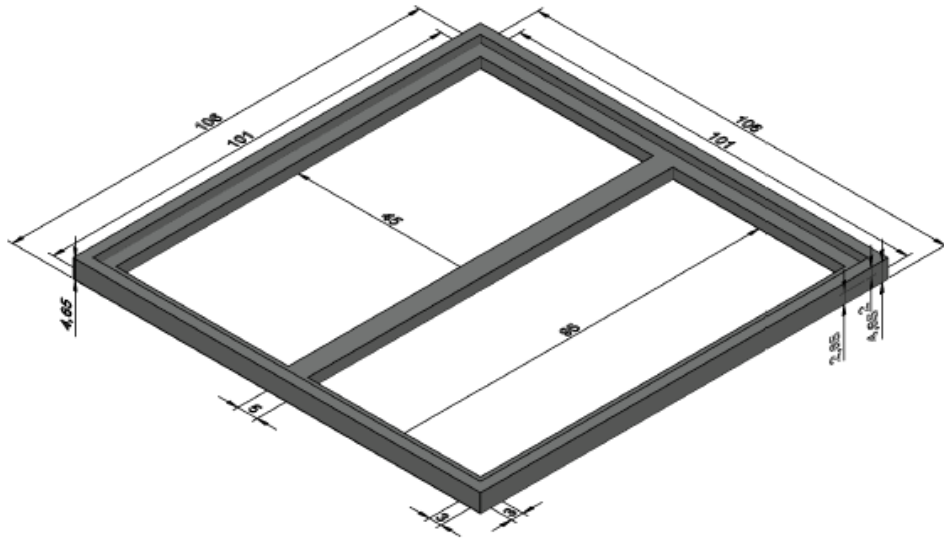


Figura 38. Plantilla para medios módulos.

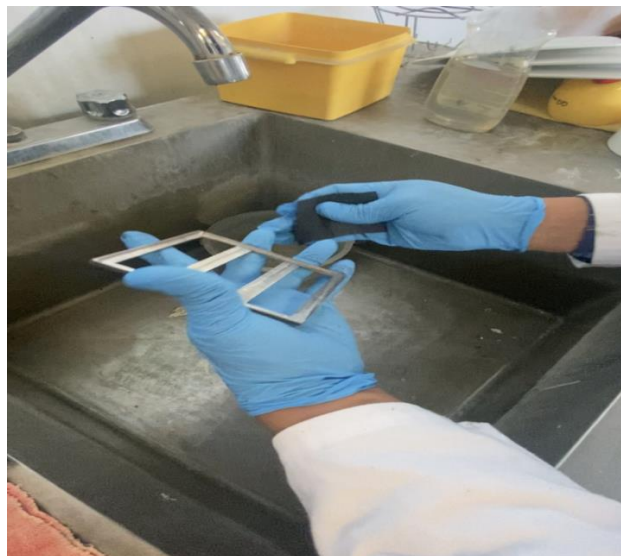


Figura 39. Lijado de plantilla.



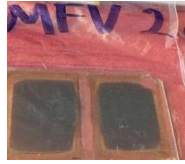

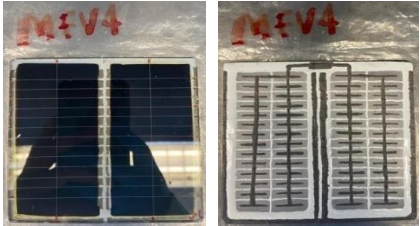
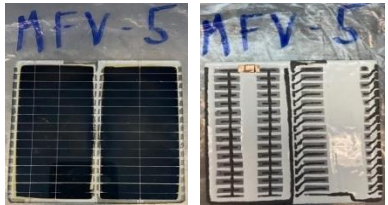
Figura 40. Plantilla limpia colocada en base de grafito.


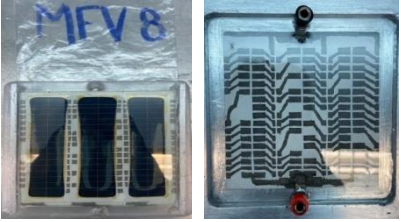
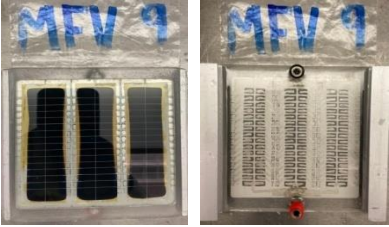
Anexo 4. Descripción del resultado de las pruebas experimentales

En la tabla 17, se muestra la evolución del proceso de depósito, aislamiento e interconexión, desde los primeros depósitos de capacitación y hasta el MFV11 en el cual ya se tenía el control de los procesos y los MFV'S siguientes ya fueron los que se utilizaron para mostrar los resultados en este trabajo de tesis.

Tabla 17. Muestras de los depósitos y procesos realizados durante el proceso experimental.

Nombre de la Muestra	Depósitos Realizados	Estado Final	Evidencia
MFV-1	ZnO+CdS+TT CdTe+CdCl ₂ +TT PEDOT+TT Contactos de Cu+Mo Rayado Laser	Únicamente se realizó el rayado laser para dividir las 11 subceldas del medio modulo, como el CdTe se salió de la plantilla se cortocircuito el módulo. Hay I-V de celdas	

<p>MFV-2</p>	<p>ZnO+CdS+TT CdTe</p>	<p>No se completó (no hay I-V) Conel Mtro. Adán para pruebas de rayado láser</p>	
<p>MFV-3</p>	<p>ZnO+CdS+TT CdTe</p>	<p>No se completó (no hay I-V) Con el Mtro. Adán para pruebas de rayado láser</p>	
<p>MFV-4</p>	<p>ZnO+CdS+TT CdTe+CdCl₂+TT PEDOT+TT Contactos de Cu+Mo Rayado Laser Aislamiento (Policat) Interconexión (Ni)</p>	<p>Todo el proceso de los depósitos fue bueno, pero a la hora de interconectar las 2 mitades con la tintura de Ni se cortocircuitó el módulo completo Hay I-V de medios módulos</p>	
<p>MFV-5</p>	<p>ZnO+CdS+TT CdTe+CdCl₂+TT PEDOT+TT Contactos de Cu+Mo Rayado Laser Aislamiento (Policat) Interconexión (Ni) Cinta de Cu</p>	<p>La mitad del módulo se interconecta en paralelo y la otra mitad en serie para saber si el FF era mejor en serie o paralelo, el FF es mejor en serie. Área de la última columna menor, para comparar con el artículo de la Dra. Lourdes. Hay I-V (A=10cm²) V_{max}=7.5 V, I_{max}=1.6 mA, FF=0.36, P_{max}=12 mW, η=1.2%</p>	
<p>MFV-6</p>		<p>Se rompió el módulo a la mitad debido a dos factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La plantilla junto con el vidrio se atornilló con la llave Allen • Se incrementó la temperatura a 300 °C <p>No se logró el crecimiento de ningún material.</p>	

<p>MFV-7</p>	<p>ZnO+CdS+TT CdTe+CdCl₂+TT PEDOT+TT Contactos de Cu+Mo Rayado Laser Aislamiento (Policat) Interconexión (Ni) Cinta de Cu con Borneras Encapsulado</p>	<p>Todo el proceso de los depósitos y la interconexión con la tintura de Ni se realizó correctamente, pero a la hora de encapsular la corriente se cayó y solo daba respuesta el segundo tercio del módulo.</p> <p>Hay I-V (A= 48cm²) V_{max}=13.3V, I_{max}=7.8mA, FF=0.41, P_{max}=103mW, η=2.4%</p>	
<p>MFV-8</p>	<p>ZnO+CdS+TT CdTe+CdCl₂+TT PEDOT+TT Contactos de Cu+Mo Rayado Laser Aislamiento (Policat) Interconexión (Ni) Cinta de Cu con Borneras Encapsulado</p>	<p>Todo el proceso de los depósitos y la interconexión con la tintura de Ni se realizó correctamente junto con el encapsulado, teniendo dominado el proceso completo hasta su encapsulado.</p> <p>Hay I-V (A= 48cm²) V_{max}=5.4 V, I_{max}=3.2 mA, FF=0.37, P_{max}=17 mW, η=0.5%</p>	
<p>MFV-9</p>	<p>ZnO+CdS+TT CdTe+CdCl₂+TT PEDOT+TT Contactos de Cu+Mo Rayado Laser Aislamiento (Policat) Interconexión (Ni) Cinta de Cu con Borneras Encapsulado</p>	<p>Todo el proceso de los depósitos y la interconexión con la tintura de Ag se realizó correctamente junto con el encapsulado, teniendo dominado el proceso completo hasta su encapsulado.</p> <p>Hay I-V (A= 48cm²) V_{max}=5.4V, I_{max}=14.7mA, FF=0.33, P_{max}=79 mW, η=2.1%</p>	
<p>MFV-10</p>	<p>ZnO+CdS</p>	<p>Tuvo varios PINHOLES debido a que la mufla no estaba limpia a la hora de su uso, debido a esto se canceló su proceso de manufactura.</p>	