

The logo of the Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) is displayed in white text on a red square background. It consists of the letters 'UACM' in a bold, sans-serif font.

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

PROGRAMA DE ENERGÍA

**Efecto del Sb_2Te_3 en la degradación de las celdas
solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS**

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

ESTEBAN SALVADOR DIAZ SEGURA

DIRECTOR:

DR. ROGELIO MENDOZA PÉREZ

Ciudad de México, marzo de 2025.

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.

INTEGRACION DEL JURADO:

Presidente: Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo

Secretario: Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Vocal: Dr. José Joaquín Lizardi Del Ángel

1^{er.} Suplente:

2^{do.} Suplente:

Lugar donde se realizó la carrera:

PLANTEL SAN LORENZO TEZONCO, UACM.

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Universidad Autónoma de la Ciudad de México

“No puedes volver atrás y cambiar el principio, pero puedes comenzar
dónde estás y cambiar el final”

-Epicteto

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México y a su programa de becas por brindarme todas las herramientas para llegar a este punto académico, a los buenos profesores que me brindaron todo su apoyo y conocimientos, especialmente a mi director de Tesis el Dr. Rogelio Mendoza Pérez, así como al Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo, al laboratorio LACyTES por abrirme sus puertas y permitirme aprender, llenarme de experiencia y conocer buenos compañeros que me brindaron su apoyo cuando lo necesite. Agradezco a los proyectos de investigación del colegio de Ciencia y Tecnología UACM-CCyT-2023-IMP-01 y UACM CCyT-CON-04. Y gracias al Maestro Jesús Adán de la ESFM del IPN, por el rayado láser.

Agradezco infinitamente a mi madre Luz del Carmen Segura Hernández. Esta tesis es el resultado de todo el amor que me brindas, apoyo incondicional y sacrificio a lo largo de este camino. Por tus palabras de aliento, tu perseverancia, por haberme dado los valores y herramientas para esta vida, eres mi fuente inagotable de fortaleza y amor en mi búsqueda de conocimiento. A través de tus enseñanzas y cariño, has dejado una gran huella que perdurara por siempre en mi vida, mi éxito académico es un reflejo de toda tu dedicación. Te amo con toda mi alma y esta tesis es mi modesta forma de agradecerte todo lo que has hecho por mí.

Agradezco a mi padre Salvador Diaz Valadez quien me ha apoyado en todo lo posible, a mis hermanos y a mi familia en general. Un agradecimiento especial a mi tía Leticia Segura Hernández por el apoyo de la impresión de esta tesis y en especial a mi abuelito Jaime Segura Silva y mis tíos Fernando Segura Hernández y Daniel Segura Hernández, que desafortunadamente ya no están con nosotros, pero pese a eso, sé que estarían muy orgullosos de mí, porque en vida lo estaban.

Agradezco a Verónica Lizet Torres Núñez porque ha estado conmigo en esta última etapa de mi vida universitaria, apoyándome incondicionalmente en cada proceso, enseñándome a reconocer, valorar y festejar cada uno de mis logros. Siempre te estaré agradecido de todo lo aprendido.

Agradezco a Don Jorge por haberme permitido trabajar mientras curse la universidad, por permitirme hacer tareas y estudiar en el trabajo cuando no había muchas cosas por hacer.

Pero sobre todo quiero reconocerme y agradecer a mí, que pese a lo difícil que ha sido la vida siempre seguí adelante, este es uno de mis mayores logros y me siento muy orgulloso de haber llegado hasta este punto. Pese a que es el final de una etapa sé que también es el principio de nuevas metas por conquistar.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS	2
ÍNDICE DE GRÁFICAS	3
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	6
Cambio climático y aumento de la temperatura mundial.....	6
Soluciones para combatir la dependencia de combustibles fósiles	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
JUSTIFICACIÓN.....	8
HIPÓTESIS	9
OBJETIVOS.....	9
Objetivo general	9
Objetivo particular	9
CAPÍTULO 1. ENERGÍA.....	10
1.1. Tipos de energía	10
1.1.1. Energía no renovable.....	10
1.1.2. Energía renovable.....	11
1.2. Energía fotovoltaica	11
CAPÍTULO 2. CONTEXTO ENERGÉTICO EN MÉXICO.....	13
2.1. La energía eléctrica a través del tiempo	13
2.2. Potencial energético en México	15
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	18
3.1. Generaciones de celdas solares	18
3.1. Celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS	19
3.1.1. Depósito de PEDOT:PSS – Sobre CdTe.....	21
3.2. Teluro de antimonio (Sb_2Te_3)	23
3.3. Sputtering de corriente directa (Sp-DC)	23
3.3.1. Depósito del polímero PEDOT:PSS sobre Sb_2Te_3	26
3.4. Perfilometría.....	31
3.5. Medición I vs. V.....	31
3.6. Análisis de parámetros fotovoltaicos	32
3.6.1. Voltaje en circuito abierto (V_{oc}).....	33
3.6.2. Densidad de corriente (J_{sc})	33

3.6.3. Factor de llenado (FF).....	33
3.6.4. Eficiencia fotovoltaica (η).....	33
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	34
4.1. Estructura	35
4.2. Preparación y limpieza de los sustratos	35
4.2.1. Cortado de vidrios TEC15.....	36
4.2.2. Lijado de vidrios TEC15	36
4.2.3. Limpieza del sustrato TEC15 – SnO ₂ :F	37
4.2.4. Depósito de ZnO y CdS por Sputtering-RF	38
4.2.5. Depósito de CdTe CSS.....	39
4.2.6. Depósito de CdCl ₂ + TT (CSVT) + lavado.....	40
4.2.7. Depósito de Sb ₂ Te ₃ por Sputtering-DC.....	41
4.2.8. Depósito del PEDOT:PSS por Spin Coating +TT	42
4.2.9. Depósito de Cu y Mo por Sputtering-DC.....	43
4.2.10. Equipo de caracterización I vs. V.....	43
4.2.11. Medición periódica.....	44
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
5.1. Caracterización periódica I vs. V	45
5.1.1. Primera medición	45
5.1.2. Segunda medición	49
5.1.3. Tercera medición.....	51
5.2. Gráficas I vs. V	53
5.2.1. Primera medición curvas J vs. I (04/05/2023).....	53
5.2.2. Segunda medición curvas J vs. I (10/10/2023)	54
5.2.3. Tercera medición curvas J vs. I (15/02/2024).....	56
5.2.4. Comparativa V _{oc} (Espesores)	58
5.2.5. Comparativa V _{oc} (Temperatura).....	59
5.2.6. Promedios de primera, segunda y tercera medición (V _{oc} , J _{sc} , FF, Eficiencia)	60
5.2.7. Promedios con respecto al tiempo (V _{oc} , J _{sc} , FF, Eficiencia)	64
5.2.8. Promedios en conjunto con respecto al tiempo (V _{oc} , J _{sc} , FF, Eficiencia)	67
CONCLUSIONES.....	69
PERSPECTIVAS Y TRABAJOS A FUTURO	70
REFERENCIAS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Consumo energético por combustible.	16
FIGURA 2. Capacidad y generación en centrales solares 2017.....	17
FIGURA 3. Frasco de telurio de cadmio ocupado en el laboratorio LACyTES.	21
FIGURA 4. Pinholes en celda solar después del depósito de CdTe.....	21
FIGURA 5. Polímero PEDOT:PSS.....	22
FIGURA 7. Esquema del diodo RF y DC del equipo Sputtering.....	24
FIGURA 8. Principio de erosión del equipo de Sputtering.....	25
FIGURA 9. Sistema de erosión del equipo Sputtering.....	26
FIGURA 10. Perfilómetro de LACyTES.	31
FIGURA 11. Procedimiento para la elaboración de celdas solares híbridas de CdTe y PEDOT:PSS.	34
FIGURA 12. Estructura de las celdas solares híbridas de CdTe – PEDOT:PSS	35
FIGURA 13. Cortadora de vidrio alimentada por aire comprimido CVRF-1.2.....	36
FIGURA 14. Vidrio TEC 15 sin lijar..	36
FIGURA 15. Vidrio TEC 15 lijado.	36
FIGURA 16. Lavado con jabón alcalino.....	37
FIGURA 17 Baño ultrasónico.....	37
FIGURA 18. Calentamiento de agua destilada.	37
FIGURA 19 Vidrios limpios, preparados para su secado.	37
FIGURA 20. 13 mg de CdTe para su depósito.....	40
FIGURA 21. CdTe en chalupa de grafito.....	40
FIGURA 22. Equipo de caracterización I vs. V.....	44
FIGURA 23. Calibración de equipo de caracterización I vs. V..	44

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Valores de rugosidad para las muestras Sb_2Te_3 a diferentes presiones de los Sp RF y DC.....	27
TABLA 2. Mediciones de EDS y resistividad para muestras de Sb_2Te_3 a diferentes presiones de las técnicas de RF y DC	28
TABLA 3. Parámetros fotovoltaicos para celdas solares de películas delgadas de Sb_2Te_3 depositadas mediante sistema de RF y DC a diferentes presiones.....	30
TABLA 4. Condiciones de depósito del ZnO y CdS por Sp-RF.....	38
TABLA 5. Parámetros de depósito del CdTe mediante el equipo CSS. Conjunto 1, 2 y 3.	39
TABLA 6. Parámetros de depósito del $CdCl_2$ mediante el equipo CSVT. Conjunto 1, 2 y 3.	40
TABLA 7. Parámetros de depósito del Sb_2Te_3 mediante el equipo Sp DC.	41
TABLA 8. Espesor del CdTe y espesor del Sb_2Te_3 considerado una temperatura $T_s=200\text{ }^\circ\text{C}$ y un $d=100\text{ nm}$ constante.....	42
TABLA 9. Parámetros de depósito del PEDOT:PSS mediante el equipo Spin Coating más tratamiento térmico. Conjunto 1 y 2.....	43
TABLA 10. Primera medición en simulador solar 04/05/2023.	45
TABLA 11. Segunda medición en simulador solar 10/10/2023.	49
TABLA 12. Tercera medición en simulador solar 15/02/2024.....	51

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. Patrones de X-ray de Sb_2Te_3 depositadas por Sp-DC a diferentes presiones.	28
GRÁFICA 2. Composición de %Sb y %Te para muestras de DC Sb_2Te_3 en función de la presión de depósito.	29
GRÁFICA 3. J vs. V para celdas solares con Sb_2Te_3 a diferentes presiones de depósito....	30
GRÁFICA 4. Curva I vs. V de una celda solar con sus principales parámetros.	32
GRÁFICA 5. Curvas de J vs. V para las celdas solares obtenidas: a) variando el espesor del sb_2te_3 , b) variando la temperatura de sustrato.	53
GRÁFICA 6. Curvas de J vs. V de la tercera medición, para las celdas solares seleccionadas por sus características óptimas para un seguimiento a través del tiempo.	55
GRÁFICA 7. Curvas de j vs. v de la tercera medición, para las celdas solares seleccionadas por sus características óptimas para un seguimiento a través del tiempo.....	57
GRÁFICA 8. Gráficas comparativas de V_{oc} del conjunto de espesores, con respecto a sus contactos.	58
GRÁFICA 9. Gráficas comparativas de V_{oc} del conjunto de temperatura, a) primera medición con respecto a temperatura b) segunda medición con respecto a sus contactos c) tercera medición con respecto a sus contactos.	59
GRÁFICA 10. Gráficas de V_{oc} promedio (primera medición 04/05/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.	60
GRÁFICA 11. Gráficas de V_{oc} promedio (segunda medición 10/10/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.	60
GRÁFICA 12. Gráficas de V_{oc} promedio (tercera medición 15/02/2024), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.....	60
GRÁFICA 13. Gráficas de J_{sc} promedio (primera medición 04/05/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.	61

GRÁFICA 14. Gráficas de J_{sc} promedio (segunda medición 10/10/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.	61
GRÁFICA 15. Gráficas de J_{sc} promedio (tercera medición 15/02/2024), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.....	61
GRÁFICA 16. Gráficas de FF promedio (primera medición 04/05/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.	62
GRÁFICA 17. Gráficas de FF promedio (segunda medición 10/10/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.	62
GRÁFICA 18. Gráficas de FF promedio (tercera medición 15/02/2024), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.	62
GRÁFICA 19. Gráficas de eficiencia promedio (primera medición 04/05/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.	63
GRÁFICA 20. Gráficas de eficiencia promedio (segunda medición 10/10/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C. .	63
GRÁFICA 21. Gráficas de eficiencia promedio (tercera medición 15/02/2024), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.	63
GRÁFICA 22. Gráficas de V_{oc} promedio con respecto al tiempo 50 nm de Sb_2Te_3	64
GRÁFICA 23. Gráficas de J_{sc} promedio con respecto al tiempo 50 nm de Sb_2Te_3	65
GRÁFICA 24. Gráficas de FF promedio con respecto al tiempo 50 nm de Sb_2Te_3	65
GRÁFICA 25. Gráficas de eficiencia promedio con respecto al tiempo 50 nm de Sb_2Te_3 . ..	66
GRÁFICA 26. Gráficas en conjunto de V_{oc} promedio con respecto al tiempo.....	67
GR-ÁFICA 27. Gráficas en conjunto de J_{sc} promedio con respecto al tiempo.....	67
GRÁFICA 28. Gráficas en conjunto de FF promedio con respecto al tiempo.....	68
GRÁFICA 29. Gráficas en conjunto de eficiencia promedio con respecto al tiempo.....	68

RESUMEN

A lo largo de este trabajo se elaboraron nueve celdas solares híbridas a base de Teluro de Cadmio (CdTe) depositado mediante el equipo de sublimación de espacio cercano (CSS), y del polímero semiconductor orgánico Poli(3,4-etilendioxitiofeno): poli(estirensulfonato) (PEDOT:PSS) mediante la técnica depósito por centrifugado con el uso de un sistema de Spin Coating; a 8 de las nueve celdas se les depositó una película delgada de Teluro de Antimonio (Sb_2Te_3) por medio del equipo de erosión catódica magnetoplanar en modo de corriente directa (Sputtering-DC), variando el espesor de esta película delgada y la temperatura del sustrato durante el depósito, la novena celda no se le depositó Sb_2Te_3 ya que fue la celda de referencia. Los espesores del Sb_2Te_3 se variaron desde los 25 hasta los 125 nm, en intervalos de 25 nm a una temperatura de sustrato constante de 200 °C; mientras que, la variación de la temperatura de sustrato fue de 25 °C (temperatura ambiente), 200 °C, 300 °C y 400 °C, a un espesor del Sb_2Te_3 constante de 100 nm.

El desarrollo se llevó a cabo en el laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentables (LACyTES) de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Las celdas solares se desarrollaron en áreas de una pulgada cuadrada (2.5 cm x 2.5 cm) con un espesor del sustrato de vidrio de 2 mm y la estructura que se empleó fue la configuración de superestrato:

$\text{SnO}_2:\text{F} / \text{ZnO}+\text{CdS} / \text{CdTe}+\text{CdCl}_2 / \text{Sb}_2\text{Te}_3 / \text{PEDOT:PSS} / \text{Cu} - \text{Mo}$.

El Sb_2Te_3 se colocó después del tratamiento térmico del CdTe con CdCl_2 y antes del depósito del polímero conductor PEDOT:PSS y de los contactos posteriores de Cobre (Cu) Molibdeno (Mo). La razón de depositar el Sb_2Te_3 en la anterior configuración de la celda solar es para que actué como una capa buffer entre el CdTe y el PEDOT:PSS, con el propósito de evitar la degradación de estas celdas solares híbridas, al momento de poner el polímero semiconductor orgánico. Se obtuvieron celdas fotovoltaicas con una eficiencia fotovoltaica de alrededor del 13%, voltaje a circuito abierto cercano a los 800 mV, densidad de corriente de alrededor de 30 mA/cm² y un factor de llenado alrededor de 0.50.

Por último, se realizó un rayado laser para delimitar los 8 contactos y disminuir el error en la medición de la densidad de corriente. Las celdas solares se caracterizaron con la medición I vs. V de forma periódica durante 18 meses, para observar su posible degradación en la respuesta fotovoltaica.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El descubrimiento de nuevas tecnologías ha requerido un mayor consumo de energía, incluyendo el crecimiento de la población y con ella el aumento de la demanda energética, esto ha implicado una sobre explotación de las llamadas energías convencionales y por ende un aumento en su uso, producción y consumo, incrementando la contaminación de nuestro planeta, generando la problemática del calentamiento global. Por lo anterior, el ser humano ha buscado la obtención de energía cada vez más limpia y renovable. Una de las energías renovables más prometedoras es la energía fotovoltaica que se aprovecha mediante las llamadas celdas solares, estos dispositivos fotovoltaicos han sido clasificados con base a su aparición como celdas solares de primera, segunda, tercera y hasta cuarta generación.

México está entre los cinco países del mundo con mayor potencial solar, aunque tiene grandes variaciones de disponibilidad debido a la diversidad climatológica de su territorio, las cuales debemos conocer a detalle para explotar de manera adecuada la energía solar, aseguró Mauro Valdés Barrón, jefe del Servicio Solarimétrico e investigador (López Suárez, 2022).

“En estados como Sonora y Chihuahua existe abundancia del recurso, con fuertes variaciones estacionales; en cambio hay otras zonas con gran cantidad de energía solar, como son las zonas áridas de Puebla y Oaxaca y buena parte de Morelos, que son excelentes para su explotación a lo largo del año”. De cuánto hay y en dónde va a depender de la tecnología que se utilice para aprovechar la energía solar. “La tecnología que más se utiliza son los paneles fotovoltaicos, que han tenido un gran desarrollo en los últimos años, con eficiencias superiores a 20 por ciento, las cuales se están incrementando cada vez más” (López Suárez, 2022).

Cambio climático y aumento de la temperatura mundial

Desde el inicio de la era industrial, hace aproximadamente 150 años, la superficie terrestre ha aumentado su temperatura en 0.6 °C y la altura del mar ha crecido entre 10 y 12 centímetros (Tomás Perales, 2012).

Sin embargo, como dice IRENA en PERSPECTIVAS MUNDIALES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA DE AQUÍ A 2050: “Para culminar

la transición energética mundial a tiempo de evitar un cambio climático catastrófico es necesario intensificar la cooperación internacional. El objetivo es que los gobiernos y otras instituciones puedan adoptar una amplia gama de políticas ambiciosas, destinadas todas ellas a fortalecer la determinación pública y a garantizar que nadie se quede atrás” (Fragoso Altamirano, 2020).

Soluciones para combatir la dependencia de combustibles fósiles

Uno de las mejores formas de evitar la escasez energética y reducir los impactos negativos ambientales y de salud de nuestras tecnologías actuales es simplemente, utilizar menos energía. Los esfuerzos de conservación energética benefician tanto a la sociedad como al medio ambiente pero el progreso de la civilización moderna depende en gran medida del aprovechamiento de las fuentes de energía. Las fuentes energéticas sustentables, la eficiencia energética y el manejo y uso sustentable de energía son sin duda las opciones deseables para la humanidad.

Las consecuencias ambientales negativas del consumo de los combustibles fósiles y la preocupación acerca de las reservas, así como el suministro de los energéticos ha motivado la optimización de la eficiencia en la extracción, la transportación, el consumo, y la conservación de los recursos energéticos y a la vez, la búsqueda de recursos y fuentes energéticos renovables. (Badii et al., 2016).

Otra de las mejores acciones que se tienen que implementar es aplicar todos los procesos industriales disponibles para obtener energía limpia. La luz solar, los vientos derivados de las diferencias de temperatura y los recursos fluviales han dado lugar a un conjunto de tecnologías capaces de proporcionar energía eléctrica y climatización sin el consumo de combustibles de origen fósil. Se contempla también el cambio de las centrales de carbón por gas natural, lo que aumenta la eficiencia de un 20% a un 60%, independientemente de la reducción, que es considerable, de gases de efecto invernadero que tiene lugar, la puesta en marcha de procesos de cogeneración, que permiten producir electricidad y aprovechar el calor generado con fines climáticos, y la producción de biocombustibles, como el bioetanol, con los residuos urbanos y similares (Benito, 2013).

Eficiencia energética significa hacer más con menos energía lo cual beneficia a la población, la economía y el ambiente de manera global. La eficiencia energética y la

conservación energética son consideradas como factores claves para reducir las emisiones de gas de invernadero y alcanzar otros objetivos de la política energética. La eficiencia energética se considera como una solución clave dentro de la política energética para los altos costos energéticos y las amenazas de cambios climáticos. Inversión en los programas de eficiencia energética producen beneficios económicos mucho más que los ahorros directos a los consumidores (Badii et al., 2016).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los principales inconvenientes en la realización de celdas fotovoltaicas híbridas CdTe/PEDOT:PSS es la rápida degradación debido a los compuestos orgánicos presentes en el polímero, lo que provoca una reducción en la respuesta fotovoltaica de estas celdas solares. En este trabajo se realizarán celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS, a las que se les propone depositar un semimetal, en este caso Teluro de Antimonio (Sb_2Te_3), después del tratamiento térmico del Teluro de Cadmio (CdTe) y antes del depósito del polímero conductor PEDOT:PSS. El Sb_2Te_3 es un material novedoso, que puede mejorar la respuesta fotovoltaica y la estabilidad de este tipo de celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS.

El depósito del Sb_2Te_3 se realizará mediante el equipo de erosión catódica magnetoplanar en modo de corriente directa (Sputtering-DC), a una razón de depósito de 25 nm/min.

JUSTIFICACIÓN

Las celdas solares de cuarta generación han surgido como una alternativa prometedora, combinando materiales semiconductores orgánicos e inorgánicos. Entre ellas, destacan las de CdTe/PEDOT:PSS. Sin embargo, un desafío en estas tecnologías es su rápida degradación y estabilidad.

Estudios previos han demostrado que las celdas solares CdTe/PEDOT:PSS pueden perder hasta un 20% de su eficiencia en un período de 24 meses (Reyes García, 2020). En este sentido, la incorporación de una capa buffer de Sb_2Te_3 se propone como una solución innovadora para mejorar la estabilidad y prolongar la vida útil de estas celdas solares. A

través de un análisis experimental, se determinará cómo la variación de espesores y temperatura influyen en la calidad de las celdas solares y en sus parámetros fotovoltaicos.

HIPÓTESIS

El implementar una capa buffer de Sb_2Te_3 sobre las celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS, podría evitar la rápida degradación de estos dispositivos fotovoltaicos, así mismo, con la variación de espesores y temperaturas podríamos encontrar los parámetros adecuados para incrementar la respuesta fotovoltaica de estas celdas solares.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Elaboración y medición periódica en el laboratorio LACyTES de la UACM de celdas solares CdTe/PEDOT:PSS con Sb_2Te_3 , para obtener una capa buffer por medio de la variación de los parámetros de depósito de espesor y temperatura.

Objetivos particulares

- Obtener los parámetros óptimos (V_{oc} , J_{sc} , FF y Eficiencia) en el depósito de Sb_2Te_3 .
- Depositar el Sb_2Te_3 en 8 celdas híbridas.
- Obtención de 9 celdas solares CdTe/PEDOT:PSS, 8 con y una sin Sb_2Te_3 (celda de referencia), para comparar su respuesta fotovoltaica.
- Realizar mediciones periódicas de I vs. V para evaluar la respuesta fotovoltaicas de las celdas solares obtenidas con y sin Sb_2Te_3 .

CAPÍTULO 1. ENERGÍA

1.1. Tipos de energía

Existe una gran diferencia entre lo que se considera "energía" en el lenguaje popular y el significado que se le atribuye en las ciencias físicas. Existe una doble acepción del término energía; se puede utilizar tanto para: a) designar un tipo específico de energía (cinética, magnética) como para: b) indicar el lugar de donde provienen o se almacenan los diferentes tipos de energía (eólica, solar) (Arias, 2006).

La energía constituye un componente fundamental de las estrategias de desarrollo económico y social. Su importancia radica en el acceso que se tenga a ella, superando así, aquellas consideraciones basadas sólo en su aporte económico como tal, la energía es un concepto asociado al movimiento en general y es una de las definiciones más complejas que el hombre ha pretendido establecer. Las fuentes de energía son elaboraciones naturales de las que el hombre puede extraerla para realizar un determinado trabajo u obtener alguna utilidad, aunque existen innumerables fuentes de energía, fundamentalmente toda la energía procede del sol. La electricidad es la forma de energía que la mayoría de los equipos utilizan para funcionar (Llanos & Alexis, 2020).

1.1.1. Energía no renovable

La energía no renovable proviene de aquellos recursos naturales que se pueden agotar porque proceden de depósitos limitados o tienen ciclos de regeneración muy por debajo de la tasa de extracción o de explotación, como son los hidrocarburos fósiles (petróleo, carbón, gas natural) (DEL CARPIO, s/f).

El uso intensivo de la energía basada en la quema de combustibles de origen fósil como el petróleo, carbón y gas, ha sido uno de los principales insumos del crecimiento económico durante varias décadas, tanto en países desarrollados como en desarrollo. Sin embargo, la externalidad negativa asociada al consumo de este tipo de combustibles son las emisiones de gases efecto invernadero (GEI, por sus siglas en inglés). La evidencia científica muestra una asociación positiva entre las crecientes emisiones de los distintos GEI con un aumento de la temperatura media del planeta. Se estima que el promedio global de la temperatura combinada de la superficie y el océano muestra un aumento, en un rango de 0.8 a 1.2°C,

durante el periodo 1880-2012 respecto a la era preindustrial. El aumento de la temperatura genera cambios importantes en el clima global como son: modificaciones en los patrones de precipitación, cambios en la intensidad o en la frecuencia de eventos climáticos extremos, reducción de la criósfera e incremento del nivel de mar (Catalán Alonso, 2021).

1.1.2. Energía renovable

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o por ser capaces de regenerarse por medios naturales. Las fuentes de energía renovable están en todo nuestro alrededor: agua, viento, sol... cada día más personas las utilizan como parte de su vida diaria. Las utilizamos para calentar nuestros hogares en épocas frías, para operar nuestros electrodomésticos, ducharnos con agua caliente, irrigar campos con agua para agricultura, etc. (Spiegeler & Cifuentes, 2016).

Muchos tipos de energía como el viento y el Sol son renovables, ya que constantemente se renuevan y por tanto no se acaban. La mayoría de la energía renovable se deriva directamente o indirectamente desde el Sol. Se puede usar la energía solar de forma directa para calentar e iluminar los edificios, para generar electricidad y para calentar el agua (Badii et al., 2016).

1.2. Energía fotovoltaica

En abril de 1954 hubo una reunión en Washington en la que un grupo de selectos científicos se reunieron para escuchar algo nuevo: la voz y la música emitida por un transmisor de radio funcionando con energía solar. Los científicos de los Laboratorios Bell en Nueva Jersey demostraron de este modo su invención, la primera celda solar fotovoltaica de Silicio (Si) cristalino aplicado a un caso práctico. Este avance allanó el camino para la revolución solar que se celebra hoy en los techos ya sea con paneles fotovoltaicos anclados sobre el suelo o instalados sobre las cubiertas de todo tipo de edificios. Sin embargo, la tecnología fotovoltaica todavía era demasiado cara para ser utilizada en el ámbito común. El nuevo reto lo marco el embargo petrolero árabe de 1973. Este hecho puso en evidencia la vulnerabilidad de los combustibles fósiles concentrados en unos pocos países. Así que, en medio de los crecientes temores sobre la seguridad energética, los gobiernos y las

empresas privadas vertieron miles de millones de dólares en investigación y desarrollo solar. Esto llevó al uso generalizado de la energía fotovoltaica en la década de 1980 para alimentar estaciones telefónicas, postes de socorro, balizas luminosas, etc.

Las empresas japonesas y estadounidenses se convirtieron en los primeros líderes en la fabricación de celdas fotovoltaicas para varios usos. A mediados de la década de 1980, Alemania se unió a Estados Unidos y Japón en la carrera por el dominio de la producción fotovoltaica. En los primeros años del nuevo milenio, las empresas japonesas y estadounidenses representaron aproximadamente el 70 por ciento de la producción fotovoltaica del mundo. La conversión fotovoltaica de la radiación solar, es el proceso de convertir la energía solar directamente en electricidad usando celdas solares, la explotación del efecto fotovoltaico dependió de algunos de los más importantes científicos y de los desarrollos tecnológicos del siglo 20 (Salazar-Peralta et al., 2016).

CAPÍTULO 2. CONTEXTO ENERGÉTICO EN MÉXICO

2.1. La energía eléctrica a través del tiempo

- A finales del siglo XIX, los sectores textil y minero eran los principales usuarios de energía eléctrica. En 1879, en la fábrica de hilados y tejidos “La Americana” en la ciudad de León, Guanajuato, se instaló la primera planta generadora de electricidad con una capacidad de 1.8 kW. Hacia 1890, la Ciudad de México contaba con 2,054 focos para alumbrado público. Posteriormente, el alumbrado público se instaló en las principales ciudades del país, en Guadalajara en 1884, en Monterrey en 1888, y Veracruz y Mérida en 1889.
- En diciembre de 1905, entró en operación la central hidroeléctrica Necaxa. La línea de transmisión en corriente alterna que unía a la Ciudad de México con esta planta hidroeléctrica fue considerada en su momento como la más larga en operación en el mundo, con una extensión de cerca de 272 km, y un nivel de tensión de 60 kV²². La primera planta hidroeléctrica en México se instaló en Batopilas, Chihuahua con 22 kW de capacidad eléctrica en 1889.
- En 1900, la capacidad instalada de generación de energía eléctrica en el país era únicamente de 18 MW. Para 1940, este valor era de 680 MW y dos décadas después, en 1960, era 3,058 MW. A fines de 1959, se inauguró en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, la primera planta geotermoeléctrica del país con una capacidad de 3.5 MW. En 1973 esta central dejó de operar.
- 1986 entró en operación comercial la central termoeléctrica San Luis Potosí, la primera central normalizada con unidades de 350 MW.
- La primera y única central nucleoelectrica que se ha instalado en México, es la central Laguna Verde, ubicada en Veracruz, que inició operaciones en 1990.

- El primer parque eólico en México se construyó en 1994 en La Venta, Oaxaca. El parque eólico La Venta, originalmente un proyecto prototipo, cuenta con siete aerogeneradores de 225 kW y fue el primero en su tipo en nuestro país y en América Latina.
- El primer parque fotovoltaico instalado por la Comisión Federal de Electricidad fue Santa Rosalía (Tres Vírgenes), ubicado en Baja California Sur con una capacidad de 1 MW que inició operación en 2012.
- La capacidad instalada de generación de energía eléctrica en el país entre 1960 y 2013, año en que se promulgó la Reforma Energética, creció 17.5 veces. Durante 2017 entraron en operación 10 MW que son parte del proyecto solar Villanueva en Coahuila. Dicho proyecto forma parte de los ganadores de la Primera Subasta de Largo Plazo de 2015 y es el primer proyecto en operación bajo este esquema creado a partir de la Reforma Energética (Coldwell, 2018).

Durante el gobierno del presidente Andrés Manuel López Obrador se inauguró la primera fase de la Central Fotovoltaica Puerto Peñasco. En su etapa final, esta central generadora producirá 1,000 Megawatt (MW) de energía limpia y eficiente más 192 MW en baterías y contará con un sistema de condensadores síncronos, equipos especializados que brindarán soporte al sistema. Por su tecnología será la primera en su tipo en México, la más grande de toda América por su capacidad de generación y la quinta a nivel mundial al considerar la aportación del sistema de almacenamiento.

En septiembre de 2022 iniciaron las actividades de la etapa II, que entrará en operación en junio de 2024; esta segunda etapa contará con una capacidad de generación de 300 MW más 60 MW en baterías como respaldo, con equipos especializados de soporte al sistema. La electricidad que genere beneficiará directamente a 160,800 hogares promedio de las comunidades de San Luis Río Colorado, en el estado de Sonora; y Ensenada, Tecate, Tijuana y Mexicali en el estado de Baja California (Comisión Federal de Electricidad, 2023).

2.2. Potencial energético en México

El 17 de febrero de 2018, México se convirtió de manera oficial en el miembro número 30 y el primer país de América Latina en formar parte de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), el foro de energía más importante en el mundo. Actualmente, la IEA se integra por 30 países miembros y siete países asociados que representan más del 70% del consumo mundial de energía. Al formar parte de la IEA, México tendrá la oportunidad de recibir asistencia técnica y asesoría en política energética por parte de expertos de la agencia, acceso a bases de datos y colaborar en acciones colectivas en casos de emergencias energéticas. La IEA reconoce que la Reforma Energética ha puesto a México firmemente en el mapa de la política energética mundial y considera que será beneficiada por integrar como miembro al país con la 15° economía más grande del mundo, 12° mayor productor de petróleo y uno de los países con más recursos renovables en el mundo (Coldwell, 2018).

Dentro del sector energético el actual gobierno destacó la necesidad de lograr la seguridad energética para reemplazar las importaciones de petróleo y gas de los Estados Unidos. Para lograr esto, el presidente propuso cambios sectoriales que incluyen fomentar la extracción nacional de petróleo y gas, construir una nueva refinería, remodelar las antiguas y aumentar la producción de electricidad. Para aumentar la producción de electricidad, propone tres acciones: 1) Aumentar el factor de carga de las centrales hidroeléctricas; 2) Evitar la retirada prevista de las centrales térmicas (combustibles fósiles) (convirtiendo las antiguas en cogeneración y todas las unidades de más de 150 MW en gas CC); y 3) Crear programas para fomentar la transición energética a Energía renovable (ER): energía solar fotovoltaica, eólica e hidráulica (Altamirano, 2020). En la Figura 1 se aprecia el consumo energético por combustible.

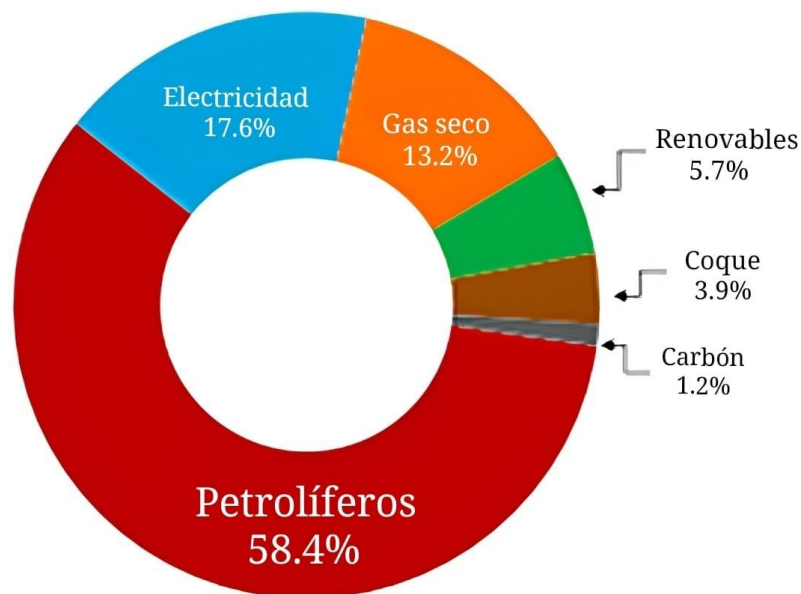


Figura 1. Consumo energético por combustible Fuente: SENER.

México se beneficia de sus condiciones geográficas y climáticas pues gracias a ellas México cuenta con un portafolio amplio de energías limpias, gracias a sus condiciones geográficas y climáticas, ya que puede disponer del viento, la radiación solar, los océanos, los mares, los ríos, los yacimientos geotérmicos.

El país cuenta con 23 centrales fotovoltaicas en operación, mismas que representan menos del 0.4% de la capacidad total (214 MW) y el 0.1% de la generación eléctrica en 2017 (344 GWh). El 75.2% de la capacidad instalada nacional se ubica en cuatro estados: Baja California Sur, Durango, Chihuahua y el Estado de México (Coldwell, 2018), como se observa en la Figura 2 y la Tabla 1.



Figura 2. Capacidad y generación en centrales solares 2017. Fuente: SENER.

Tabla 1 Centrales de generación solar 2017 (Megawatt, Gigawatt-hora). Fuente: SENER.

No.	Nombre	Entidad Federativa	Región de Control	Esquema ^{1/}	Capacidad Total (MW)	Generación Bruta ^{2/} (GWh)
1	Autoabastecimiento Renovable	AGS	03-Occidental	AUT	1	1
2	Coppel	SON	04-Noroeste	AUT	1	2
3	Ecopur	GTO	03-Occidental	AUT	3	1
4	Generadora Solar Apaseo	GTO	03-Occidental	AUT	1	2
5	Iusasol 1	MEX	01-Central	AUT	18	43
6	Iusasol Base	MEX	01-Central	AUT	1	1
7	Los Santos Solar I	CHIH	05-Norte	AUT	20	16
8	Oomapas Nogales	SON	04-Noroeste	AUT	1	1
9	Parque Solar Coahuila	COAH	05-Norte	AUT	20	9
10	Plamex	BC	08-Baja California	AUT	1	1
11	Prosolia Internacional de México	QRO	03-Occidental	AUT	1	1
12	Fortius Electromecánica	JAL	03-Occidental	GEN	8	3
13	Parque Solar Villanueva Tres	COAH	06-Noreste	GEN	10	4
14	Productora Yoreme	SON	04-Noroeste	GEN	1	1
15	Tai Durango Cinco	DGO	05-Norte	GEN	30	61
16	Tai Durango Cuatro	DGO	05-Norte	GEN	6	12
17	Tai Durango Dos	DGO	05-Norte	GEN	6	12
18	Tai Durango Tres	DGO	05-Norte	GEN	4	8
19	Cerro Prieto	BC	08-Baja California	GEN-CFE	5	8
20	Sta. Rosalía (Tres Vírgenes)	BCS	10-Mulegé	GEN-CFE	1	2
21	Avant Energías Renovables I	CHIH	05-Norte	P.P.	29	61
22	Servicios Comerciales de Energía	BCS	09-Baja California Sur	P.P.	30	70
23	Tai Durango Uno	DGO	05-Norte	P.P.	16	25
Total^{1/}					214	344

El panorama mundial muestra un crecimiento acelerado en el uso de la energía solar fotovoltaica, ya que más del 55% de total de la capacidad de esta tecnología en el mundo se instaló en los últimos cuatro años (Coldwell, 2018).

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1. Generaciones de celdas solares

Las celdas fotovoltaicas, son dispositivos que convierten directamente parte de la luz solar en electricidad. Algunos materiales presentan una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico en su forma más simple.

Un material semiconductor, es un material que posee un nivel de conductividad que se localiza entre un dieléctrico y un conductor. Los semiconductores intrínsecos, son aquellos semiconductores que se han refinado cuidadosamente con el objetivo de reducir las impurezas hasta un nivel muy bajo, tan puros como sea posible mediante la utilización de la tecnología moderna. Un semiconductor extrínseco es un material semiconductor que se ha sometido a un proceso de dopaje.

Existen dos semiconductores extrínsecos de gran importancia para la fabricación de dispositivos: el tipo “n” (con abundancia de electrones con carga negativa) y el tipo “p” (con abundancia de "huecos" que tienen una carga positiva). Tanto los materiales tipo “n” como los tipos “p” se forman cuando se añade un número predeterminado de átomos de impureza a una base de germanio (Ge) o de silicio (Si), por ejemplo. El material tipo “n” se crea al introducir elementos impuros que cuentan con cinco electrones de valencia (pentavalentes), como es el caso del antimonio (Sb), el arsénico (As) y el fósforo (P). El material tipo “p” se forma mediante el dopado de un cristal puro de Ge o de Si con átomos de impureza que cuenten con tres electrones de valencia. Los elementos que se utilizan de forma más frecuente para este propósito son: el boro (B), el Galio (Ga) y el Indio (In), para las celdas de Si.

Los materiales se colocan en una unión p-n, en su unión se crea un campo de fuerza eléctrico. Cuando “n” y Si del tipo “p” entran en contacto, los electrones del exceso se mueven del lado del tipo “n” al lado del tipo “p”, el resultado es un aumento de carga positivo a lo largo del lado del tipo “n” de la interfaz y un aumento de carga negativa a lo largo del lado del tipo “p”. El campo eléctrico obliga a los electrones a trasladarse desde el semiconductor hacia la superficie negativa de donde quedan disponibles para ser ocupados

por algún circuito eléctrico. Al mismo tiempo los huecos se mueven en dirección contraria hacia la superficie positiva donde esperan a los electrones que vienen en dirección contraria. Algunos tipos de celdas son de Si, celdas de Sulfuro de Cadmio (CdS) y Sulfuro de Cobre (CuS), celdas bifaciales, celdas de doble unión p-n, Seleniuro de Indio (In_2Se_3) y Cobre (CuSe), Telurio de Cadmio (Salazar-Peralta et al., 2016).

En las celdas solares de cuarta generación aparecen las celdas solares híbridas compuesta por semiconductores orgánicos e inorgánicos, entre estas podemos mencionar por sus avances las de Perovskite y las de CdTe/PEDOT:PSS; sin embargo, este tipo de dispositivos sufren con el inconveniente de su rápida degradación y estabilidad.

Materiales como el Sb_2Te_3 son semiconductores en capas de banda prohibida con estructura de tetradimita, que muestran bajas bandas prohibidas (0.1 – 0.3 eV) y características termoeléctricas superiores, cerca de la temperatura ambiente. El Sb_2Te_3 posee amplias aplicaciones en sistemas de mini generación de energía y micro enfriadores, en tecnología de dispositivos de carga acoplada (CCD) y detectores infrarrojos. Se han fabricado películas y nanoestructuras de Sb_2Te_3 con morfologías bien definidas mediante procesos como solvotérmicos, crecimiento por transporte de vapor, crecimiento vapor-liquido-sólido, deposito electroquímico Sputtering DC y RF, y procesos de epitaxia de haz molecular (MBE) (Bendt et al., 2013).

Por su estructura cristalina, el Sb_2Te_3 es un material anisotrópico; la resistividad eléctrica es hasta cuatro veces más grande perpendicularmente al eje de crecimiento del cristal que paralelamente al mismo (Uribe Garavito, 2014). Tiene una estructura cristalina Hexagonal, densidad de 6.5 g/cm^3 y un punto de fusión de $630 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.1. Celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS

En los últimos años, las celdas solares de película delgada de CdS/CdTe han atraído un creciente interés de investigación por sus aplicaciones en energías renovables y como solución al cambio climático. Esta celda solar es una de las tecnologías de película delgada más favorables y su mayor eficiencia ha alcanzado el 22.1%.

Las celdas fotovoltaicas basadas en polímeros semiconductores orgánicos, han atraído el interés de la investigación en los materiales para su fabricación en los últimos 20 años. Una celda fotovoltaica orgánica con una estructura típica está formada por una capa fotoactiva en medio de dos electrodos, siendo el ánodo ópticamente transparente a la radiación UV-vis-NIR. El óxido de indio-estaño (ITO) y el dióxido de estaño (SnO_2) se utilizan generalmente en varios casos, cuando el cátodo es un metal con la función de trabajo adecuada, como aluminio (Al) y plata (Ag). La capa fotoactiva en esta estructura típica está compuesta por una red interpenetrante de una mezcla heterogénea de un polímero semiconductor orgánico, que sirve como donador de electrones con bajo potencial de oxidación, como el conocido poli (3-hexiltiofeno) (P3HT) como donante de electrones y compuestos aceptores de electrones, con bajo potencial de reducción (porfirina, fullereno, etc.); como el [6,6]-fenil-C61 butirato de metilo (PC61BM) y el [6,6]-fenil-C71 butirato de metilo (PC71BM). Para mejorar la extracción y transporte de los portadores de carga positiva (huecos) hacia el correspondiente electrodo (ánodo) en estas celdas orgánicas, se utiliza una película de un polímero conductor transparente en la región visible e infrarroja cercana como, por ejemplo, poli(3,4- etilendioxitiofeno)-sulfonato de poliestireno (PEDOT:PSS).

Por primera vez, se sintetizó electroquímicamente un polímero PEDOT conductor a mediados de los años 90 a partir del monómero 3,4-etilendioxitiofeno (EDOT), inicialmente fue utilizado como recubrimiento antiestático para películas fotográficas, debido a su capacidad para disipar cargas eléctricas y prevenir la acumulación de estática. Posteriormente aparece el polímero PEDOT:PSS soluble en agua, el cual es de uso general, por su fácil aplicación al ser disuelto en el medio. Esta capa de polímero conductor generalmente se procesa mediante técnicas no sofisticadas y de bajo costo, como el recubrimiento por rotación o el recubrimiento por caída, lo que permite un control aceptable del espesor de la capa.

Los estudios particulares que informan sobre el uso del polímero orgánico semiconductor PEDOT:PSS también son limitados (Mendoza Pérez et al., 2023).

3.1.1. Depósito de PEDOT:PSS – Sobre CdTe

-PEDOT:PSS se deposita en celdas de base CdTe por el problema de pinholes o huecos transversales, causantes de microcortocircuitos, lo que disminuye la eficiencia en la recolección de portadores de carga minoritarios y, por ende, afecta la eficiencia de las celdas solares. El CdTe ha sido reconocido por su potencial para las celdas solares de película delgada por su alto coeficiente de absorción, mayor a 10^5 cm^{-1} . Debido a lo anterior puede absorber aproximadamente el 90% de la radiación que incide sobre el en una capa de $1 \mu\text{m}$ de espesor, con lo que es posible obtener celdas solares con espesores de 1 a $3 \mu\text{m}$ (Núñez Membrillo, 2022). En la Figura 3 se puede apreciar el CdTe disperso en la chalupa de grafito.



Figura 3. Frasco de Teluro de Cadmio ocupado en el laboratorio LACyTES. Fuente: Elaboración propia.

El CdTe es el semiconductor absorbente tipo “p” de nuestra celda solar, pero como es un material policristalino presenta algunas desventajas, como al unirse en diferentes capas no presenta las óptimas características morfológicas, la consecuencia es que la capa presenta pinholes (huecos transversales) como se muestra en la Figura 4. También pueden presentarse por las condiciones experimentales de depósito, como : temperatura y presión. Estos pinholes o huecos pueden causar pequeños cortos circuitos y provocar fugas de corriente significativas.



Figura 4. Pinholes en celda solar después del depósito de CdTe. Fuente (Reyes García, 2020).

El polímero semiconductor orgánico PEDOT:PSS tiene la capacidad de facilitar la recolección de los portadores de carga (huecos), evitando que estos se vuelvan a recombinar, esto provoca que la corriente de corto circuito (I_{sc}) sea beneficiada en gran medida, por lo tanto, la densidad de corriente de corto circuito J_{sc} se observa un mayor incremento en este parámetro fotovoltaico con respecto al voltaje de corto circuito (V_{oc}) (Reyes García, 2020). En la Figura 5 se muestra el frasco de polímero utilizado en las celdas solares.

Finalmente, encontramos que el espesor óptimo del polímero orgánico PEDOT:PSS para ser utilizado en celdas solares basadas en CdTe era de alrededor de 20 nm. Además, la temperatura óptima del depósito Cu/Mo fue de 200 °C, lo que permitió tener un mejor contacto óhmico y que la unión CdTe/metal mejore, aumentando la extracción de portadores de carga, mejorando la eficiencia hasta un 13% en celdas solares híbridas (Mendoza Pérez et al., 2023).

Gracias al depósito de este polímero se pueden cubrir los pinholes resultantes del depósito de CdTe creando un buen contacto óhmico, evitando los micro cortos circuitos y a su vez mejorando la hetero unión p-n.

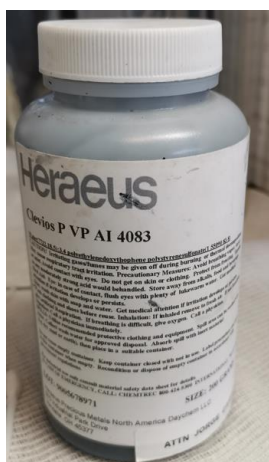


Figura 5. Polímero PEDOT:PSS. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Teluro de antimonio (Sb_2Te_3)

Uno de los materiales investigados y que gracias a sus características puede ser útil para ralentizar o detener la degradación en celdas solares con base CdTe es el Teluro de antimonio (Sb_2Te_3). El Sb_2Te_3 es un compuesto semiconductor prometedor para película delgada como contacto posterior del CdTe gracias a sus excelentes propiedades físicas como baja conductividad térmica, baja resistividad eléctrica y estabilidad a largo plazo, al mismo tiempo como capa búfer rellenando los huecos creados por el CdTe evitando de esta forma que el polímero PEDOT:PSS entre a través de estos canales y degrade la celda solar (Mendoza Pérez et al., 2020).

Se ha demostrado que para obtener celdas solares más estables de CdTe/CdS, el Sb_2Te_3 depositado mediante un sistema de erosión catódica magneto planar es un material adecuado como contacto posterior, sustituyendo los contactos posteriores de Cu/Au por Sb/Au en celdas de CdTe para crear una capa buffer entremezclada Sb_2Te_3 (Bätzner et al., 2000). Las especificaciones se muestran en la Figura 6.

Antimony Telluride (Sb_2Te_3) Specifications

Material Type	Antimony Telluride
Symbol	Sb_2Te_3
Color/Appearance	Gray, Crystalline Solid
Melting Point (°C)	629
Theoretical Density (g/cc)	6.5
Z Ratio	**1.00
Sputter	RF
Type of Bond	Indium, Elastomer
UN Number	3284
Comments	Decomposes over 750°C.

Figura 6. Especificaciones del Sb_2Te_3 . Fuente: www.lesker.com

3.3. Sputtering de corriente directa (Sp-DC)

El Sputtering o erosión catódica magnetoplanar es un comúnmente utilizado para fabricar recubrimientos compuestos de película delgada sobre una amplia variedad de sustratos diferentes. La erosión catódica magnetoplanar para recubrimientos de película fina se

utiliza en numerosas aplicaciones industriales. Simplemente agregando un gas que reacciona con el material a erosionar, es posible formar una amplia variedad de recubrimientos de película delgada compuestos útiles (Berg & Nyberg, 2005).

La técnica de erosión catódica magnetoplanar es una técnica muy promisoriosa que presenta ciertas ventajas tales como bajo costo, alta confiabilidad, excelente control del espesor y la posibilidad de usar bajas temperaturas de substrato para la fabricación de celdas solares de película delgada de CdTe (Velázquez et al., 1999).

La técnica de erosión catódica magnetoplanar, la cual puede presentarse en dos modalidades: corriente directa (DC) y radiofrecuencia (RF), este último dispositivo representa la técnica más simple en donde se genera plasma. Tanto el diodo RF como el diodo DC son visualmente muy parecidos, y se logran mediante el arreglo ánodo cátodo, como se puede apreciar en la Figura 7, cuando se alcanzan las condiciones adecuadas de voltaje a través de los electrodos y una adecuada presión de gas, en este caso Argón (Ar), el cual se descompone dentro de una descarga de plasma, donde se descarga el potencial del plasma que es uniforme y muy cercano al potencial del ánodo.

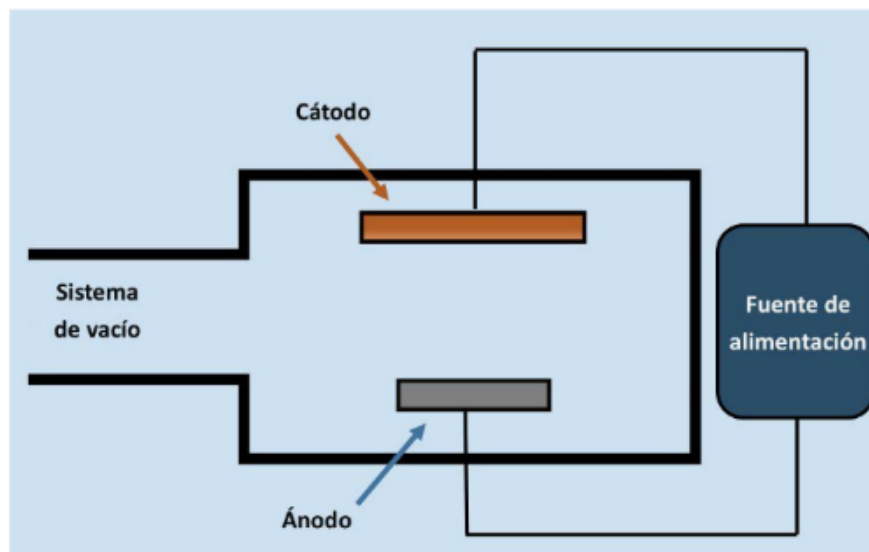


Figura 7. Esquema del diodo RF y DC del equipo Sputtering. Fuente: (Hernández-Pitalua et al., 2021).

Cerca del cátodo, existe un espacio oscuro donde se encuentra un campo eléctrico, los iones son acelerados rápidamente a través de la cubierta e impactan al cátodo; como parte de esta colisión, se erosiona el material y se liberan electrones conocidos como secundarios, los cuales adquieren energía, que es usada al colisionar con átomos del gas y forma nuevamente más iones para mantener la descarga, Figura 8.

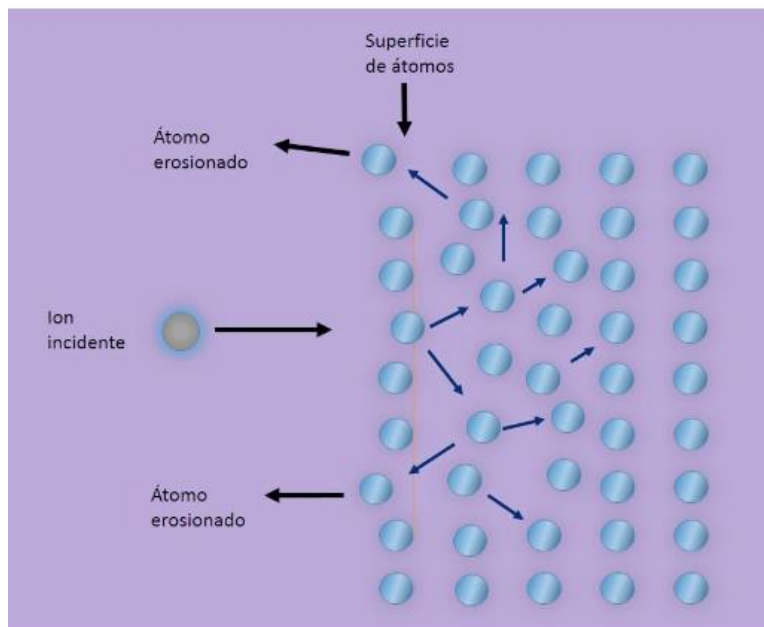


Figura 8. Principio de erosión del equipo de Sputtering. Fuente: (Hernández-Pitalua et al., 2021).

El depósito de películas por esta técnica, tiene aplicaciones en obleas de semiconductores, recubrimiento de herramientas, recubrimientos refractivos en ventanas de cristal, recubrimiento de superficies de automóviles, entre otras más; también es usada en el crecimiento de películas delgadas. Este proceso se lleva a cabo por medio de un plasma generado por partículas cargadas, las cuales son aceleradas hacia una superficie (material a depositar), que es polarizado negativamente; este fenómeno produce la erosión de la superficie por el bombardeo de iones positivos (partículas cargadas) de un gas inerte normalmente Ar, y el material erosionado se deposita posteriormente en el sustrato que se encuentra justo frente a él. Dicho proceso se lleva a cabo dentro de una cámara al alto vacío de unas cuantas unidades de presión (mTorr), como puede verse en la Figura 9. (Hernández-Pitalua et al., 2021).

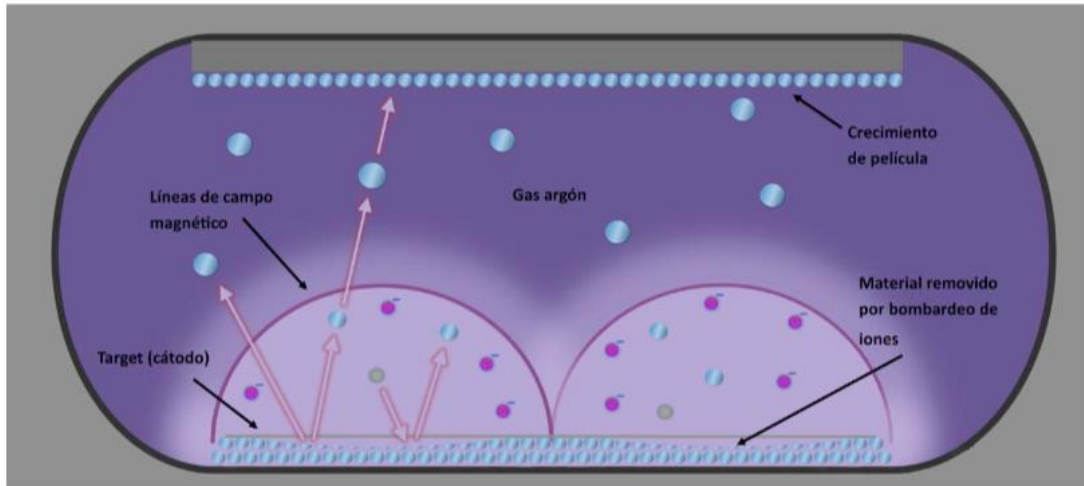


Figura 9. Sistema de erosión del equipo Sputtering. Fuente: (Hernández-Pitalua et al., 2021).

3.3.1. Depósito del polímero PEDOT:PSS sobre Sb_2Te_3

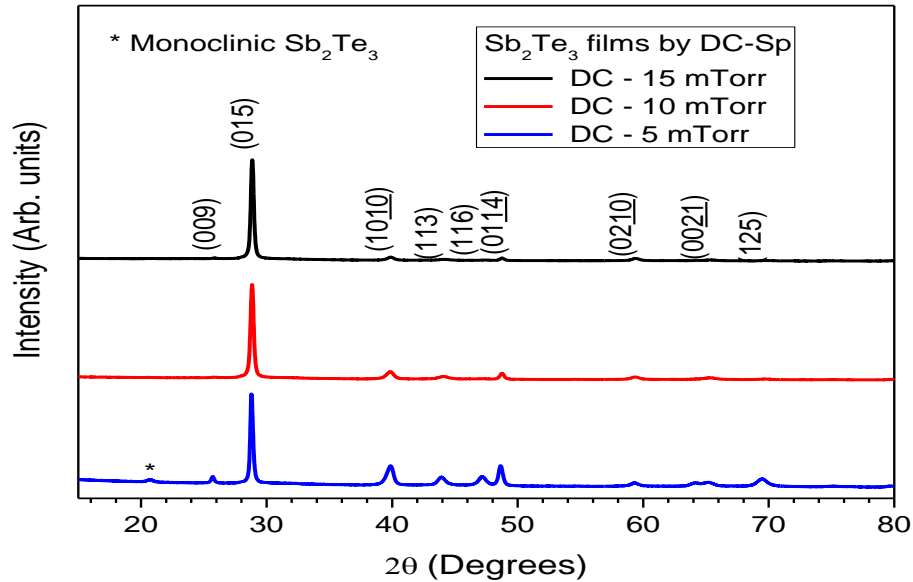
El compuesto polimérico orgánico PEDOT:PSS, cuenta con buenas características favorables para la energía fotovoltaica como su alta transparencia, una buena conductividad, alta estabilidad térmica y de igual forma química, además alta transparencia, por tales motivos es usado en muchos dispositivos como las celdas solares orgánicas y recientemente en celdas solares híbridas (Torres Bautista, 2023). Este polímero está conformado por la parte PEDOT de alta conductividad y el polímero PSS que mejora la dispersión y la estabilidad del PEDOT en agua (Núñez Membrillo, 2022), por tal motivo este polímero orgánico almacena agua que puede ser contraproducente para nuestras celdas solares, introduciéndose en los huecos generados por los granos de CdTe dañando los principales parámetros fotovoltaicos (Voltaje en circuito abierto V_{oc} , densidad de corriente de corto circuito J_{sc} , Factor de llenado FF y Eficiencia fotovoltaica η), así mismo como la rápida degradación de las celdas solares; para este problema se ha optado por realizarse un tratamiento térmico en mufla a la celda solar después de hacerle el depósito del PEDOT:PSS, cabe destacar que pese a la implementación de este proceso para la eliminación de los residuos orgánicos, las celdas solares continúan con una degradación moderada, con base a estudios realizados con anterioridad (Torres Bautista, 2023).

Por medio del artículo “Pressure effects in RF and DC sputtered Sb_2Te_3 thin films and its applications into solar cells” R. Mendoza-Pérez, et al., nos muestra que en los resultados

experimentales del crecimiento del Sb_2Te_3 cuando la presión aumenta de 5 a 15 mTorr, el espesor disminuye y la velocidad de crecimiento también disminuye de 9.8 a 2.5 nm/min, mientras que la rugosidad aumenta de 22 a 32 nm para las muestras de RF. Para las muestras de DC, existe un comportamiento similar con respecto a las muestras de RF, la velocidad de crecimiento varía de 13.1 a 3.4 nm/min y la rugosidad aumenta con respecto a las muestras de RF de 29 a 56 nm. . Por otro lado, en las películas delgadas de Sb_2Te_3 utilizadas para la fabricación de celdas solares, la tasa de crecimiento se ajustó para obtener un espesor similar (~25 nm) en todas las muestras (Mendoza Pérez et al., 2020). Los parámetros y valores se encuentran representados en la Tabla 2, 3 y Gráfica 1.

Tabla 2. Etiquetas, tasa de crecimiento, el espesor y los valores de rugosidad para las muestras Sb_2Te_3 a diferentes presiones de los Sputtering RF y DC. Fuente: (Mendoza Pérez et al., 2020).

Sputtering	Películas delgadas				Dispositivos	
	Etiqueta	Tasa de crecimiento (nm/min)	Espesor (nm)	Rugosidad (nm)	Etiqueta	Tiempo de depósito (min)
RF	RF3-5	9.8	588	22	CSa	2.6
	RF1-10	5.0	300	26	CSb	4.8
	RF2-15	2.5	150	32	CSc	9.9
DC	DC3-5	13.1	786	29	CSd	2.0
	DC1-10	5.6	336	44	CSe	4.5
	DC2-15	3.4	204	56	CSf	7.4

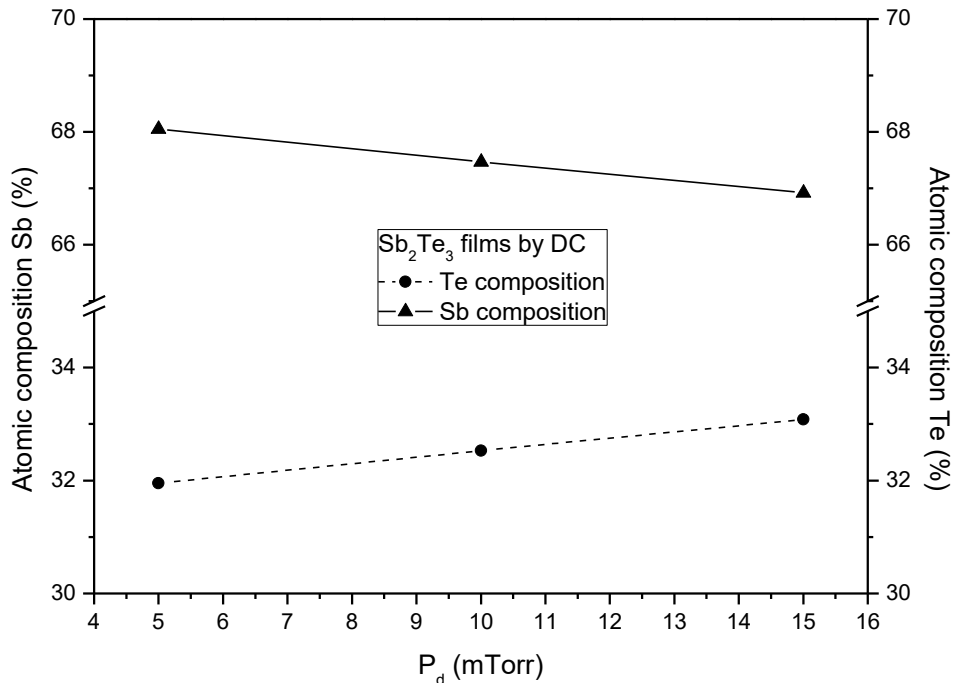


Gráfica 1. Patrones de X-ray de Sb_2Te_3 depositadas por Sp-DC a diferentes presiones. Fuente: (Mendoza Pérez et al., 2020).

Tabla 3. Mediciones de Energy Dispersive Spectrometry (EDS) y resistividad para muestras de Sb_2Te_3 a diferentes presiones de las técnicas de RF y DC Sputtering. Fuente: (Mendoza Pérez et al., 2020).

Sputtering-System	RF			DC		
	RF3	RF1	RF2	DC3	DC1	DC2
Sample name						
P_d (mTorr)	5	10	15	5	10	15
% Sb	65.79	65.49	67.28	68.05	67.47	66.92
% Te	34.21	34.51	32.72	31.95	32.53	33.08
Resistivity ($10^{-4} \Omega\text{-cm}$)	5.87	6.04	9.05	5.31	8.19	9.62

Las muestras de Sb_2Te_3 con presión de 5 mTorr en el sistema de Sputtering-DC tienen tasas de crecimiento altas ($\sim 13,1$ nm/min) y la composición atómica de Te más baja (31,95%). Las cuales se muestran en la Gráfica 2.



Gráfica 2. Composición de %Sb y %Te para muestras de DC Sb_2Te_3 en función de la presión de depósito.

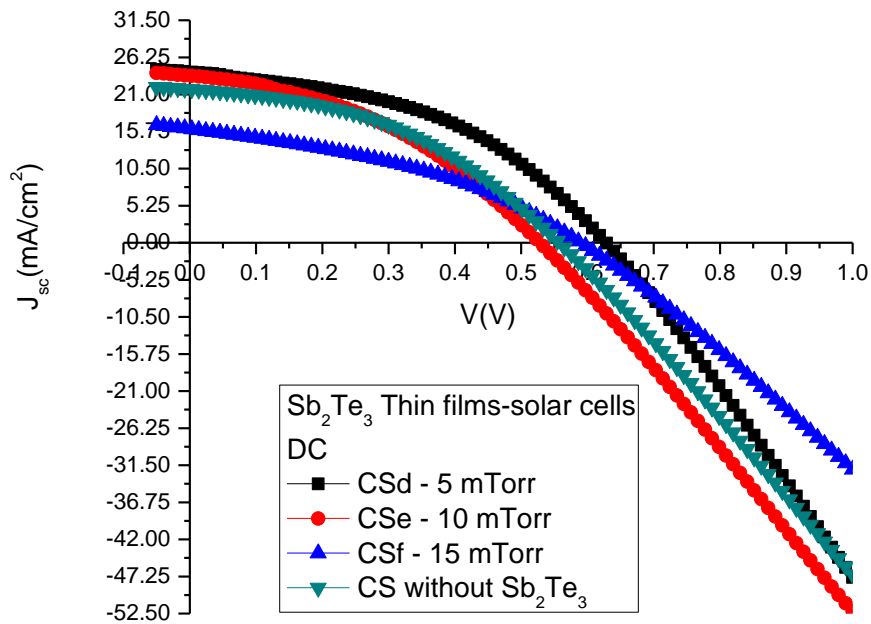
Fuente: (Mendoza Pérez et al., 2020).

Los granos de Sb_2Te_3 mediante el depósito de Sputtering-DC a una presión de 15 mTorr son menos compactos y cuentan con más irregularidades, además que con esa presión el tamaño aumenta de 150 a 250 nm sin ninguna orientación direccional. para películas delgadas de Sb_2Te_3 por DC que es correcto que más presión conduce a más porosidad, pero la estequiometría (% At. La relación Te/Sb es cercana a 0,5) (Mendoza Pérez et al., 2020).

Los resultados experimentales muestran que la presión óptima para el depósito de Sb_2Te_3 mediante Sputtering-DC en celdas solares de CdTe es de 5 mTorr con eficiencias de 6.42%, las cuales se pueden apreciar en la Tabla 4 y Gráfica 3, además disminuyó el J_{SC} cuando aumentó la presión de depósito.

Tabla 4. Parámetros fotovoltaicos para celdas solares de películas delgadas de Sb_2Te_3 depositadas mediante sistema de RF y DC Sputtering a diferentes presiones. Fuente: (Mendoza Pérez et al., 2020).

Sputtering-System	Without Sb_2Te_3	RF			DC		
Solar cell	CS	CSa	CSb	CSc	CSd	CSe	CSf
P_d (mTorr)	-	5	10	15	5	10	15
V_{oc} (V)	0.558	0.609	0.640	0.550	0.625	0.527	0.582
J_{sc} (mA/cm ²)	20.18	22.69	25.38	21.82	23.33	21.84	15.03
FF	0.41	0.42	0.49	0.31	0.44	0.39	0.36
η (%)	4.82	6.02	8.01	3.82	6.42	4.49	3.15



Gráfica 3. J_{sc} vs. V para celdas solares con Sb_2Te_3 mediante DC a diferentes presiones de depósito. Fuente: (Mendoza Pérez et al., 2020).

3.4. Perfilometría

Todo tipo de material presenta superficies muy complejas y diferentes respecto a su interior. Materiales considerados con superficies relativamente lisas, al ser observados a pequeña escala, muestran una gran diversidad de formas geométricas. La perfilometría es una técnica que permite medir el espesor y la rugosidad superficial de los materiales a depositar, y el dispositivo con el que se realiza es conocido como perfilómetro. El principio de operación del dispositivo es simple, por medio del movimiento electromecánico de una punta fina en contacto con la superficie a medir, se realiza un barrido en dirección lineal, las variaciones verticales que detecta esta punta se traducen en una señal eléctrica que origina el perfil de la muestra, y tales mediciones se registran en forma de gráfica. (Hernández-Pitalua et al., 2021). El perfilómetro empleado en este trabajo se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Perfilómetro de LACyTES. Fuente: Elaboración propia.

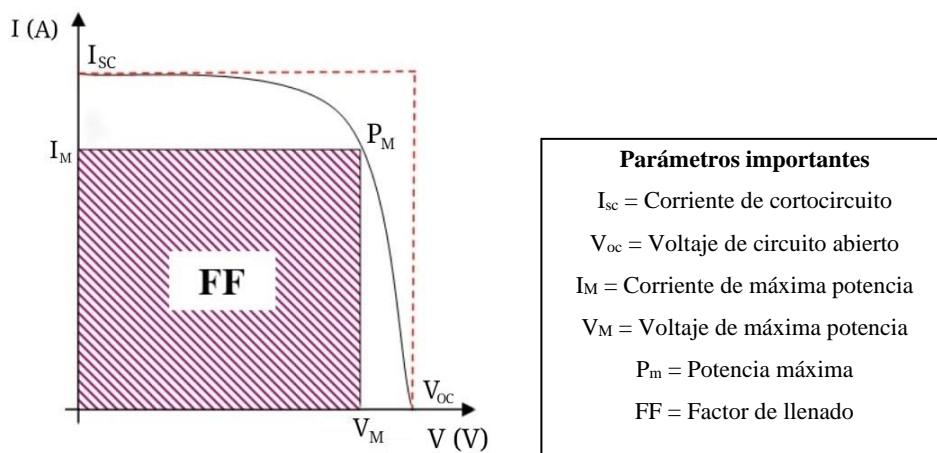
3.5. Medición I vs. V

La manera estándar de evaluar el desempeño de una celda solar fotovoltaica consiste en la determinación de las curvas de corriente-voltaje en corriente directa (I vs. V), bajo diferentes intensidades de radiación incidente en el dispositivo y diferentes longitudes de onda. Dicha medición se realiza en tiempo real entre los contactos mediante un dispositivo capaz de medir estos parámetros. Las mediciones de corriente-voltaje se obtienen con la aplicación de un potencial que inicia en 0 volts, condiciones de corto circuito (short circuit), a un potencial de circuito abierto (open circuit), bajo una iluminación constante. La corriente de corto circuito (I_{sc}) y el voltaje de corto circuito (V_{oc}) son parámetros que

dependen de la intensidad de la radiación que incide en el dispositivo (Hernández-Pitalua et al., 2021).

Para el caso de la corriente de corto circuito, esta se incrementa linealmente cuando la intensidad de la luz también se incrementa; en cuanto al voltaje de circuito abierto, este presenta un incremento logarítmico asintótico. Específicamente en este trabajo se utilizó el simulador solar certificado AAA Oriel Newport para evaluar curvas de corriente y voltaje de las celdas solares.

Las mediciones de Corriente contra Voltaje es un método para evaluar la calidad del comportamiento de las celdas solares bajo iluminación. En la gráfica 4 se pueden observar los principales parámetros de una curva I vs. V, los cuales se obtienen bajo condiciones estandarizadas internacionalmente, y se conocen como Condiciones Estándares de Prueba (STC, Standard Test Conditions), esto es con una iluminación de una irradiancia de 1000 W/m^2 , un índice de masa de Aire de AM 1.5 y una temperatura de operación de la celda de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Bajo estas condiciones se realiza un barrido con diferentes valores para el voltaje y se mide la respuesta de corriente del dispositivo (Núñez Membrillo, 2022).



Gráfica 4. Curva I vs. V de una celda solar con sus principales parámetros. Fuente: Elaboración propia.

3.6. Análisis de parámetros fotovoltaicos

Los parámetros de funcionamiento y los que nos indican la calidad de una celda solar son: Voltaje en circuito abierto (V_{oc}), Densidad de corriente (J_{sc}), Factor de llenado (**FF**) y Eficiencia fotovoltaica (η).

3.6.1. Voltaje en circuito abierto (V_{oc})

Es el voltaje que proporciona una celda solar cuando se encuentra en circuito abierto, es decir, las terminales de la celda no están conectadas a una fuente variable ni a ninguna resistencia externa, por lo que no tiene una carga eléctrica circulando a través del dispositivo y es el valor máximo de voltaje que genera la celda a circuito abierto (Carta González et al., 2009).

3.6.2. Densidad de corriente (J_{sc})

Es la cantidad de corriente por unidad de área efectiva, que va a tener una celda solar cuando la resistencia externa es cero, es decir, cuando los terminales de la celda están en cortocircuito (Reyes García, 2020) y está dada por la ecuación 1:

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{\text{Área}} \quad \left(\frac{A}{m^2} \text{ o } \frac{mA}{cm^2} \right) \quad (1)$$

3.6.3. Factor de llenado (FF)

El factor de llenado (FF por sus siglas en inglés, Fill Factor) es un factor de forma asociado a la curva I vs. V que proporciona gráficamente la cuadratura de la curva, se define como la razón de la potencia máxima (P_{max}), entre el producto del voltaje a circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de corto circuito (I_{sc}) y está dado por la ecuación 2:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (2)$$

3.6.4. Eficiencia fotovoltaica (η)

La eficiencia fotovoltaica, es el parámetro que más se utiliza para comparar el rendimiento de las celdas solares. Este se define como la razón de la máxima potencia generada por la celda P_{max} ($P_{max} = I_{max} * V_{max}$) entre la potencia de la radiación solar incidente (P_{in}), este parámetro se suele expresar como un valor porcentual y está dado por la ecuación 3:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} * 100\% = \frac{J_{max} * V_{max}}{P_{in}} * 100\% = \frac{FF * J_{sc} * V_{oc}}{P_{in}} * 100\% \quad (3)$$

Donde J_{max} y J_{sc} corresponden a la densidad de corriente máxima y la densidad de corriente de corto circuito, respectivamente, ya que son la cantidad de corriente por unidad de área.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

En este capítulo se abordaron los procesos para la elaboración de nueve celdas solares híbridas de CdTe y PEDOT:PSS (CS-385, CS-386, CS-387, CS-388, CS-389, CS-390, CS-391, CS-392 y CS-393) con base en la arquitectura de la Figura 12, así como las mediciones periódicas mediante la caracterización I vs. V. Se incluye una breve descripción de los diferentes materiales involucrados en cada capa de la celda solar, así mismo las características, parámetros y técnicas de los equipos utilizados para la realización de estas celdas solares. En la Figura 11 se puede apreciar brevemente los pasos a seguir para la realización de nuestras celdas solares.

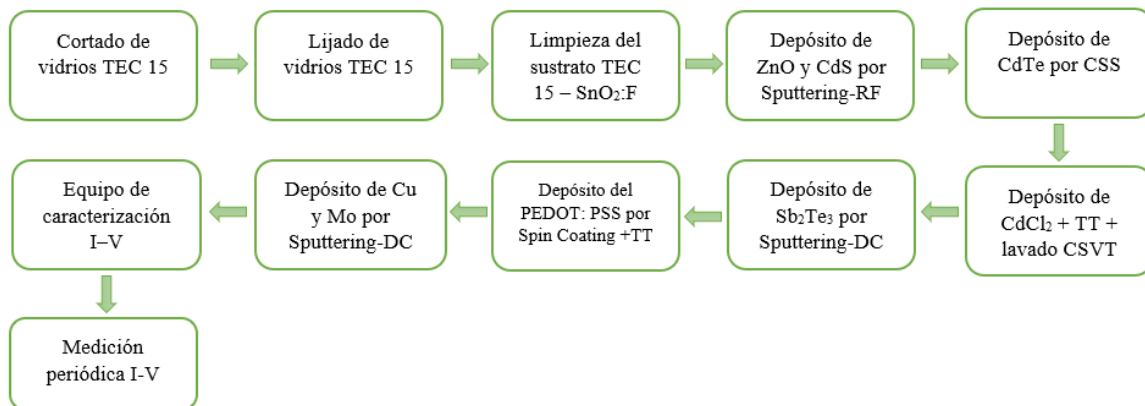


Figura 11. Procedimiento para la elaboración de celdas solares híbridas de CdTe y PEDOT:PSS.

4.1. Estructura

A continuación, y en la Figura 12, se muestra la arquitectura utilizada para la realización de las celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS de este trabajo.

$\text{SnO}_2:\text{F} / \text{ZnO} + \text{CdS} - \text{TT} / \text{CdTe} + \text{CdCl}_2 - \text{TT} / \text{Sb}_2\text{Te}_3 / \text{PEDOT:PSS} - \text{TT} / \text{Cu} - \text{Mo}$.

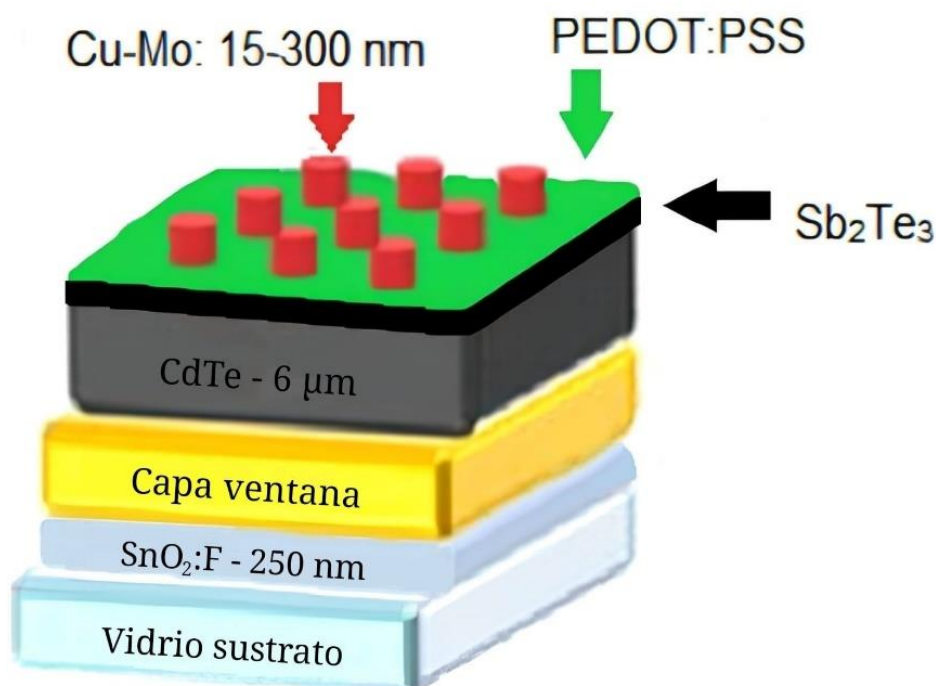


Figura 12. Estructura de las celdas solares híbridas de CdTe – PEDOT:PSS realizadas en el laboratorio LACyTES.

4.2. Preparación y limpieza de los sustratos

En la elaboración de las celdas solares se ocuparon como sustratos, vidrios TEC15 de la marca Pilkington que tienen un espesor de 2 mm, una transmitancia del 83% y una resistividad laminar de 15 ohm/cuadrado, los cuales cuentan con una película de óxido de estaño dopado con flúor (SnO₂: F), esta capa es el contacto frontal de nuestras celdas.

4.2.1. Cortado de vidrios TEC15

En la elaboración de las celdas solares híbridas CdTe/PEDOT:PSS se necesitan tamaños de media pulgada cuadrada (2.5 cm x 2.5cm) ya que son los tamaños de los moldes, por tal razón se cortan a esta medida gracias a la cortadora de vidrio proporcionada por el laboratorio LACyTES representada en la Figura 13.



Figura 13. Cortadora de vidrio alimentada por aire comprimido CVRF-1.2. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Lijado de vidrios TEC15

En ocasiones después del cortado de vidrio, estos llegan a quedar con bordes asimétricos, como se muestra en la Figura 14, incluso con rebabas de vidrio que pueden ser peligrosos para los usuarios que los manipulan causando cortes, es por esto que se pasa a un proceso de lijado en las partes laterales solamente, para quitar estas asperezas y darles un término redondeado a las esquinas de los vidrios, como se aprecia en la Figura 15.



Figura 14. Vidrio TEC 15 sin lijar. Fuente: Elaboración propia



Figura 15. Vidrio TEC 15 lijado. Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Limpieza del sustrato TEC15 – SnO₂:F

Posteriormente se les realiza un lavado con jabón alcalino y baño ultrasónico, este proceso es fundamental para retirar cualquier impureza y suciedad, ya que si se encuentran residuos o impurezas puede afectar gravemente a la eficiencia de la celda fotovoltaica. El proceso de limpieza se realiza mediante el “Manual de limpieza” que se encuentra en el laboratorio de LACyTES (LACyTES & López Sánchez, 2022). En las figuras 16 – 19 se muestran procesos por los cuales se limpian los vidrios.



Figura 16. Lavado con jabón alcalino.

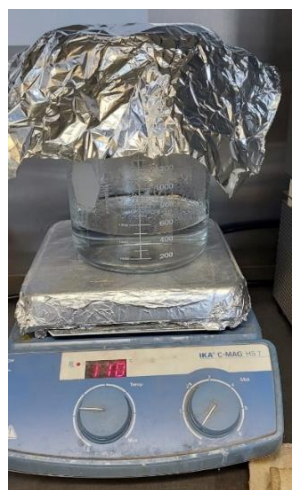


Figura 18. Calentamiento de agua destilada.



Figura 17 Baño ultrasónico.

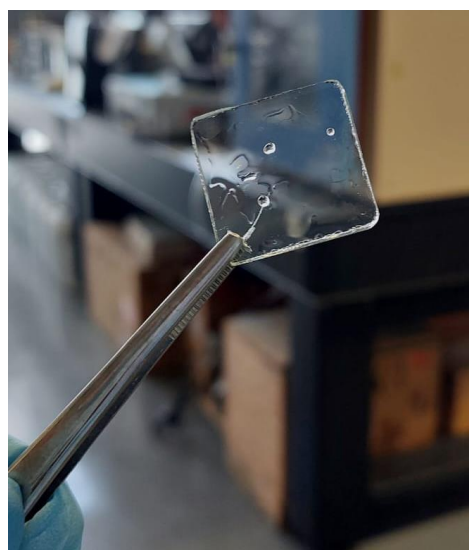


Figura 19 Vidrios limpios, preparados para su secado.

4.2.4. Depósito de ZnO y CdS por Sputtering-RF

Después de su respectivo lavado, se les depositaron los materiales “ventana” constituidos de un semiconductor intrínseco de Óxido de Zinc (ZnO) y el semiconductor tipo “n” de CdS. Dichos materiales ZnO y CdS, se depositaron mediante el sistema de erosión catódica magnetoplanar en modo de radio frecuencia (Sputtering-RF) con un gas de reacción de Ar. El espesor obtenido del ZnO+CdS es de alrededor de 200 nm con una transmitancia promedio mayor al 80%. Las condiciones de depósito están resumidas en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de depósito del ZnO y CdS por Sputtering-RF.

Sputtering RF CS385 - CS393

	ZnO	CdS
Parámetros	Valores	Valores
T_s (°C)	300	225
Pot (W)	230	100
P (mTorr)	10	12
t ↑ (min.)	22	9
t ↓ (min.)	23	21
td (min.)	21	24
Rate (Å/s)	0.7 - 0.9	0.9 - 1
d (nm)	100	140
ρ	5.6	4.81
Tooling	100	75
Z Factor	0.56	1.02

4.2.5. Depósito de CdTe CSS

A continuación, se depositó una película de CdTe mediante el equipo de sublimación de espacio cercano (CSS), esta película se conoce como capa absorbente el cual es un material semiconductor tipo “p”. Los parámetros del depósito del CdTe permanecieron constantes, como son: temperatura de fuente de 600 °C, temperatura de sustrato de 500 °C, presión de depósito de 100 mTorr y tiempo de depósito de 4 min; la variación en el espesor se debe a la naturaleza experimental del sistema. Se hace un vacío base con una bomba mecánica del orden de 4×10^{-2} Torr y un vacío base con la bomba turbo del orden de 1.6×10^{-5} Torr para todas las muestras. Se realiza un depósito de CdTe de 13 mg sobre una chalupa de grafito y se esparce como se muestran en las figuras 20 y 21. Las condiciones de depósito están resumidas en la Tabla 6. Cada conjunto de depósitos corresponde a 3 muestras colocadas en los sistemas CSS y CSVT, para sus respectivos depósitos de CdTe y CdCl₂.

Tabla 6. Parámetros de depósito del CdTe mediante el equipo CSS. Conjunto 1, conjunto 2, y conjunto 3.

Parámetros	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3
	CS385 - 387	CS388 - 390	CS391 - 393
Ar (sccm)	15.1		
O ₂ (sccm)	14.8		
T _s (°C)	500		
T _f (°C)	600		
t _{o2} (min)	10		
t _c 1 (min)	03:15	03:30	
t _c 2 (min)	1		
t _d (min)	03:45		
t _T (min)	08:15		



Figura 20. 13 mg de CdTe para su depósito.



Figura 21. CdTe en chalupa de grafito.

4.2.6. Depósito de CdCl₂ + TT (CSV_T) + lavado

Posteriormente, se depositó una película delgada de Cloruro de Cadmio (CdCl₂) en el sistema de transporte de vapor en espacio cercano (CSV_T), haciendo un vacío base con una bomba mecánica del orden de 10⁻² Torr y un vacío base con la bomba turbo del orden de 10⁻⁵ Torr para todas las muestras. Al finalizar el depósito se realizó un tratamiento térmico (TT) al CdTe con el CdCl₂, a una temperatura de 400 °C por 30 min; posteriormente paso por un proceso de lavado con agua desionizada y nitrógeno seco. Las condiciones de depósito están resumidas en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de depósito del CdCl₂ mediante el equipo CSV_T. Conjunto, conjunto 2, conjunto 3.

Parámetros	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3
	CS385 - 387	CS388 - 390	CS391 - 393
T _s (°C)	200		
T _f (°C)	360		
T _c (min)	2:30		
T _d (min)	3		

4.2.7. Depósito de Sb₂Te₃ por Sputtering-DC

Posteriormente y con el equipo de erosión catódica magnetoplanar de corriente directa (Sputtering-DC), se deposita una capa de Sb₂Te₃, la cual se depositó en base al trabajo (Mendoza Pérez et al., 2020), considerando una presión de depósito de 5 mTorr a una razón de depósito de 25 nanómetros sobre minuto (nm/min). Los parámetros que se consideraron variar en este trabajo fueron: el espesor, 25 nm, 50 nm, 75 nm, 100 nm y 125 nm y la temperatura de sustrato con valores de 25 °C, 200 °C, 300 °C y 400 °C. En la Tabla 7 se muestran las condiciones de depósito del Sb₂Te₃, así como su variación de espesor manteniendo constante la temperatura de sustrato T_s=200 °C y al espesor constante de d=100 nm del Sb₂Te₃ variando la temperatura de sustrato.

Se hace un vacío base con una bomba mecánica y posteriormente un alto vacío con la bomba turbo para todas las muestras, con una atmósfera de Ar. En la Tabla 8 se pueden apreciar los parámetros de depósito del Sb₂Te₃ y en la Tabla 9 se muestran los espesores del CdTe de las celdas solares, así como su asignación de parámetros variables de espesor del Sb₂Te₃ y de temperatura.

Tabla 8. Parámetros de depósito del Sb₂Te₃ mediante el equipo Sputtering DC.

Parámetros	CS390	CS385	CS386	CS387	CS389	CS391	CS392	CS393
ω (rpm)	6							
Pot (W)	60							
T_s (°C)	200				25	200	300	400
P (mTorr)	5					5.1	5.5	5.5
Rate (Å/s)	3.9	4.0	4.7	4.2	4.1	4	3.9	3.9
t_a (min)	1.0	2.1	2.4	5.0	4.1	4.1	4.2	4.2
d (nm)	25	50	75	125	100			
ρ	6.5							
Tooling	175							
Z Factor	1							

Tabla 9. Espesor del CdTe y espesor del Sb₂Te₃ considerado una temperatura T_s=200 °C y un d=100 nm constante.

Muestra (CS)	Espesor del CdTe (μm)	Espesor del Sb ₂ Te ₃ (nm), <u>T_s=200 °C</u>
388 (ref)	3.7	0
390	3.4	25
385	6.9	50
386	8.7	75
391	6.7	100
387	5.4	125
Muestra (CS)	Espesor del CdTe (μm)	Temperatura (°C), <u>d=100 nm</u>
388 (ref)	3.7	0
389	5.4	25 (ambiente)
391	6.7	200
392	4.7	300
393	6.8	400

4.2.8. Depósito del PEDOT:PSS por Spin Coating +TT

Posteriormente, se realizó el depósito del polímero orgánico Poli(3,4-etilendioxitiofeno): poli(estirensulfonato) (PEDOT:PSS) a través de la técnica de depósito mediante centrifugado, lo cual se logra gracias al equipo de Spin Coating, terminado el depósito se somete a un tratamiento térmico durante 30 minutos a 100 °C, con el propósito de eliminar el agua que pudiera permanecer durante el depósito de este semiconductor orgánico. Las condiciones de depósito se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros de depósito del PEDOT:PSS mediante el equipo Spin Coating más tratamiento térmico. Conjunto 1 realizado el 20/04/2023, conjunto 2 realizado el 23/05/2023.

Parámetros	Conjunto 1	Conjunto 2
	CS385 – 386, 387, 388, 390	CS389 – 391, 392, 393,
Volumen (μl)	250	250
ω (rpm)	5000	5000
T (s)	30	30
TRATAMIENTO TERMICO		
T_o (°C)	102	101
T_r (°C)	100	
T (min.)	30	

4.2.9. Depósito de Cu y Mo por Sputtering-DC

Finalmente, se realizó el depósito de los contactos posteriores metálicos de Cobre (Cu) y Molibdeno (Mo), esto se realiza en el mismo equipo Sputtering-DC, en donde se depositó el Sb_2Te_3 .

4.2.10. Equipo de caracterización I vs. V

El equipo mediante el cual se caracterizaron periódicamente las celdas solares fue en el simulador solar certificado AAA Oriel Newport, que brinda condiciones STC (intensidad de lámpara de Xenón de 1 Sol (1000 W/m^2) y un filtro corrección espectral AM 1.5, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), el área de iluminación del simulador solar de 480 cm^2 . En la Figura 22 se puede apreciar el equipo de caracterización I vs. V y en la Figura 23 se observa la calibración del equipo I vs. V con piranómetro y celda de referencia.

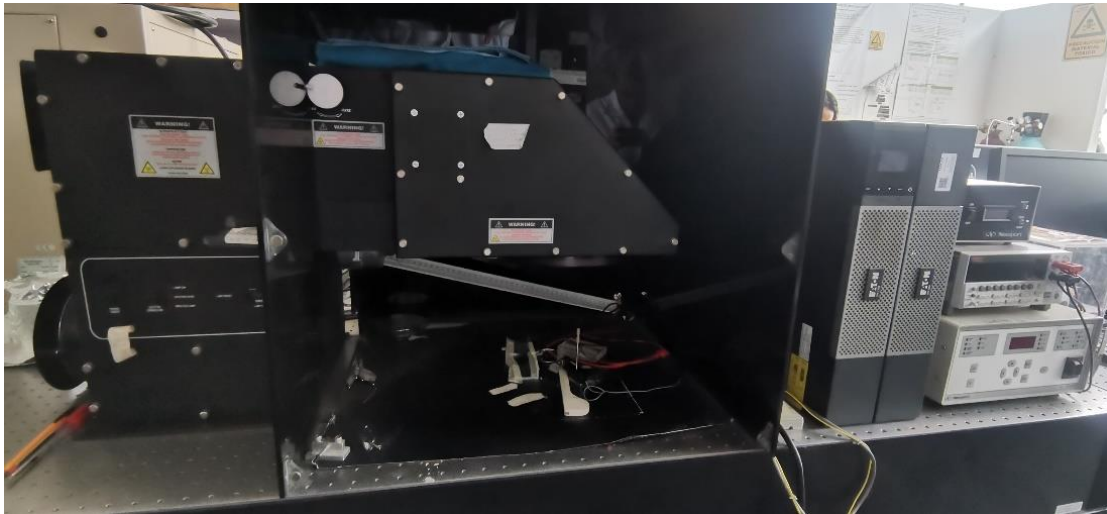


Figura 22. Equipo de caracterización I vs. V.

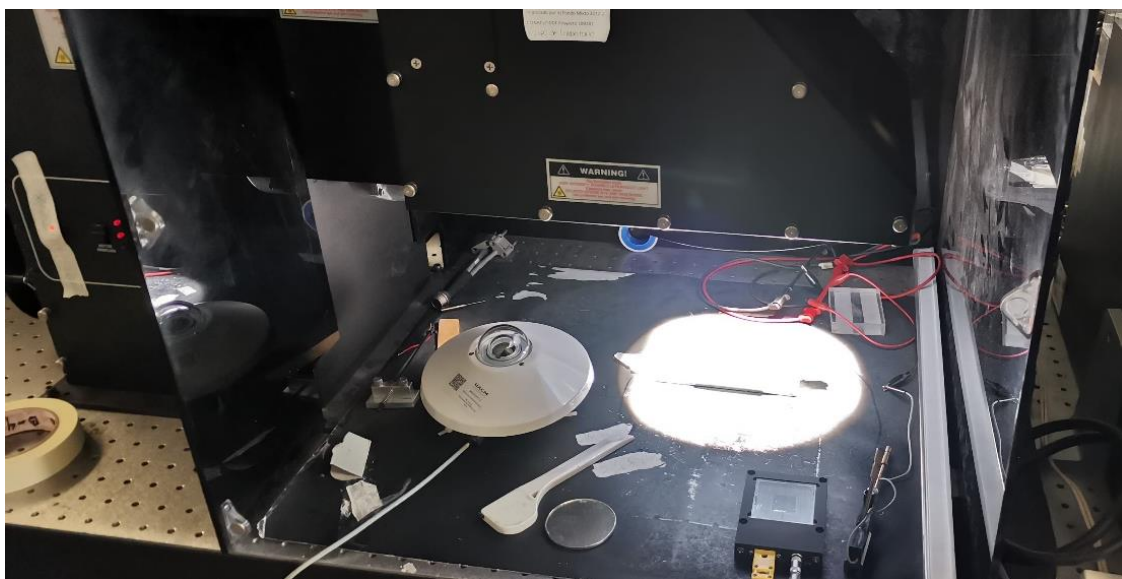


Figura 23. Calibración de equipo de caracterización I vs. V.

4.2.11. Medición periódica

Para tener los resultados que buscamos es necesario un tener registro de mediciones periódicas mediante nuestro equipo de caracterización I vs. V al conjunto de nuestras celdas solares, dichas mediciones periódicas se realizaron a lo largo de un año.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Caracterización periódica I vs. V

Las mediciones de I vs. V se realizaron para un conjunto de 8 contactos (subceldas) mediante el equipo de caracterización I vs. V, con el propósito de evaluar la respuesta fotovoltaica de las celdas solares con y sin Sb_2Te_3 , y saber si se mantienen los parámetros fotovoltaicos al usar el Sb_2Te_3 como una capa buffer, así mismo saber si evita la degradación de las celdas solares híbridas de CdTe/PEDOT:PSS. El área total de la celda es de 6.4 cm^2 , mientras que el área del contacto de las subceldas, que es la de interés es de 0.1 cm^2 . A continuación se muestran las Tablas 11, 12 y 13 de las mediciones realizadas el 04/05/2023, 10/10/2023 y 15/02/2024 respectivamente.

5.1.1. Primera medición

Tabla 11. Primera medición en simulador solar 04/05/2023.

<u>Referencia</u>					
$T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$					
CS					
(Referencia)	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS388	1	0.583	25.3	38.0	6.2
CS388	2	0.584	23.5	45.6	6.9
Promedio		0.583	24.4	41.8	6.6

<u>Espesor = 25 nm</u>					
$T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS390	2	0.466	38.6	37.4	7.4
CS390	3	0.499	34.1	38.0	7.2
CS390	4	0.476	29.3	38.4	5.9
CS390	8	0.403	26.9	31.1	3.7
CS390	9	0.497	31.2	34.0	5.8

Promedio		0.468	32.1	35.8	6.1
<u>Espesor = 50 nm</u>					
<i>T = 200 °C</i>					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS385	3	0.759	34.1	43.1	12.3
CS385	4	0.755	33.8	42.5	12.0
CS385	6	0.741	33.4	40.5	11.1
CS385	7	0.746	8.90	67.5	5.1
CS385	9	0.760	35.6	42.8	12.9
Promedio		0.752	29.2	47.3	10.7

<u>Espesor = 75 nm</u>					
<i>T = 200 °C</i>					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS386	6	0.760	38.3	36.4	12.5
CS386	7	0.750	29.6	46.8	12.2
CS386	8	0.719	27.3	35.4	7.7
CS386	9	0.721	27.8	39.5	8.8
Promedio		0.737	30.8	39.5	10.3

<u>Espesor = 125 nm</u>					
<i>T = 200 °C</i>					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS387	3	0.370	25.0	36.8	3.7
CS387	4	0.380	26.9	37.7	4.2
CS387	8	0.440	31.1	36.1	5.5
CS387	9	0.339	27.9	36.8	3.8
Promedio		0.382	27.7	36.8	4.3

$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$					
<i>Espesor = 100 nm</i>					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS389	1	0.415	29.1	32.2	4.3
CS389	2	0.316	28.1	30.4	3.0
CS389	3	0.501	36.9	29.1	5.9
CS389	4	0.637	37.6	35.7	9.5
CS389	6	0.457	26.4	31.0	4.2
CS389	7	0.630	31.6	30.9	6.8
CS389	8	0.429	27.2	34.6	4.5
CS389	9	0.496	27.8	32.9	5.0
Promedio		0.485	30.6	32.1	5.4

$T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$					
<i>Espesor = 100 nm</i>					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS391	1	0.535	32.8	30.0	5.8
CS391	2	0.599	28.9	31.0	5.9
CS391	3	0.592	30.3	30.6	6.1
CS391	4	0.615	26.3	33.9	6.1
CS391	6	0.561	28.0	31.4	5.4
CS391	7	0.555	16.8	26.2	2.7
CS391	8	0.581	18.6	40.8	4.9
CS391	9	0.585	15.0	37.4	3.6
Promedio		0.577	24.6	32.7	5.1

<i>T = 300 °C</i>					
<i>Espesor = 100 nm</i>					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS392	1	0.558	30.1	31.8	5.9
CS392	2	0.556	26.6	31.2	5.1
CS392	3	0.540	31.7	35.2	6.7
CS392	4	0.531	28.9	28.9	4.9
CS392	6	0.540	26.8	31.5	5.1
CS392	7	0.462	18.7	29.3	2.8
CS392	8	0.550	21.2	27.5	3.5
CS392	9	0.520	28.5	29.8	4.9
Promedio		0.532	26.6	30.7	4.8

<i>T = 400 °C</i>					
<i>Espesor = 100 nm</i>					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS393	1	0.254	16.1	25.5	1.1
CS393	2	0.490	14.5	31.1	2.4
CS393	3	0.486	18.9	29.1	2.9
CS393	4	0.415	18.9	30.6	2.6
CS393	6	0.385	15.4	28.8	1.9
CS393	7	0.423	18.7	33.6	2.9
CS393	8	0.495	11.3	34.3	2.1
CS393	9	0.426	17.3	31.8	2.6
Promedio		0.421	16.4	30.6	2.3

5.1.2. Segunda medición

Tabla 12. Segunda medición en simulador solar 10/10/2023.

<u>Referencia</u>					
$T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS388	1	0.577	22.8	39.8	5.5
CS388	2	0.587	20.1	32.4	4.0
CS388	3	0.556	24.3	48.9	6.9
CS388	4	0.589	24.5	51.8	7.8
CS388	7	0.530	22.7	40.1	5.1
CS388	8	0.527	19.8	28.9	3.1
CS388	9	0.585	25.1	52.7	8.1
Promedio		0.564	22.8	42.1	5.8

<u>Espesor = 50 nm</u>					
$T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS385	1	0.766	30.9	50.4	12.6
CS385	2	0.778	25.2	47.1	9.7
CS385	4	0.765	25.2	48.8	9.9
CS385	6	0.753	29.5	49.7	11.6
CS385	7	0.747	28.6	50.9	11.4
CS385	8	0.76	26.1	54.8	11.4
CS385	9	0.774	32.3	46.1	12.1
Promedio		0.763	28.3	49.7	11.2

Espesor = 125 nm

T = 200 °C

CS	Contacto	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS387	3	0.468	23.9	34.2	4.0
CS387	4	0.527	26.8	43.7	6.5
CS387	7	0.502	26.6	35.8	5.0
CS387	8	0.532	32.6	39.1	7.1
CS387	9	0.519	31.2	35.1	5.9
Promedio		0.509	28.2	37.6	5.7

T = 25 °C

Espesor = 100 nm

CS	Contacto	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS389	1	0.687	28.8	40.6	8.4
CS389	2	0.714	27.0	45.7	9.3
CS389	3	0.662	28.0	45.4	8.9
CS389	4	0.720	30.9	46.1	10.8
CS389	6	0.683	27.6	39.6	7.8
CS389	7	0.624	23.5	31.7	4.9
CS389	8	0.682	29.5	40.0	8.4
CS389	9	0.710	33.8	32.3	8.1
Promedio		0.685	28.6	40.2	8.3

5.1.3. Tercera medición

Tabla 13. Tercera medición en simulador solar 15/02/2024.

<u>Referencia</u>					
<i>T = 200 °C</i>					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS388	1	0.617	27.5	40.0	7.1
CS388	2	0.629	24.9	37.9	6.2
CS388	3	0.595	26.8	44.2	7.4
CS388	4	0.637	27.9	47.5	8.9
CS388	6	0.571	29.3	41.7	7.3
CS388	7	0.571	27.7	39.5	6.6
CS388	8	0.570	27.4	43.5	7.1
CS388	9	0.649	29.3	49.1	9.8
Promedio		0.604	27.6	42.9	7.5

<u>Espesor = 50 nm</u>					
<i>T = 200 °C</i>					
CS	Contacto	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS385	1	0.759	34.5	47.5	13.1
CS385	2	0.780	27.4	45.6	10.2
CS385	4	0.768	29.4	48.0	11.4
CS385	6	0.752	33.0	48.3	12.6
CS385	7	0.761	34.5	47.8	13.2
CS385	8	0.777	27.4	45.5	10.2
Promedio		0.766	31.1	47.1	11.8

Espesor = 125 nm

T = 200 °C

CS	Contacto	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS387	1	0.619	32.8	34.4	7.3
CS387	2	0.459	29.4	30.1	4.2
CS387	3	0.642	28.4	41.5	7.9
CS387	4	0.656	31.5	38.9	8.4
CS387	6	0.637	37.3	33.9	8.5
CS387	7	0.617	33.1	33.8	7.3
CS387	8	0.637	36.2	35.4	8.6
CS387	9	0.585	35.4	33.9	7.4
Promedio		0.606	33.1	35.2	7.4

T = 25 °C

Espesor = 100 nm

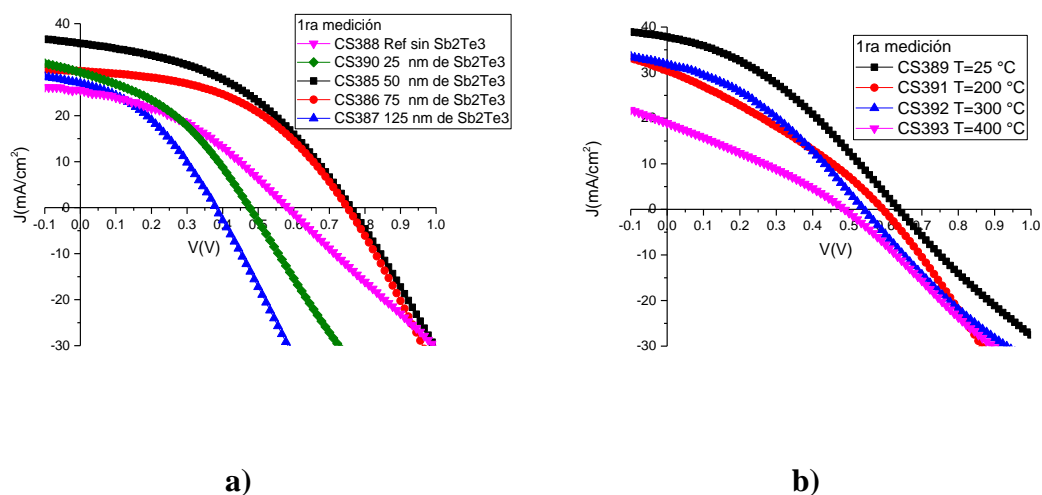
CS	Contacto	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Factor de llenado	Eficiencia
CS389	1	0.694	31.5	40.2	9.2
CS389	2	0.717	30.6	42.1	9.7
CS389	3	0.68	32.6	44.1	10.3
CS389	4	0.728	36.3	44.0	12.2
CS389	6	0.700	30.5	38.4	8.6
CS389	7	0.652	29.9	35.2	7.2
CS389	8	0.688	31.8	36.3	8.3
CS389	9	0.716	42.2	40.1	12.7
Promedio		0.696	33.2	40.1	9.8

5.2. Gráficas I vs. V

A continuación, se muestran las curvas J vs. V de los diferentes dispositivos fotovoltaicos obtenidos, con sus diferentes variantes, el propósito es medir la respuesta fotovoltaica de estas celdas solares en un periodo de un año, las cuales estarán a la intemperie a temperatura ambiente con el objetivo de evaluar el desempeño de la capa buffer de Sb_2Te_3 para evitar la degradación de estas celdas solares híbridas.

5.2.1. Primera medición curvas J vs. I (04/05/2023)

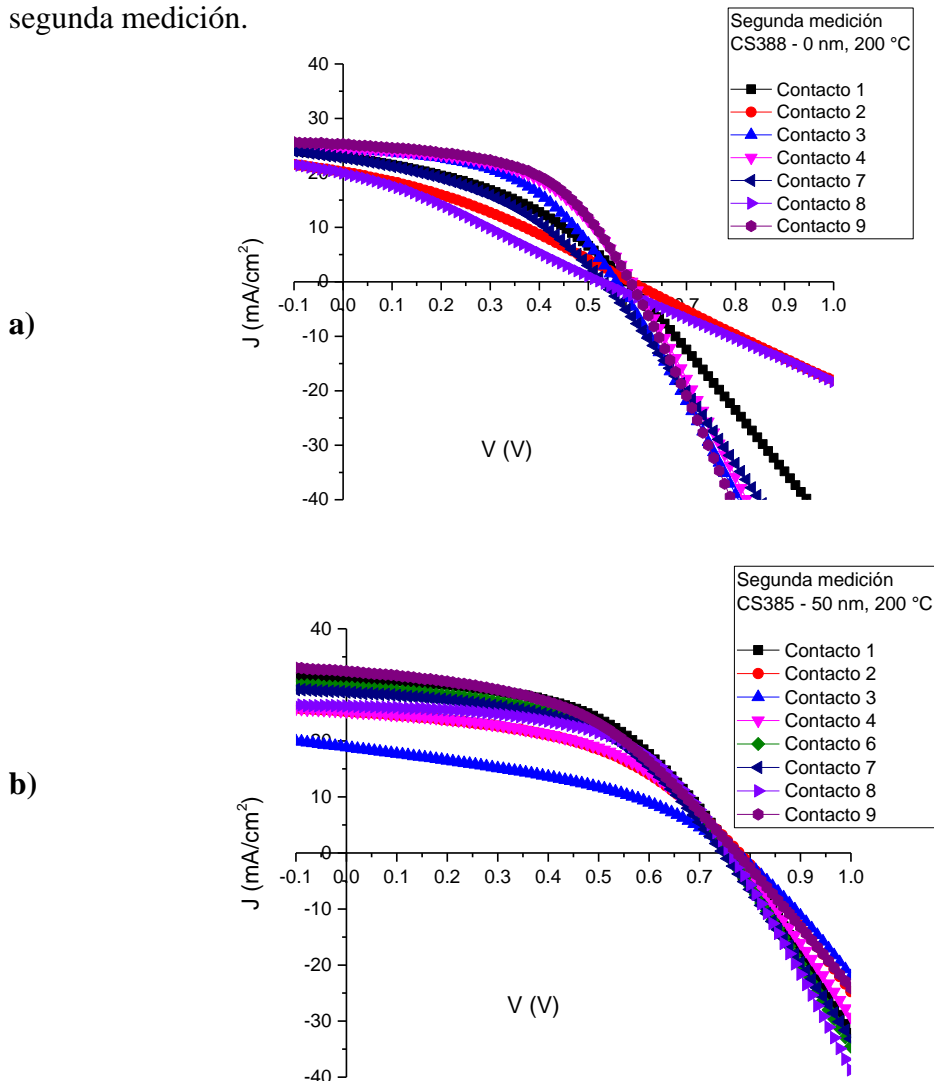
En la gráfica 5, se muestran las curvas J vs. V para las celdas solares obtenidas: variando el espesor del Sb_2Te_3 a una temperatura de sustrato constante de 200 °C y variando la temperatura de sustrato a un espesor de 100 nm del Sb_2Te_3 .

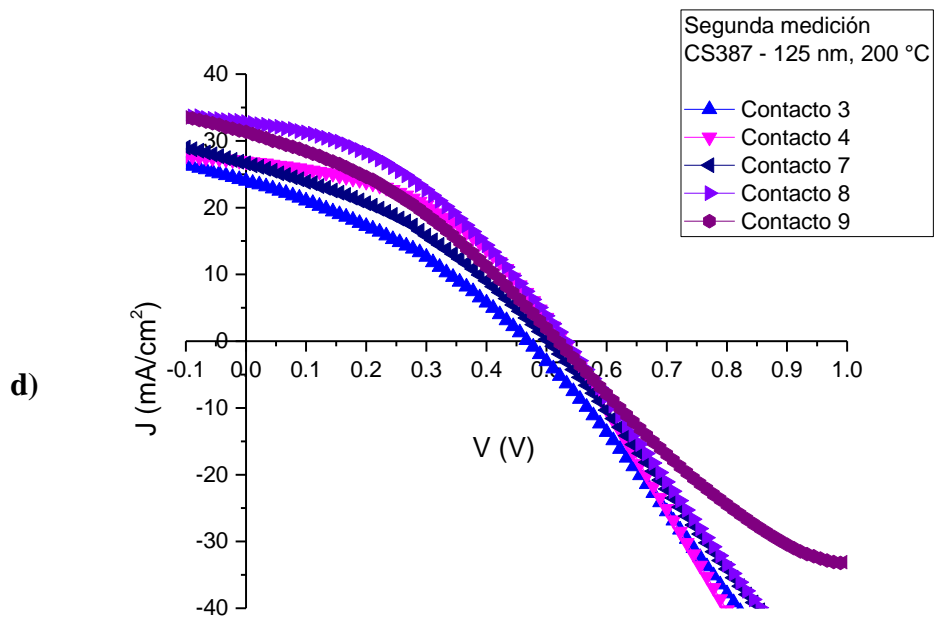
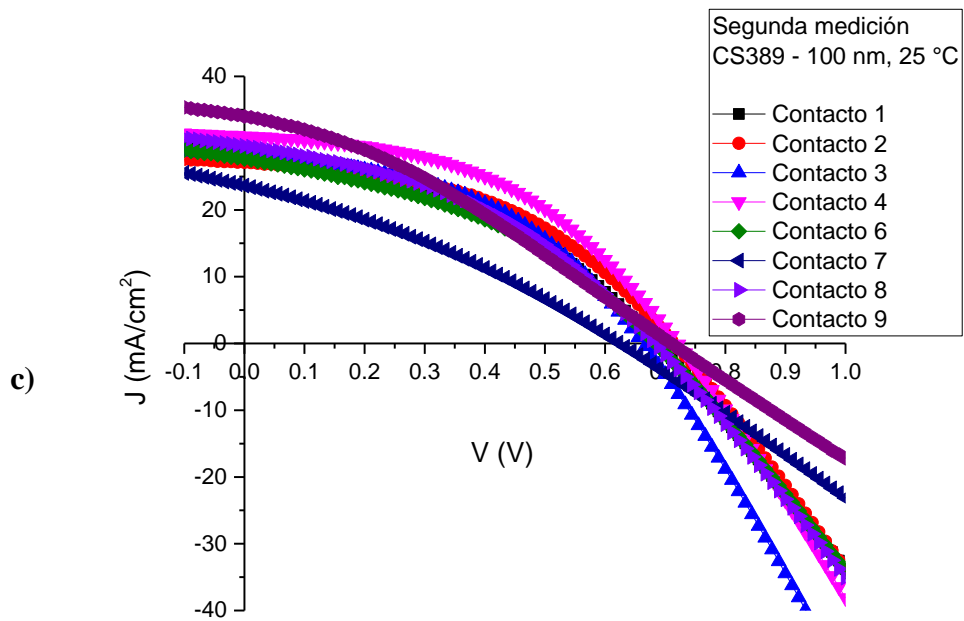


Gráfica 5. Curvas de J vs. V para las celdas solares obtenidas: a) variando el espesor del Sb_2Te_3 , b) variando la temperatura de sustrato.

5.2.2. Segunda medición curvas J vs. I (10/10/2023)

A partir de la primera medición observamos que la mejor respuesta fotovoltaica del conjunto de variación del espesor del Sb_2Te_3 , fue la celda solar **CS385** (50 nm – 200 °C), de la misma forma, pero del conjunto de variación de la temperatura del sustrato se encuentra con mejores valores la celda fotovoltaica **CS389** (25 °C – 100 nm). Es conveniente recalcar que se hará un seguimiento para observar y comparar la degradación de las celdas solares a través del tiempo, por tal motivo se tomarán las celdas CS385, CS389 que fueron las mejores en su conjunto, así mismo la celda de referencia **CS388** (0 nm – 200 °C) y en adición tomaremos la celda **CS387** (125 nm – 200 °C) que obtuvo los más bajos parámetros fotovoltaicos, por lo cual tendremos un panorama de la influencia de los parámetros de depósito del Sb_2Te_3 en las celdas solares híbridas de CdTe – PEDOT:PSS. A continuación, en la gráfica 6 se muestran las curvas de J vs. V de la segunda medición.

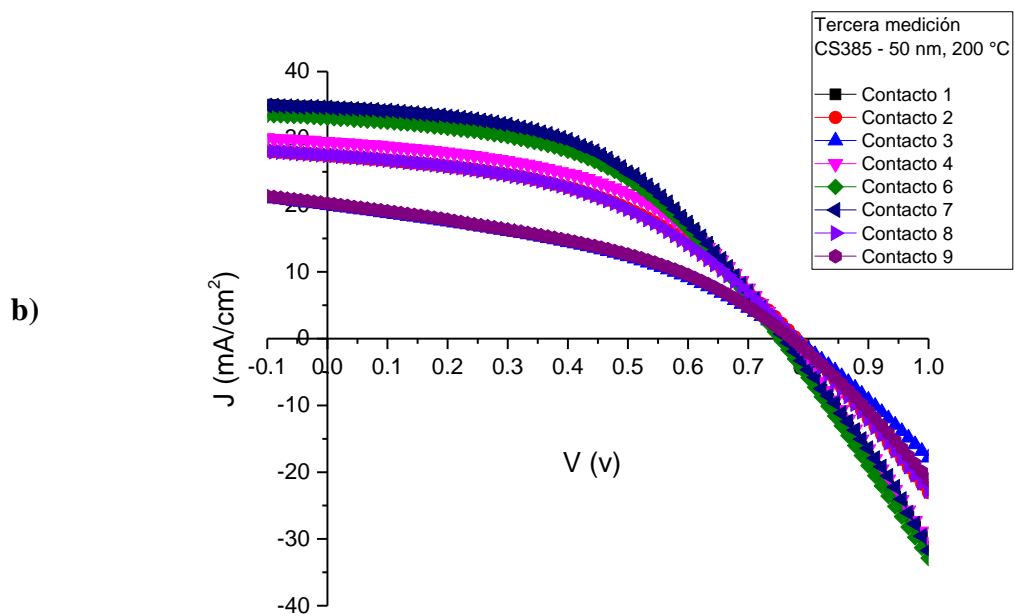
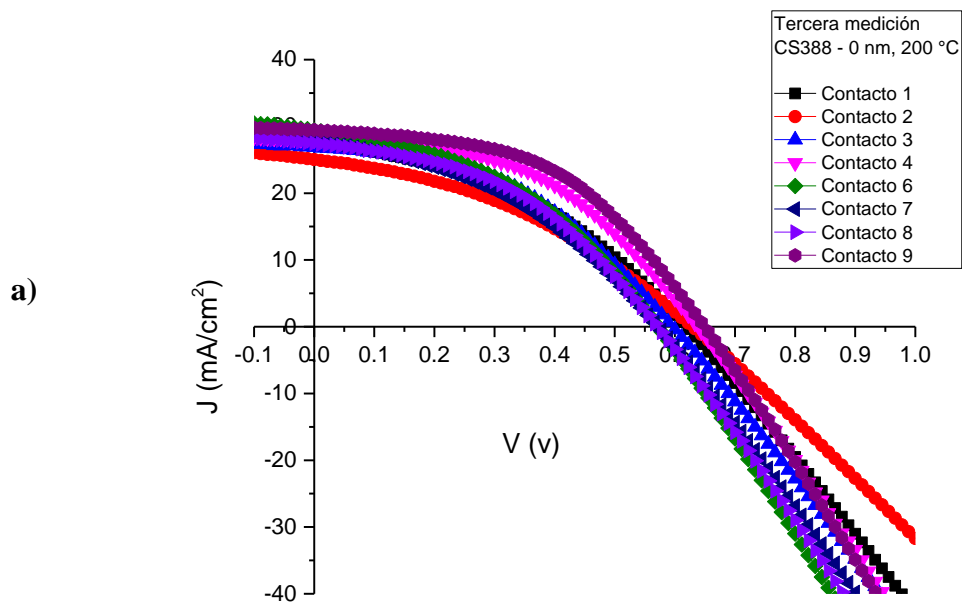


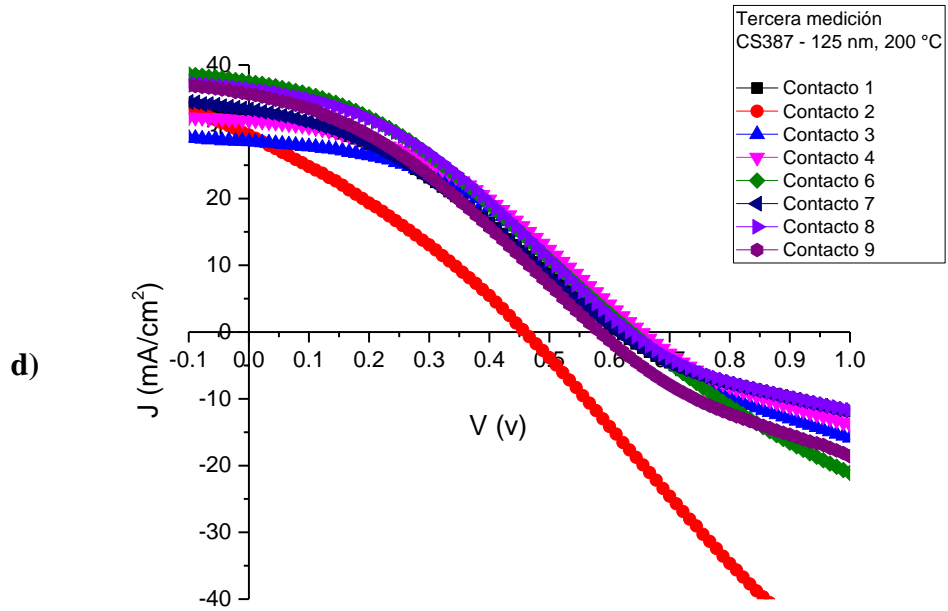
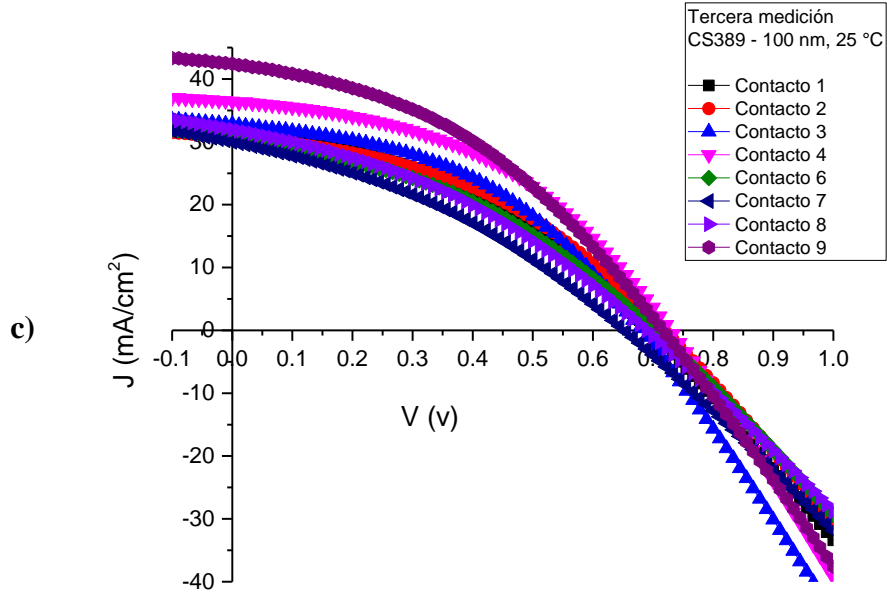


Gráfica 6. Curvas de J vs. V de la tercera medición, para las celdas solares seleccionadas por sus características óptimas para un seguimiento a través del tiempo a) CS388 (0 nm – 200 °C) b) CS385 (50 nm – 200 °C) c) CS389 (25 °C – 100 nm) d) CS387 (125 nm – 200 °C).

5.2.3. Tercera medición curvas J vs. I (15/02/2024)

A continuación, en la gráfica 7 se muestran las curvas de J vs. V de la tercera medición del seguimiento de las celdas seleccionadas para el seguimiento a través del tiempo.

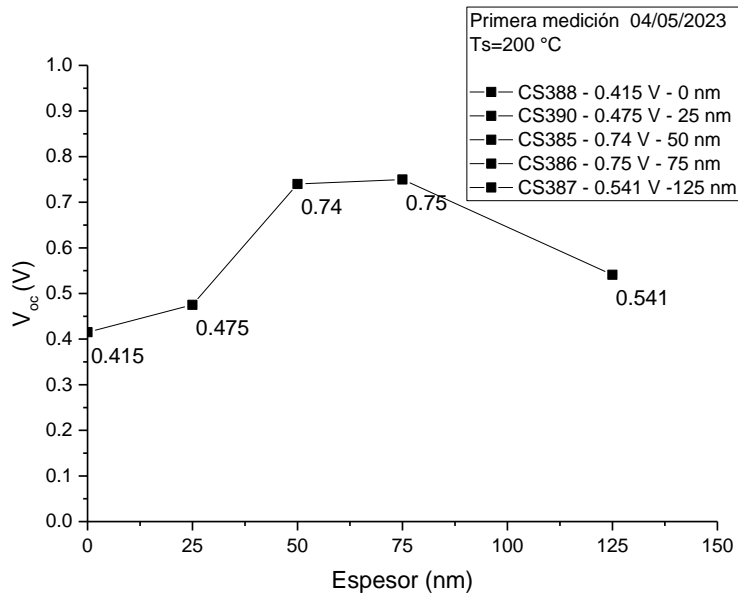




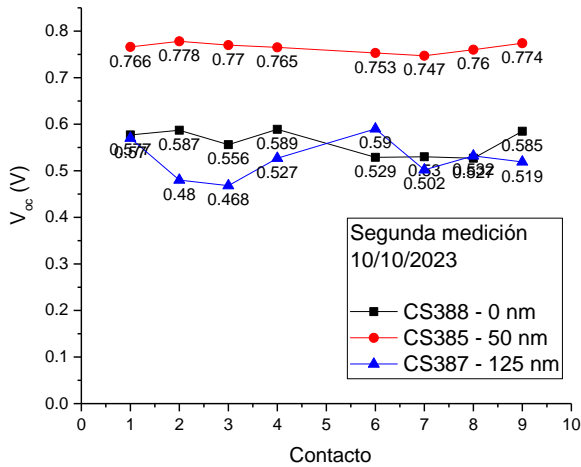
Gráfica 7. Curvas de J vs. V de la tercera medición, para las celdas solares seleccionadas por sus características óptimas para un seguimiento a través del tiempo **a)** CS388 (0 nm – 200 °C) **b)** CS385 (50 nm – 200 °C) **c)** CS389 (25 °C – 100 nm) **d)** CS387 (125 nm – 200 °C).

5.2.4. Comparativa V_{oc} (Espesores)

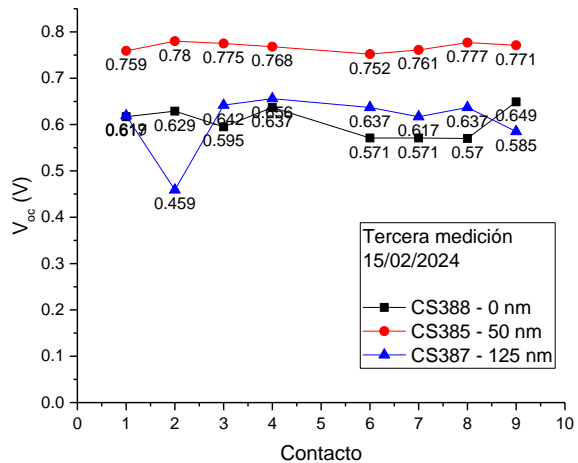
A continuación, en la gráfica 8 se muestran las gráficas comparativas de V_{oc} , la primera medición de V_{oc} con respecto al espesor, la segunda y tercera medición de V_{oc} con respecto a sus contactos.



a)



b)

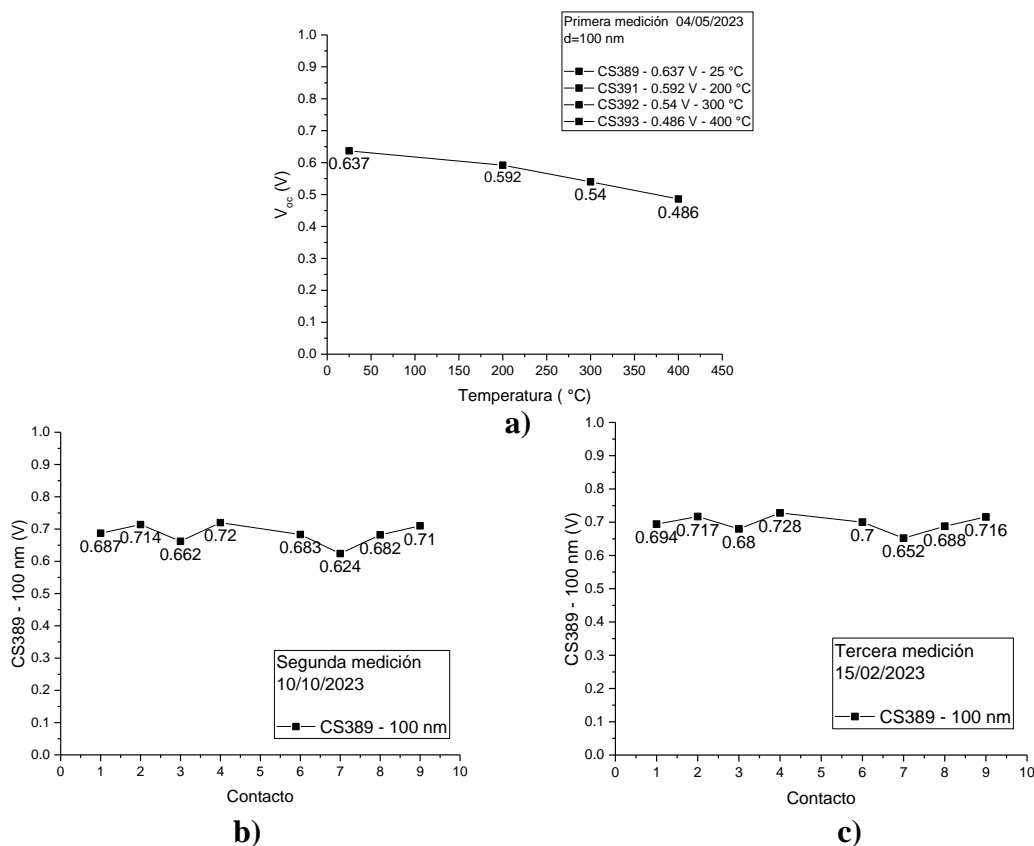


c)

Gráfica 8. Gráficas comparativas de V_{oc} del conjunto de espesores, a) Primera medición con respecto a espesores b) Segunda medición con respecto a sus contactos c) Tercera medición con respecto a sus contactos.

5.2.5. Comparativa V_{oc} (Temperatura)

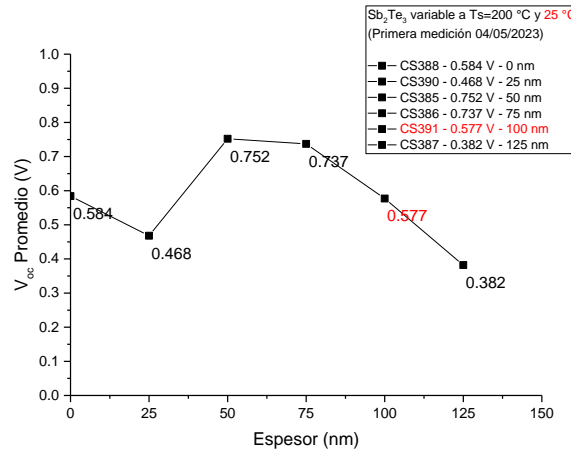
En la gráfica 9 se muestran las gráficas comparativas de V_{oc} , la primera medición con respecto a la temperatura, la segunda y tercera medición con respecto a sus contactos.



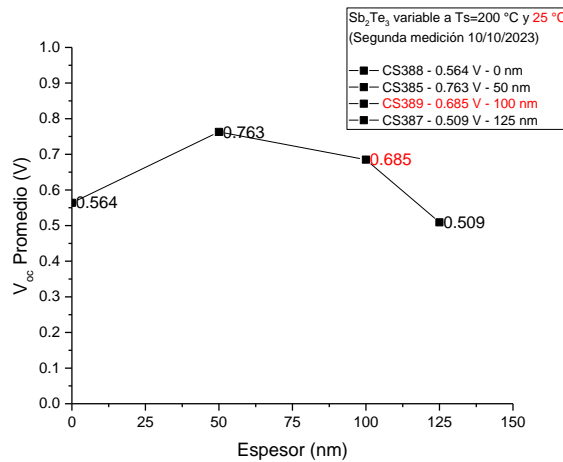
Gráfica 9. Gráficas comparativas de V_{oc} del conjunto de temperatura, a) Primera medición con respecto a temperatura b) Segunda medición con respecto a sus contactos c) Tercera medición con respecto a sus contactos.

Existe una correlación entre el V_{oc} y la temperatura, a medida que se aumenta la temperatura de 25 $^{\circ}C$ a 400 $^{\circ}C$, el V_{oc} disminuye consistentemente, pasando de 0.637 V a 0.486 V respectivamente, lo que indica una disminución del 23.7%. Con respecto al comportamiento de la celda CS398 (25 $^{\circ}C$) presenta el mayor V_{oc} (0.637 V) lo que nos indica que las condiciones de una temperatura ambiente favorecen la generación del Voltaje; la celda CS391 (200 $^{\circ}C$) tiene una reducción moderada 0.592 V, manteniendo valores aceptables; en la celda CS392 (300 $^{\circ}C$) el V_{oc} desciende a 0.540 V, mostrando un patrón de sensibilidad térmica; mientras tanto la celda CS393 (400 $^{\circ}C$) cuenta con el menor V_{oc} (0.486 V) reflejando mayor pérdida de V a altas temperaturas.

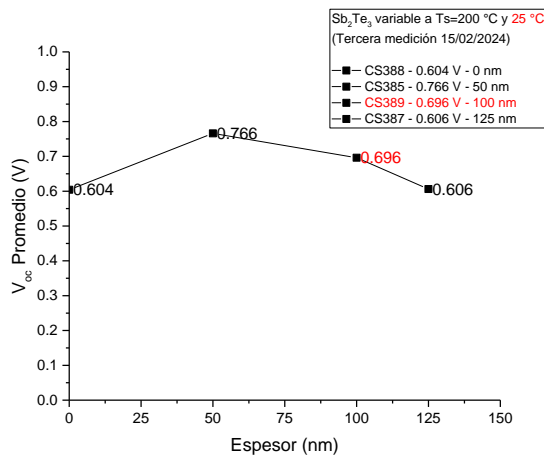
5.2.6. Promedios de primera, segunda y tercera medición (V_{oc} , J_{sc} , FF, Eficiencia)



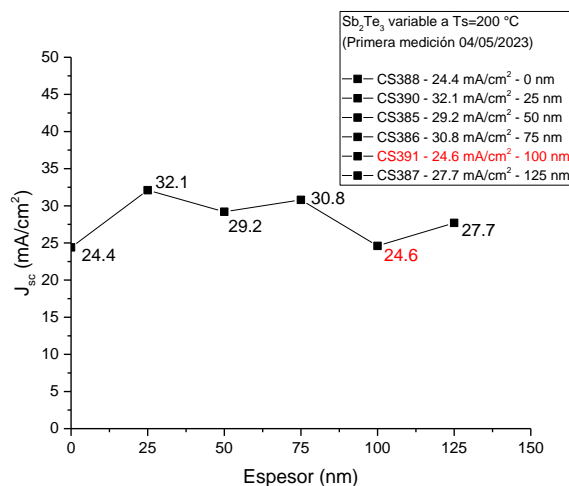
Gráfica 10. Gráficas de V_{oc} Promedio (Primera medición 04/05/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.



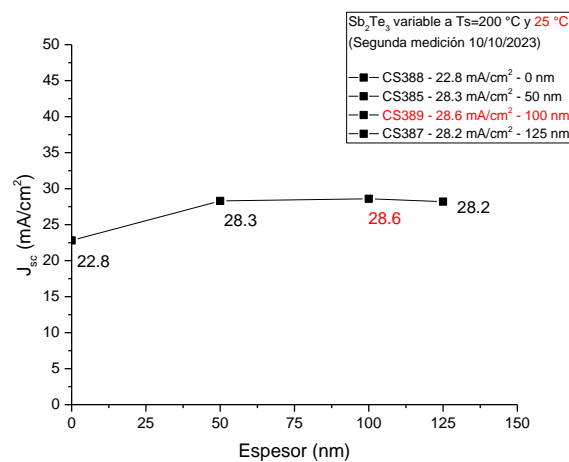
Gráfica 11. Gráficas de V_{oc} Promedio (Segunda medición 10/10/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.



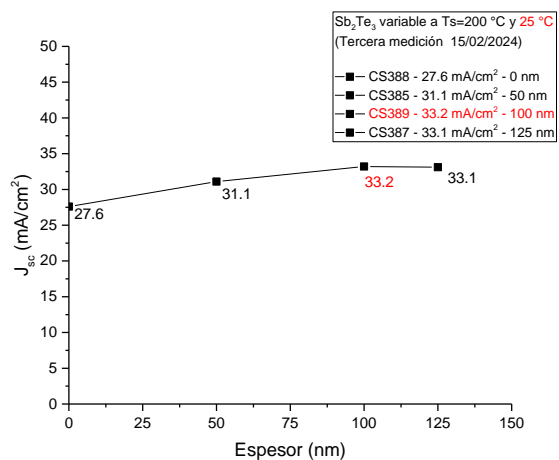
Gráfica 12. Gráficas de V_{oc} Promedio (Tercera medición 15/02/2024), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.



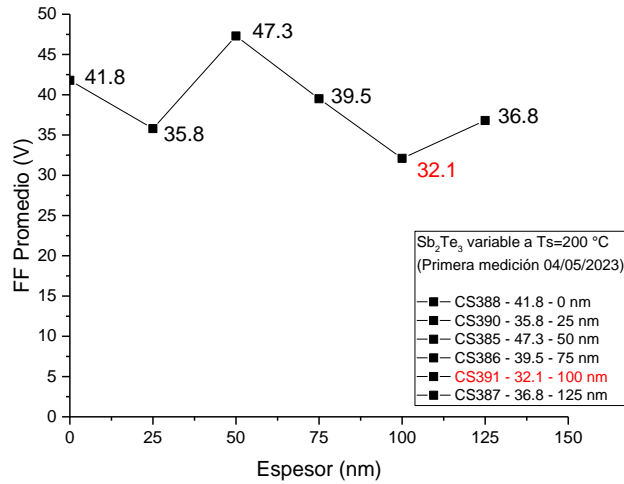
Gráfica 13. Gráficas de J_{sc} Promedio (Primera medición 04/05/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.



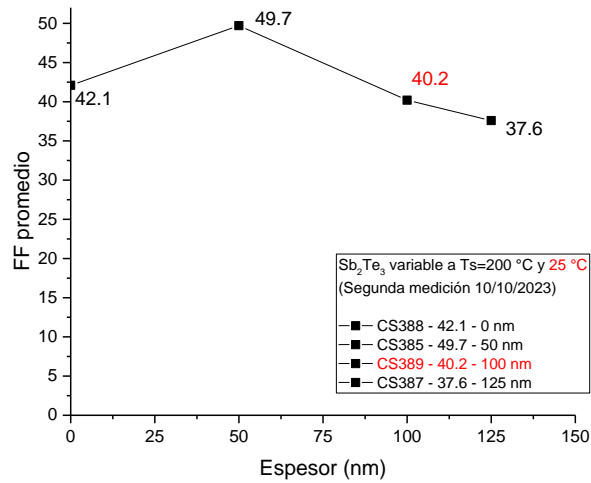
Gráfica 14. Gráficas de J_{sc} Promedio (Segunda medición 10/10/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.



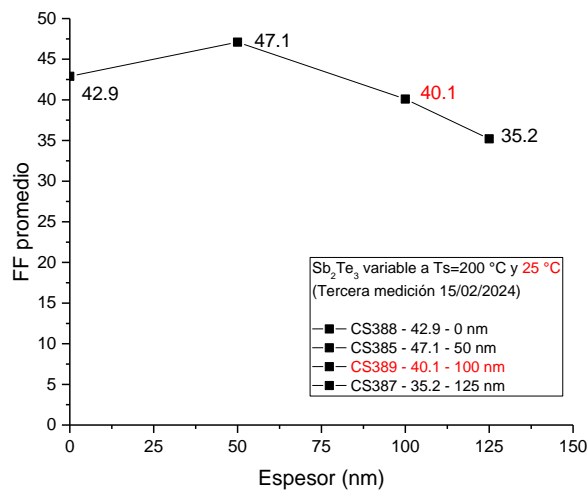
Gráfica 15. Gráficas de J_{sc} Promedio (Tercera medición 15/02/2024), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.



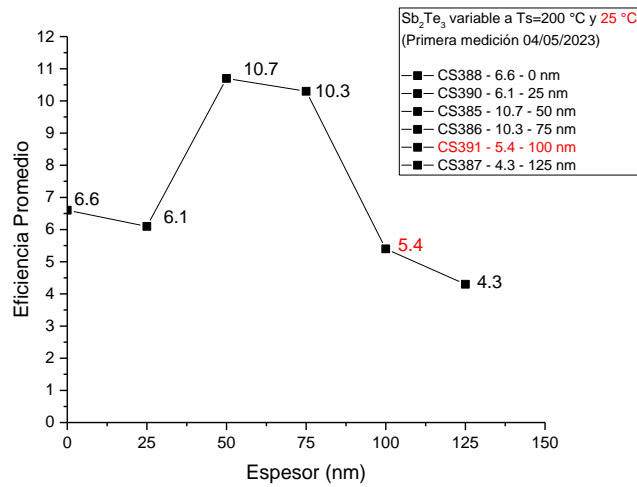
Gráfica 16. Gráficas de FF Promedio (Primera medición 04/05/2023), variando el espesor del Sb₂Te₃ con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.



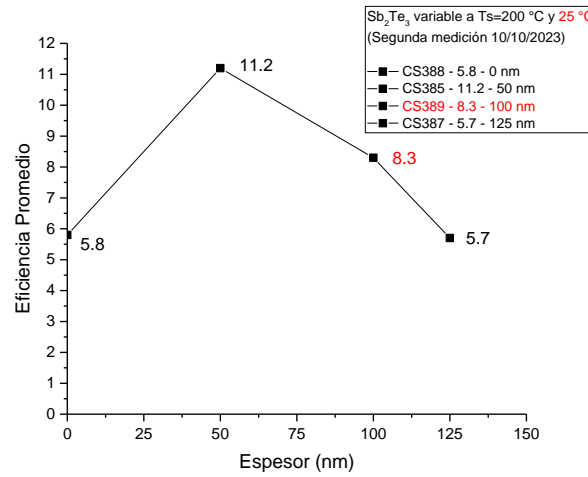
Gráfica 17. Gráficas de FF Promedio (Segunda medición 10/10/2023), variando el espesor del Sb₂Te₃ con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.



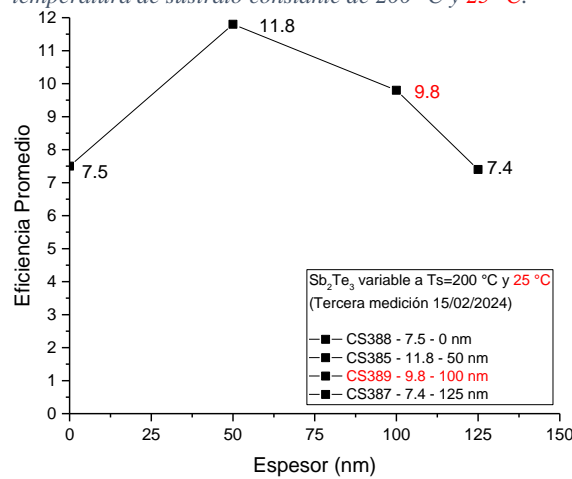
Gráfica 18. Gráficas de FF Promedio (Tercera medición 15/02/2024), variando el espesor del Sb₂Te₃ con una temperatura de sustrato constante de 200 °C y 25 °C.



Gráfica 19. Gráficas de Eficiencia Promedio (Primera medición 04/05/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Gráfica 20. Gráficas de Eficiencia Promedio (Segunda medición 10/10/2023), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Gráfica 21. Gráficas de Eficiencia Promedio (Tercera medición 15/02/2024), variando el espesor del Sb_2Te_3 con una temperatura de sustrato constante de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Con respecto al V_{oc} promedio se muestra en la primera medición que presenta un descenso más pronunciado en espesores mayores a 50 nm, mientras que en la segunda y tercera medición muestran valores similares.

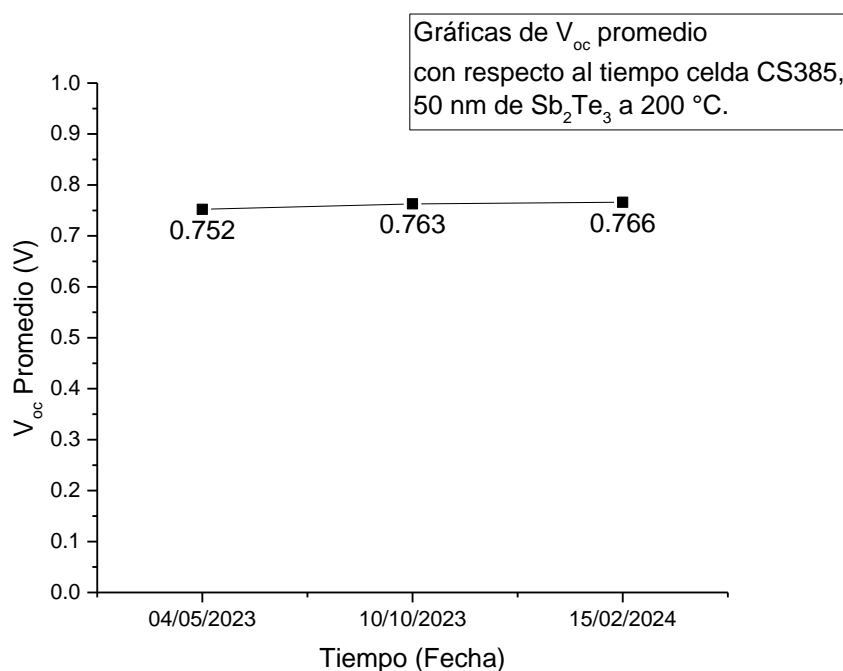
En relación a la J_{sc} promedio todas las mediciones presentan un máximo en 50 nm, lo que nos indica que es el espesor ideal para maximizar la corriente de cortocircuito.

Mientras el FF promedio en la segunda medición tiene los valores más altos, por otra parte, la tercera medición muestra una ligera disminución en espesores mayores.

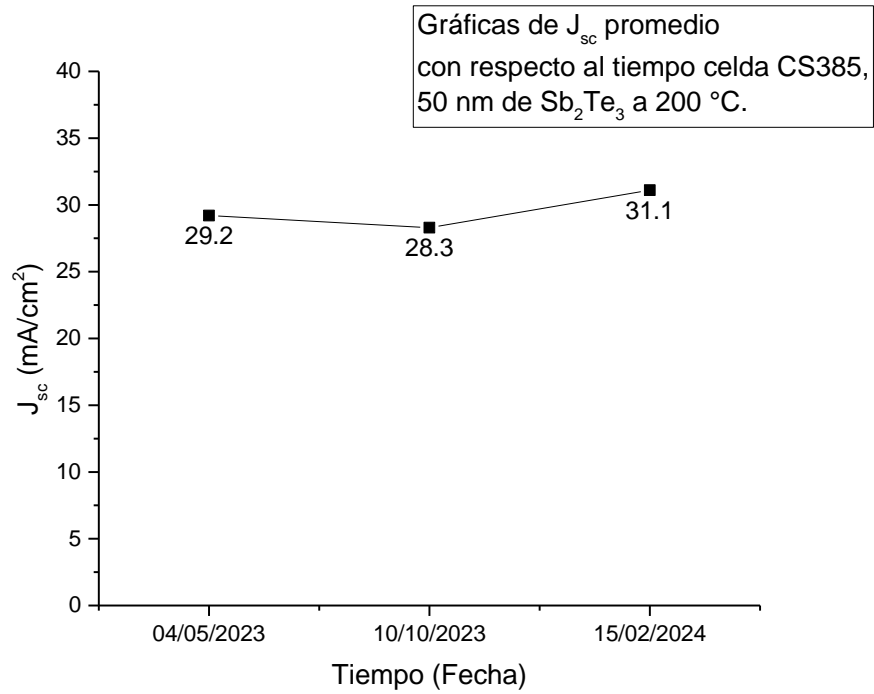
Finalmente, en la eficiencia promedio la segunda medición muestra el mejor desempeño, con un máximo de 50 nm, así mismo la eficiencia disminuye significativamente en espesores mayores a 100 nm en todas las mediciones.

5.2.7. Promedios con respecto al tiempo (V_{oc} , J_{sc} , FF, Eficiencia)

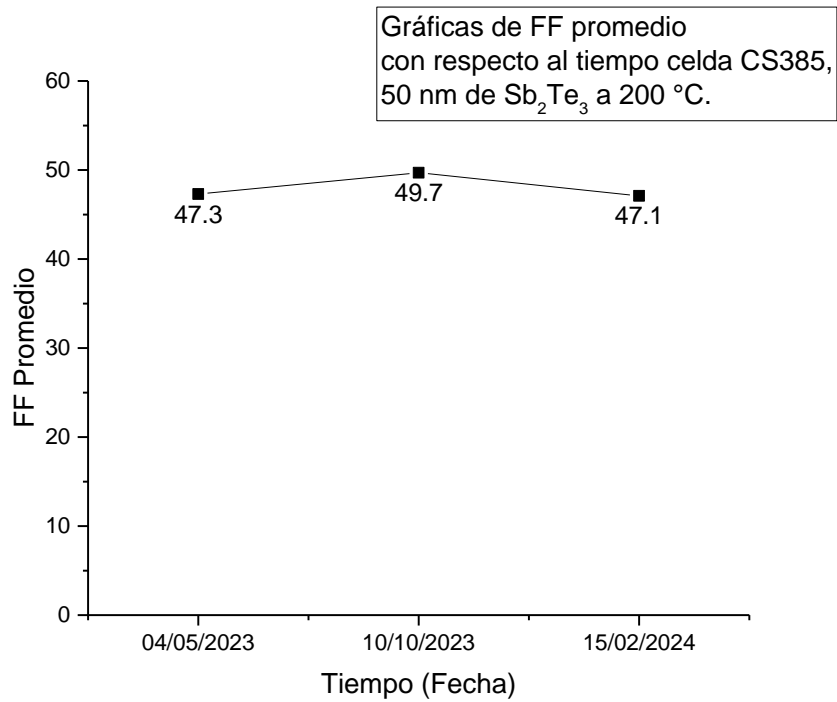
Final mente tenemos las gráficas del seguimiento de la celda solar CS385.



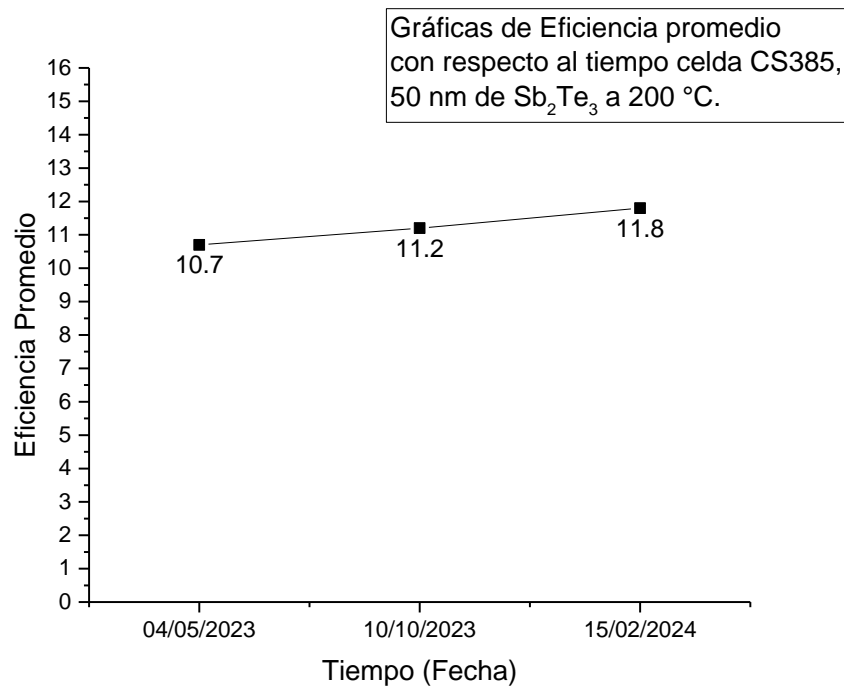
Gráfica 22. Gráficas de V_{oc} promedio con respecto al tiempo 50 nm de Sb_2Te_3 .



Gráfica 23. Gráficas de J_{sc} promedio con respecto al tiempo 50 nm de Sb_2Te_3 .



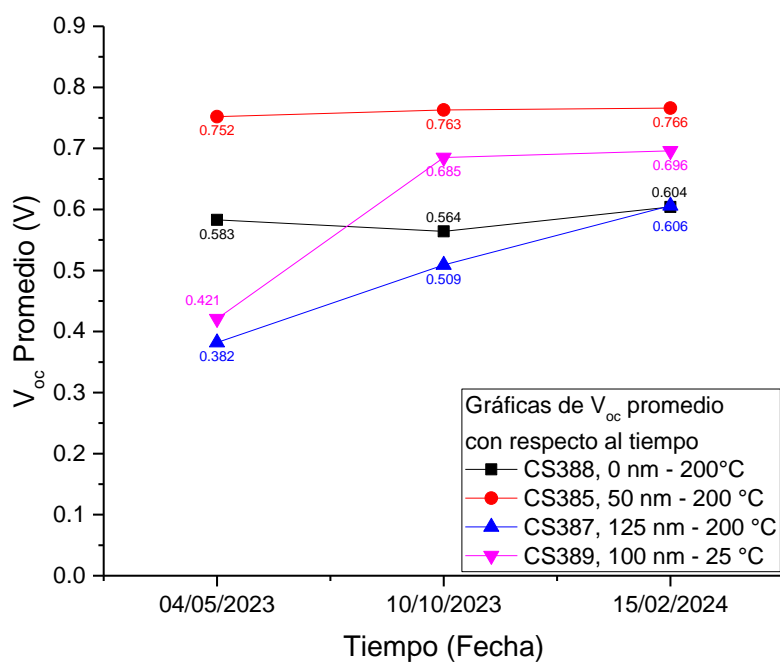
Gráfica 24. Gráficas de FF promedio con respecto al tiempo 50 nm de Sb_2Te_3 .



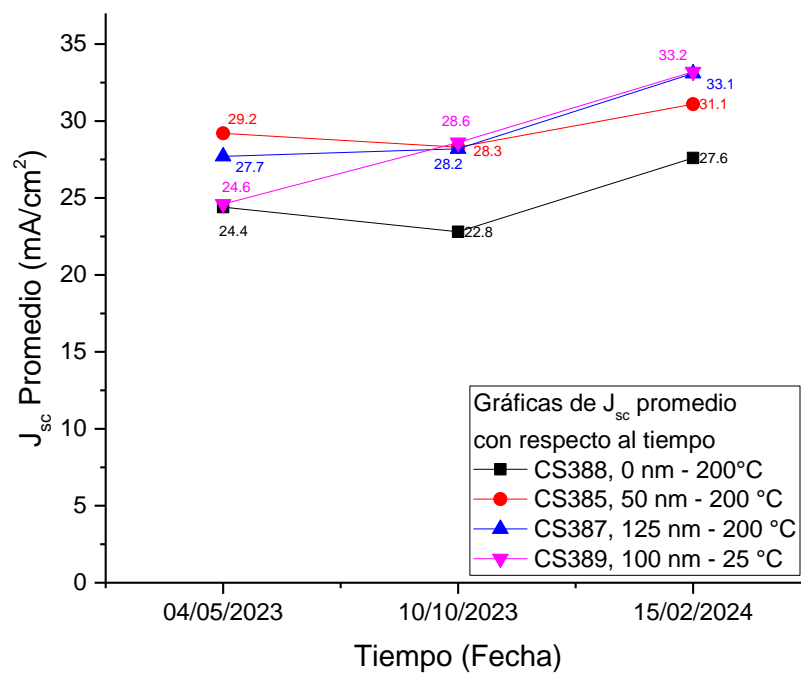
Gráfica 25. Gráficas de Eficiencia promedio con respecto al tiempo 50 nm de Sb_2Te_3 .

A lo largo del tiempo, el desempeño de la celda solar ha mostrado una tendencia prometedora. El V_{oc} promedio se mantiene estable con un ligero aumento, lo que refleja la buena estabilidad del material. La J_{sc} promedio, por su parte, experimenta ligeras caídas. En cuanto al FF promedio, este presenta un comportamiento mayormente estable, registrando su máximo valor en la segunda medición y una disminución leve en la medición posterior. Finalmente, la Eficiencia promedio muestra un incremento constante, logrando un mejor valor en la última medición.

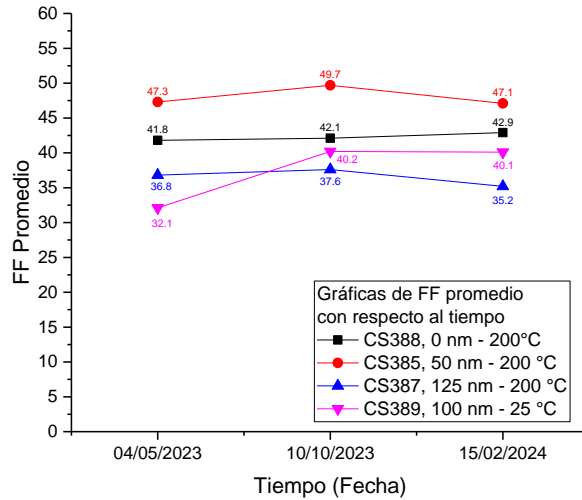
5.2.8. Promedios en conjunto con respecto al tiempo (V_{oc} , J_{sc} , FF, Eficiencia)



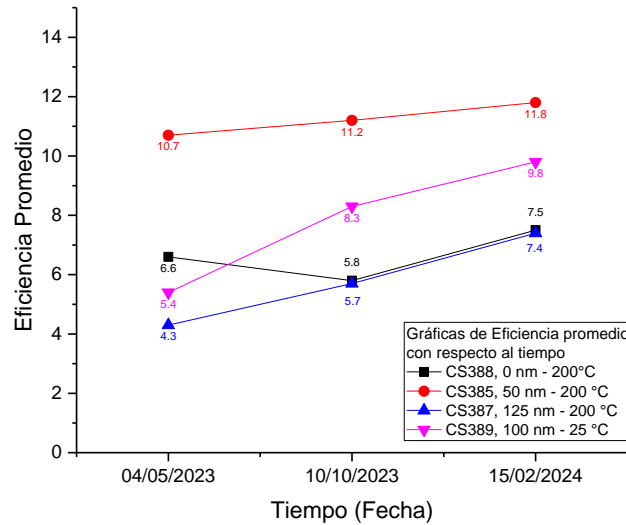
Gráfica 26. Gráficas en conjunto de V_{oc} promedio con respecto al tiempo.



Gráfica 27. Gráficas en conjunto de J_{sc} promedio con respecto al tiempo.



Gráfica 28. Gráficas en conjunto de FF promedio con respecto al tiempo.



Gráfica 29. Gráficas en conjunto de Eficiencia promedio con respecto al tiempo.

En esta sección donde se encuentran los conjuntos promedios de los cuatro parámetros fotovoltaicos podemos analizar más claramente puntos importantes, como lo es en el V_{oc} las celdas con espesores intermedios CS385 y CS389 presentan los valores más estables; pasa algo similar con la J_{sc} con respecto a los espesores, mientras que la celda CS389 (100 nm, 25 °C) tiene un incremento constante, lo que destaca un buen desempeño a menor temperatura. Con respecto al FF las celdas CS385 y CS389 presentan los valores más altos, mientras que la CS387 tiene los más bajos. Por último, en la Eficiencia se observa nuevamente que la celda CS385 mantiene la eficiencia más alta, con valores superiores a las demás celdas en todas las mediciones, por otro lado, las celdas CS387 y CS388 tienen las eficiencias más bajas, lo que indica que espesores extremos no son óptimos para este material.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron ocho celdas solares híbridas de CdTe/Sb₂Te₃/PEDOT:PSS, donde el Sb₂Te₃ se depositó por Sputtering-DC, variando el espesor de esta película delgada de 25 hasta 125 nm, en intervalos de 25 nm, a una T_s constante de 200 °C; mientras que, la variación de la temperatura de sustrato fue de 25 °C, 200 °C, 300 °C y 400 °C, a un espesor del Sb₂Te₃ constante de 100 nm y se compararon con una celda solar de referencia sin Sb₂Te₃ (CS388).

Las celdas solares que se elaboraron, tuvieron la estructura en la configuración de superestrato:

SnO₂:F / ZnO+CdS-TT / CdTe+CdCl₂-TT / Sb₂Te₃ / PEDOT:PSS-TT / Cu - Mo.

La celda solar con Sb₂Te₃ de mayor eficiencia fotovoltaica (η) fue la CS385 con 50 nm de Sb₂Te₃ y η cercana al 13%, con V_{oc} cercano a los 800 mV, una J_{sc} de alrededor de 30 mA/cm² y un factor de llenado alrededor de 0.50; con el Sb₂Te₃ depositado bajo las condiciones de presión de 5 mTorr, una potencia de 60 W y temperatura de sustrato de 200 °C, con respecto a la celda de referencia la cual no se le depositó Sb₂Te₃, obteniendo valores de η =6.5%, V_{oc} cercano a los 600 mV, J_{sc} de 24 mA/cm² y un factor de llenado de 0.41.

La eficiencia fotovoltaica de la celda solar CS385 Sb₂Te₃ (η ~13%) se incrementó en un 100% la eficiencia fotovoltaica de la celda de referencia de referencia CS388 (η =6.5%).

Con respecto a los parámetros fotovoltaicos promedios de estas celdas solares híbridas en la última medición se encontró que, el promedio del factor de llenado de la muestra de referencia CS388 (sin Sb₂Te₃) se mantuvo en alrededor de 0.42, para la muestra con Sb₂Te₃ CS385 el promedio fue de 0.48, mejorando un 12%; mientras que, el V_{oc}, en la celda CS388 se obtuvieron valores de 604 mV, comparados con valores de 766 mV para la celda CS385, con un aumento del 21%; de igual forma se presenta un aumento del 11% en la J_{sc} con valores de 27.6 mA/cm² sin Sb₂Te₃ y 31.1 mA/cm² con Sb₂Te₃; por último la η presentó valores de 7.5% sin Sb₂Te₃ y 11.8% con Sb₂Te₃, dando un aumento en este parámetro fotovoltaico de 36%.

Con respecto a la degradación en la eficiencia fotovoltaica de la celda solar de referencia CS388 y la celda solar con Sb_2Te_3 CS385 se observa que, la celda solar sin Sb_2Te_3 presenta variaciones en este parámetro fotovoltaico desde la primera hasta la tercera medición realizada 18 meses después; mientras que, la celda solar CS385 con Sb_2Te_3 , prácticamente no cambia su respuesta fotovoltaica en este período de tiempo. Aunque estos valores no son concluyentes, por ahora, es necesario realizar más estudios a estas celdas solares, para obtener mayor certeza sobre la mejora y estabilidad en celdas solares con Sb_2Te_3 .

PERSPECTIVAS Y TRABAJOS A FUTURO

- Elaborar celdas solares a 150 °C, 100 °C y 50 °C, y con espesores de 50 y 75 nm.
- Obtener celdas solares con el Sb_2Te_3 depositado por Sp-RF y realizar la comparación de técnicas de depósito.
- Realizar mediciones de Eficiencia Cuántica Espectral (EQE).
- Continuar con la caracterización de estos dispositivos a mayores períodos de tiempo.
- Realizar pruebas aceleradas continuas y a mayores valores de Ir.
- Tener especial cuidado al momento de realizar las mediciones de I vs. V, debido a posibles rayones, falta de calibración del equipo o error humano.

REFERENCIAS

- Altamirano, A. Y. F. (2020). México y su transición energética: Un cambio en pro de la energía renovable. *LADEE*, 1(1), 26–42.
- Arias, A. G. (2006). El concepto "energía" en la enseñanza de las ciencias. *Revista Iberoamericana de Educación*, 38(2), 1–7.
- Badii, M., Guillen, A., Abreu, J., & UANL, S. (2016). Energías renovables y conservación de energía (Renewable energies and energy Conservation). *Daena: international journal of good conscience*, 11(1), 141–155.
- Bätzner, D., Wendt, R., Romeo, A., Zogg, H., & Tiwari, A. (2000). A study of the back contacts on CdTe/CdS solar cells. *Thin Solid Films*, 361, 463–467.
- Bendt, G., Schulz, S., Zastrow, S., & Nielsch, K. (2013). Single Source Precursor-Based Deposition of Sb₂Te₃ Films by MOCVD-Process. *Chemical Vapor Deposition*, 19(7-8-9), 235–241.
- Benito, T. P. (2013). *El universo de las energías renovables* (Vol. 6). Marcombo.
- Berg, S., & Nyberg, T. (2005). Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes. *Thin solid films*, 476(2), 215–230.
- Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Manuel Alonso, C. G. (2009). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*.
- Catalán Alonso, H. (2021). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. *Problemas del desarrollo*, 52(204), 59–83.
- Coldwell, P. J. (2018). *PRODESEN programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2018–2032*. SENER.
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>

Comisión Federal de Electricidad. (2023). *Más energía limpia de CFE para México; entra en operación la primera etapa de la central fotovoltaica puerto peñasco*. <https://app.cfe.mx/APLICACIONES/OTROS/BOLETINES/BOLETIN?I=3788>

DEL CARPIO, O. E. V. (s/f). Valoración económica de los recursos naturales e histórica dependencia boliviana. *BÚSQUEDA*, 9.

Fragoso Altamirano, A. Y. (2020). *México y su transición energética: Un cambio en pro de la energía Renovable*. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/IDEE/article/view/3235/3612>

Hernández Pitalua, D., Mendoza Pérez, R., & Hernández-Orduña, M. G. (2021). Contribución al desarrollo sustentable a través de la fabricación de celdas solares con el uso del teluro de zinc. *RINDERESU*, 5(1).

LACyTES, L. de ciencia y tecnologías sustentables, & López Sánchez, A. F. (2022). *Manual de procedimiento para el correcto lavado de vidrios*.

Llanos, B., & Alexis, R. (2020). *La generación de energía eléctrica para el desarrollo industrial en el Ecuador a partir del uso de las energías renovables*.

López Suárez, P. (2022). México, entre los cinco países que tienen mayor potencial de energía solar. *Gaceta UNAM*. <https://www.gaceta.unam.mx/mexico-entre-los-cinco-paises-que-tienen-mayor-potencial-de-energia-solar/>

Mendoza Pérez, R., Del Oso, J. A., Sastré-Hernández, J., Reyes-García, B., & Hernández, J. A. (2023). Influence of Processing Experimental Parameters of PEDOT:PSS on the Photovoltaic Performance on CdTe Solar Cells. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 12(5).

Mendoza Pérez, R., Sastre Hernández, J., Hernández Pérez, M., Aguilar Hernández, J., Del Oso, J., Santana-Rodríguez, G., & Lizardi, J. (2020). Pressure effects in RF and DC sputtered Sb₂Te₃ thin films and its applications into solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 112, 104876.

Núñez Membrillo, J. A. (2022). *Interconexión de prototipos de módulos fotovoltaicos híbridos de CdTe y PEDOT:PSS*. Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

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

Salazar Peralta, A., Pichardo S, A., & Pichardo S, U. (2016). La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 2(5), 11–20.

Spiegeler, C., & Cifuentes, J. I. (2016). *Definición e información de energías renovables*.

Tomás Perales, B. (2012). *El universo de las energías renovables* (Primera).

Torres Bautista, L. A. (2023). *Influencia del tratamiento térmico del PEDOT:PSS en la respuesta fotovoltaica de dispositivos solares a base de CdTe*. ESFM - IPN.

Uribe Garavito, E. J. (2014). *Módulos Termoeléctricos Flexibles*.

Velázquez, M. T., Puente, G. C., Aguilera, M. A., Trujillo, M. G., & Compaan, A. (1999). Celdas solares de hetero unión de CdS/CdTe. Parte 2. Celdas solares procesadas por las técnicas de erosión catódica magneto-planar y GREG. *Revista mexicana de física*, 45(1), 61–66.