

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

TITULO:

Desarrollo de Películas Conductoras de Nanotubos de Carbono Sinterizados por
Manufactura Avanzada para Celdas Solares

INGE-3131

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera en Materiales

Presentado por:

Daniela Alejandra Briceño Castillo

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico a Dios por permitirme dar un paso más en mi vida.

A mis padres José Reinerio y Fanny, en honor al gran esfuerzo y dedicación que han demostrado a lo largo de tantos años, y por todo lo que me han enseñado a través de su ejemplo.

A mis hermanas, Vanessa y Jessica, quienes han confiado en mí y me han brindado cariño y apoyo incondicional.

Finalmente, a mi angelita de 4 patas Nala quien me acompañó en mis primeros semestres.

Daniela Alejandra Briceño Castillo

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, cuyo apoyo incondicional y confianza han sido fundamentales para la consecución de mis objetivos académicos y personales.

Al Dr. Eduardo Castillo, mi tutor, por su valiosa orientación, y a los Ings. Julio Cáseres y Víctor Avilés, por su ayuda en el desarrollo de especímenes y pruebas de laboratorio necesarias dentro de mi proyecto.

Finalmente, a todos mis amigos, compañeros y profesores de la ESPOL, quienes constituyeron una fuente constante de motivación y aprendizaje, contribuyendo de manera significativa a la culminación exitosa de mi formación profesional.

Daniela Alejandra Briceño Castillo

Evaluadores

Jorge Julián Peña Estrella, MSc.

Profesor de Materia

Eduardo A. Castillo Orozco, Ph.D.

Tutor de proyecto

Declaración Expresa

Yo Daniela Alejandra Briceño Castillo acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 13 de octubre del 2025


Daniela Alejandra Briceño Castillo

Resumen

La presente investigación se enfoca en el desarrollo de vías conductoras de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT) mediante manufactura avanzada para celdas solares. El objetivo general es analizar el proceso de deposición por doctor blade y sinterizado localizado con un láser de CO₂, evaluando su morfología, estructura y comportamiento eléctrico. Se justifica la necesidad de reducir el estrés térmico en dispositivos fotovoltaicos, bajo la hipótesis de que la sinterización selectiva optimiza la conectividad inter-tubular sin degradar el sustrato. Durante el desarrollo, se sintetizó una pasta acuosa tixotrópica y se depositó mediante la técnica de doctor blade sobre obleas de silicio empleando una máscara de Etil Vinil Acetato (EVA). Posteriormente, se ejecutó un sinterizado térmico utilizando un láser de CO₂ bajo parámetros de operación calculados mediante modelado analítico transitorio. Los resultados demostraron que se obtiene un desempeño satisfactorio a una temperatura de sinterizado de 119.5 °C que permite la remoción eficaz de agentes dispersantes y promueve la formación de “cuellos de sinterizado”. Microscopia electrónica de barrido (SEM) es utilizada para la caracterización morfológica, mientras que medición de la resistividad eléctrica para medir el rendimiento de las vías. Se obtuvo una resistencia superficial de 44.8 Ω con una desviación estándar inferior al 5% validando una respuesta óhmica estable y homogénea. Los resultados demuestran que el sinterizado láser permite reducir significativamente la resistividad eléctrica y, por ende, mejorar la conductividad utilizando temperaturas mucho menores que los métodos convencionales, lo que se representa ventajas técnicas, energéticas y ambientales. Además, el protocolo desarrollado fortalece las capacidades locales de investigación en nanotecnología aplicada y contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con energía limpia y manufactura sostenible.

Palabras Clave: Nanotubos de carbono, Manufactura avanzada, Sinterizado láser, doctor blade, celdas solares

Abstract

This research focuses on the development of single-walled carbon nanotube (SWCNT) conductive films through advanced manufacturing for solar cells. This work aims to analyze SWCNT conductive tracks deposited on silicon wafers via doctor blade deposition and localized CO₂ laser sintering, evaluating its morphology, structure, and electrical behavior. The need to reduce thermal stress in photovoltaic devices is justified under the hypothesis that selective sintering optimizes inter-tubular connectivity without degrading the substrate. During the development, a thixotropic aqueous paste was synthesized and deposited via doctor blade technique onto wafers with an Ethyl Vinyl Acetate (EVA) mask. Subsequently, thermal sintering was executed using a CO₂ laser under specific operating conditions that were calculated through a simplified thermal model. The results demonstrated that one optimum condition occurs at a sintering temperature of 119.5°C, allowing for an effective removal of the dispersing agents and promoting the formation of “sintering necks” which was observed by scanning electron microscopy SEM. A sheet resistance of 44.8 Ω was obtained with a standard deviation of less than 5%, validating a stable ohmic response. The results demonstrate that laser sintering significantly reduces electrical resistivity while operating at much lower temperatures than conventional methods, providing important technical, energy, and environmental advantages. In addition, the development protocol strengthens local research capabilities in applied nanotechnology and contributes to the Sustainable Development Goals related to clean energy and sustainable manufacturing.

Keywords: *Advanced manufacturing, Thin films, Morphological characterization, Sheet resistance, Inter-tubular connectivity.*

Índice General

	V
<i>Resumen</i> _____	VI
<i>Abstract</i> _____	VII
<i>Índice General</i> _____	VIII
<i>Abreviaturas</i> _____	X
<i>Simbología</i> _____	XI
<i>Índice de Figuras</i> _____	XII
<i>Índice de Tablas</i> _____	XIV
<i>Índice de Planos</i> _____	XV
<i>Capítulo 1</i> _____	1
1. <i>Introducción</i> _____	2
1.1 Descripción del problema _____	4
1.1.1 Restricciones del estudio: _____	5
1.2 Justificación del problema _____	6
1.3 Objetivos _____	7
1.3.1 Objetivo general _____	7
1.3.2 Objetivos específicos _____	7
1.4 Marco teórico _____	8
1.4.1 Nanomateriales como solución a las limitaciones térmicas en la metalización de celdas solares avanzadas. _____	8
1.4.2 Nanotubos de carbono como materiales conductores avanzados _____	9
1.4.3 Limitaciones del desempeño macroscópico en redes de nanotubos de carbono _____	12
1.4.4 Sinterizado térmico convencional y sus limitaciones en sustratos sensibles _____	13
1.4.5 Técnica de deposición de películas delgadas: doctor blade _____	13
1.4.6 Interfaz EVA/oblea de silicio en la adhesión _____	14
1.4.7 Sinterizado láser como alternativa de procesamiento localizado _____	15
1.4.8 Modelos teóricos para la estimación de temperatura en sinterizado láser _____	16
1.4.9 Mecanismos de interacción fototérmica y modelado matemático de la temperatura _____	17

1.4.10	Fundamentos del diseño de rejillas colectoras en celdas solares	18
1.4.11	Ventaja de procesamiento y optimización de parámetros en sinterizado láser	19
1.4.12	Caracterización morfológica, estructural y eléctrica	20
<i>Capítulo 2</i>		23
2.	Metodología.	24
2.1	Diseño de la rejilla de contacto y especificaciones de parámetros geométricos	24
2.2	Materiales y Equipos utilizados	26
2.2.1	Materiales y reactivos para la síntesis de la pasta	26
2.2.2	Equipos de laboratorio e instrumentación	27
2.3	Determinación de los parámetros de sinterizado láser mediante modelado térmico	28
2.4	Procedimiento experimental de la síntesis de la pasta conductora de SWCNT.	31
<i>Capítulo 3</i>		35
3.	Resultados y Análisis	36
3.1	Caracterización estructural de los SWCNTs	36
3.1.1	Difracción de rayos X (XRD)	36
3.1.2	Espectroscopia de energía dispersa (EDS)	38
3.2	Caracterización microscópica electrónica de barrido (SEM)	39
3.2.1	Morfología de la interfaz nanotubo-semiconductor (119.25 °C)	42
3.2.2	Consolidación de la red y dinámica de uniones	42
3.3	Caracterización eléctrica y resistencia	44
3.3.1	Análisis de la respuesta óhmica y transporte en la red consolidada	44
3.4	Discusión de impacto y viabilidad de las películas conductoras	46
3.4.1	Análisis Social y Proyección Tecnológica: El Salto Aeroespacial	48
<i>Capítulo 4</i>		51
4.	Conclusiones y Recomendaciones	52
4.1	Conclusiones	52
4.2	Recomendaciones	54

Abreviaturas

CNTs	Nanotubos de carbono (Carbon Nanotube)
SWCNT	Nanotubo de carbono de Pared Simple (Single-Walled Carbon)
MWCNT	Nanotubo de Carbono de Pared Multiple (Multi-Walled Carbon)
EVA	Etil Vinil Acetato
CMC	Carboximetilcelulosa Sódica
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido
XRD	Difracción de Rayos X
EDS	Espectroscopia de Energía Dispersa (Energy Dispersive Spectroscopy)
HJT	Celdas Solares de Hetero unión
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
LCOE	Costo Nivelado de la Energía
LCA	Análisis de Ciclo de Vida
VOC	Compuestos Orgánicos Volátiles
SDG	Objetivos de Desarrollo Sostenible
CAPEX	Gastos de Capital
OPEX	Gastos Operativos

Simbología

P	Potencia nominal del haz láser incidente	<i>W</i>
V	Velocidad de barrido o traslación del haz sobre el sustrato	<i>mm/s</i>
R_s	Resistencia de hoja o superficie	Ω/sq
T_{max}	Temperatura máxima alcanzada en el centro del spot láser	C°
T_r	Temperatura ambiente de referencia	C°
T_{int}	Tiempo de interacción o exposición del material al flujo energético	<i>S</i>
λ	Longitud de onda de la radiación electromagnética Laser CO ₂	μm
A	Absortividad efectiva del material a la longitud de onda de operación	-
d	Diámetro efectivo del haz laser (spot size)	<i>M</i>
K	Conductividad térmica efectiva del sistema pasta/sustrato	<i>W/mk</i>
α	Difusividad térmica del material procesado	m^2/s
2θ	Ángulo de posición de los picos de difracción (Ley de Bragg)	<i>Rad</i>
(n,m)	Índices enteros del vector quiral de la red de carbono	-
J_{sc}	Densidad de corriente de cortocircuito en la celda solar	<i>A/m²</i>
FF	Factor de llenado del dispositivo fotovoltaico (Fill Factor)	-
R	Resistencia eléctrica medida de forma puntual	Ω

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Relación estructural grafeno, grafito y nanotubos de carbono (SWCNT Y MWCNT)</i>	10
<i>Figura 2. Mecanismos de transporte de carga y flujo de corriente en una celda solar</i>	19
<i>Figura 3. Mapa de isoterma y validación experimental del modelo térmico de sinterizado para películas de SWCNT</i>	30
<i>Figura 4. Ruta experimental para la obtención de electrodos de SWCNTs</i>	31
<i>Figura 5. Difractograma de los nanotubos de carbono (SWCNTs)</i>	36
<i>Figura 6. Composición química elemental, “Energy Dispersive Spectroscopy” (EDS) de los SWCNTs empleados.</i>	38
<i>Figura 7. Micrografías SEM de la microestructura sinterizadas de los SWCNTs a (a) 119.25 °C, (b) 453.48 °C, (c) 70.64 °C, (d) 147.21 °C, (e) 134.44 °C</i>	40
<i>Figura 8. Micrografías SEM de la red microestructural de SWCNTs sinterizados a 119.25 °C: a) Densidad de red, (b) Integridad de haces y limpieza interfacial, (c) Cuellos de sinterizado.</i>	42
<i>Figura 9. Análisis de Impacto Económico: Horno Industrial y Sinterizado Láser</i>	47
<i>Figura 10. Análisis social y tecnología asequible</i>	49
<i>Figura 11. Formulación de la pasta conductora de SWCNTs</i>	61
<i>Figura 12. Medición de pH a la solución</i>	61
<i>Figura 13. Manejo de la sonda ultrasónica</i>	61
<i>Figura 14. Consistencia de la pasta de SWCNTs</i>	61
<i>Figura 15. Corte del EVA con el láser CO₂</i>	62
<i>Figura 16. Resultado de la máscara de EVA</i>	62
<i>Figura 17. Obleas de Silicio – Mascara de EVA</i>	62
<i>Figura 18. Resultado de la muestra aplicando doctor blade</i>	62

Figura 19. Resultado del sustrato oblea de Si + Pasta conductora de SWCNTs_____ 63

Figura 20. Oblea de silicio con las 5 muestras ya sinterizadas por láser de CO₂ _____ 63

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Parámetros de diseño geométrico de la rejilla de contacto frontal sobre la capa activa de SWCNT</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2. Insumos y reactivos empleados en la formulación de la pasta de SWCNTs</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3. Equipos de laboratorio e instrumentación</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 4. Matriz de parámetros experimentales y temperaturas estimadas</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 5. Medición de resistencia superficial en cuadrantes de la red de SWCNTs</i>	<i>45</i>

Índice de Planos

*Plano 1. Esquema geométrico del patrón de contactos de SWCNT*_____24

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética mundial, impulsada por el desarrollo industrial y el crecimiento demográfico, ha exacerbado la dependencia de combustibles fósiles, generando una crisis ambiental que demanda una transición urgente hacia fuentes renovables y sostenibles [1],[2]. Entre estas alternativas, la energía solar fotovoltaica (FV) se erige como una de las más prometedoras debido a su abundancia, modularidad y a la continua reducción en su costo nivelado de energía. Sin embargo, la fabricación de celdas solares involucra procesos de alta temperatura, como la formación de contactos metálicos posteriores mediante aleación a más de 800 °C, los cuales generan estrés mecánico y térmico debido a altas temperaturas y que pueden limitar el uso de obleas delgadas o estructuras avanzadas en celdas solares de alto rendimiento y de tecnología híbrida [3], [4].

En este contexto, los nanomateriales de carbono, y en particular los nanotubos de carbono (CNTs), se presentan como una alternativa prometedora para la creación de capas conductores de bajo estrés térmico y peso. Desde su identificación por Iijima en 1991 [5], los CNTs han sido objeto de intensa investigación debido a su estructura unidimensional de grafeno enrollado, que les confiere una combinación excepcional de propiedades: alta conductividad eléctrica y térmica, resistencia mecánica, flexibilidad intrínseca y estabilidad química [6]. Este perfil único los convierte en materiales idóneos para aplicaciones en electrónica flexible, sensores y, de manera fundamental, como capas conductoras transparentes en dispositivos fotovoltaicos de próxima generación [7], [8].

No obstante, la transición del laboratorio a aplicaciones industriales de películas delgadas de CNTs enfrenta retos tecnológicos significativos en el procesamiento. La formación de recubrimientos homogéneos y altamente conductores se ve obstaculizada por la tendencia de los nanotubos a aglomerarse debido a fuerzas de Van der Waals, resultando en una conectividad eléctrica inter-

tubular deficiente y, en consecuencia, una alta resistividad de lámina [9],[10]. Los métodos tradicionales de sinterizado (o consolidación térmica) para mejorar dicha conectividad, como el tratamiento en horno, suelen ser energéticamente ineficientes, requieren altas temperaturas que degradan sustratos poliméricos económicos (cruciales para la electrónica flexible), y carecen de control espacial y temporal preciso [11].

Para superar estas limitaciones, este proyecto propone una ruta de fabricación integrada que combina técnicas de manufactura avanzada. La deposición por doctor blade (o recubrimiento por cuchilla) permite un control preciso y reproducible del espesor de la película, siendo una técnica escalable y de bajo costo [12]. Posteriormente, un proceso de sinterizado localizado mediante láser de CO₂ ofrece un tratamiento térmico rápido, de bajo consumo energético y altamente selectivo[13], [14], [15]. Este método permite fusionar los puntos de contacto entre nanotubos de manera controlada, mejorando la conductividad eléctrica sin comprometer la integridad del sustrato subyacente, gracias a su naturaleza de procesamiento superficial y no contacto [16],[17]. La sinergia entre estas técnicas constituye un enfoque innovador para la fabricación de celdas solares alternativas de alto desempeño, al permitir la optimización simultánea de propiedades eléctricas y estructurales [17].

Desde una perspectiva formativa, esta investigación consolida competencias en ingeniería de materiales y nanotecnología, integrando dominios de conocimiento en física de láseres, química de superficies, procesamiento de nanomateriales y técnicas avanzadas de caracterización. Finalmente, el proyecto se alinea y contribuye directamente al Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (ODS 7): "Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna", 9 (ODS 9): "Industria, innovación e infraestructura"; y 13 (ODS 13): "Acción por el clima", al impulsar el desarrollo de materiales y procesos de fabricación que pueden reducir tanto el costo económico

como el impacto ambiental asociado a la tecnología fotovoltaica, facilitando así su adopción masiva [18].

1.1 Descripción del problema

La integración de capas conductoras basadas en nanotubos de carbono (CNTs) en dispositivos fotovoltaicos de silicio enfrenta limitaciones significativas en el control del proceso y en la calidad estructural del material depositado [8]. En la práctica, los principales obstáculos se asocian a: (i) la dispersión ineficiente del material en medio líquido y la formación de aglomerados [3], (ii) la dificultad para obtener capas depositadas con espesor y uniformidad controlados [12], y (iii) la escasa interconexión eléctrica o alta resistencia de contacto, entre los nanotubos [9].

Esta escasa conectividad inter-tubular representa el desafío más significativo, ya que eleva la resistividad de lámina a niveles de 10^3 a $10^4 \Omega/sq$. Estos valores superan drásticamente los estándares requeridos para aplicaciones fotovoltaicas competitivas, los cuales deben ser inferiores a $500 \Omega/sq$, para comprometer el desempeño y la estabilidad del recubrimiento [19].

Por otra parte, los métodos térmicos convencionales de sinterización, aunque efectivos en la consolidación de materiales metálicos o cerámicos, resultan poco adecuados para sistemas basados en CNTs destinados a sustratos versátiles. Estos procesos suelen demandar altas temperaturas (≥ 400 °C) o tiempos de exposición prolongados, lo que puede inducir defectos, tensiones mecánicas o degradar interfaces sensibles en la arquitectura de dispositivo, además de un elevado consumo energético [11].

Bajo este escenario, resulta la necesidad de implementar técnicas de manufactura avanzada que permitan controlar con precisión los parámetros de deposición y sinterizado, garantizando homogeneidad y estabilidad eléctrica sin comprometer la integridad del sustrato. En este sentido, el método doctor blade se posiciona como una técnica prometedora para la deposición escalable y controlada de películas con espesor uniforme [12]. De manera complementaria, el sinterizado

mediante láser de CO₂ emerge como una alternativa de procesamiento localizado, rápido y energéticamente eficiente. Este método permite un tratamiento térmico confinado que puede mejorar la adherencia y reducir drásticamente la resistencia eléctrica al favorecer la coalescencia y la formación de uniones estables (necks) en los puntos de contacto entre nanotubos, minimizando al mismo tiempo el estrés térmico sobre el sustrato [20].

1.1.1 Restricciones del estudio:

- **Variables independientes (parámetros de proceso):** Comprenden los factores operativos del sistema láser de CO₂ que se manipularán para inducir la sinterización: Potencia del haz (W), Velocidad de barrido (mm/s).
- **Variables dependientes (propiedades a optimizar):** Son las respuestas físicas y eléctricas del material tras el tratamiento: Resistividad de lámina (Ω/sq), cambios en la morfología superficial observados mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), y la calidad de la adhesión al sustrato.
- **Requerimientos de desempeño:** El objetivo técnico principal es lograr la reducción de la resistividad de lámina en, al menos, un orden de magnitud en comparación con la película sin tratar.
- **Restricciones operativas:** El estudio se limita al uso de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs) comerciales y sustratos de vidrio para la validación de la etapa inicial. La experimentación está sujeta a la disponibilidad del sistema láser de CO₂ con una potencia máxima de 30 W en el Taller de Prototipos.

Finalmente, el proceso es susceptible de una evaluación cuantitativa y objetiva mediante técnicas estandarizadas de caracterización que permiten validar las soluciones desde distintas escalas. La

morfología superficial y la formación de uniones inter-tubulares se analizarán mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), mientras la pureza elemental y la estabilidad estructural de los nanotubos se verificarán mediante espectroscopía de energía dispersa (EDS) y difracción de rayos X (XRD) [21], [22].

Complementariamente, el desempeño eléctrico se determinará mediante mediciones de resistividad, asegurando que el protocolo no solo optimice la conducción, sino que preserve la integridad fisicoquímica de la red de SWCNT.

Este trabajo se desarrollará en el laboratorio de Síntesis y en el taller de Prototipos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), en colaboración con el Centro de Investigación y Desarrollo en Nanotecnología Aplicada (CIDNA), bajo la supervisión del Ing. Christian Garzón. El propósito es que el protocolo resultante para el desarrollo de películas conductoras de SWCNTs sirva como base técnica para las líneas de investigación en energía del CIDNA, fortaleciendo las capacidades locales en la aplicación de manufactura avanzada para tecnologías fotovoltaicas.

1.2 Justificación del problema

Este proyecto resolverá el problema de la alta resistividad eléctrica en película delgadas de nanotubos de carbono (CNTs) causado por una sinterización ineficiente. Para ello, se desarrollará un protocolo integrado de manufactura avanzada que combina la deposición controlada por doctor blade con un proceso de sinterizado localizado mediante láser de CO₂, permitiendo una consolidación óptima de los contactos entre nanotubos.

La implementación de un método de sinterización de baja temperatura efectiva es crucial para la integración de CNTs en arquitecturas de silicio avanzadas y térmicamente sensibles, tales como celdas solares híbridas u obleas ultradelgadas. En estos sistemas, los procesos de metalización

tradicionales pueden inducir degradación por estrés térmico; por el contrario, un contacto optimizado basado en nanomateriales de carbono permite reducir la resistencia en serie y mejorar la eficiencia de extracción de carga sin comprometer la integridad de la oblea [3], [8].

El procesamiento mediante sinterizado láser supera las limitaciones de los métodos técnicos convencionales al ser un proceso localizado, rápido y de bajo consumo energético.

Su capacidad para confinar la energía térmicamente permite tratar el nanomaterial sin dañar sustratos sensibles o interfaces pasivadas, ofreciendo un control preciso de la densidad de energía depositada[20],[23]. Este enfoque representa un avance significativo en las técnicas de procesamiento de nanomateriales funcionales, alineándose con la búsqueda constante de la microelectrónica y la fotovoltaica por procesos compatibles con la tecnología de silicio que permitan incorporar nuevas funcionalidades con un alto potencial de transferencia tecnológica [4].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar el proceso de deposición y sinterizado de películas conductoras de nanotubos de carbono (CNTs) mediante el método doctor blade y sinterización localizada con láser de CO₂, evaluando su morfología, estructura cristalina y comportamiento eléctrico para su aplicación como material conductor en dispositivos electrónicos y energéticos.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Preparar suspensiones estables de nanotubos de carbono, mediante la optimización de agentes dispersantes, asegurando una reología adecuada para el método doctor blade.

2. Depositar películas delgadas de SWCNTs sobre sustratos de silicio, controlando los parámetros como espesor y uniformidad del recubrimiento.
3. Ejecutar el proceso de sinterización localizada utilizando el equipo de láser de CO₂, mediante la variación de la potencia y velocidad de barrido.
4. Caracterizar la morfología superficial y la estructura cristalina de las películas mediante difracción de rayos X (XRD), espectroscopía de energía dispersa (EDS) y microscopía electrónica de barrido (SEM).
5. Evaluar la conductividad eléctrica de las muestras procesadas y establecer la correlación estadística entre los parámetros de manufactura avanzada y la reducción de la resistividad.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Nanomateriales como solución a las limitaciones térmicas en la metalización de celdas solares avanzadas.

La industria fotovoltaica global está dominada por el silicio cristalino (*s-Si*), que representa más del 90% del mercado. La tendencia actual, impulsada por la necesidad de reducir el LCOE (costo nivelado de energía), se enfoca en aumentar la eficiencia mediante arquitecturas de contacto pasivado y heterouniones (HJT), así como en la reducción del espesor de las obleas para optimizar el uso del material [1].

Sin embargo, los métodos de metalización convencionales, basados en la combustión de pastas de plata a temperaturas superiores a los 800°C, representan un cuello de botella térmico. Según el reporte ITROV 2023, estos procesos de alta temperatura son críticos por tres razones:

1. Estrés mecánico: Las obleas ultradelgadas ($\geq 150 \mu\text{m}$) son propensas a fracturas por el choque térmico durante el enfriamiento [1].

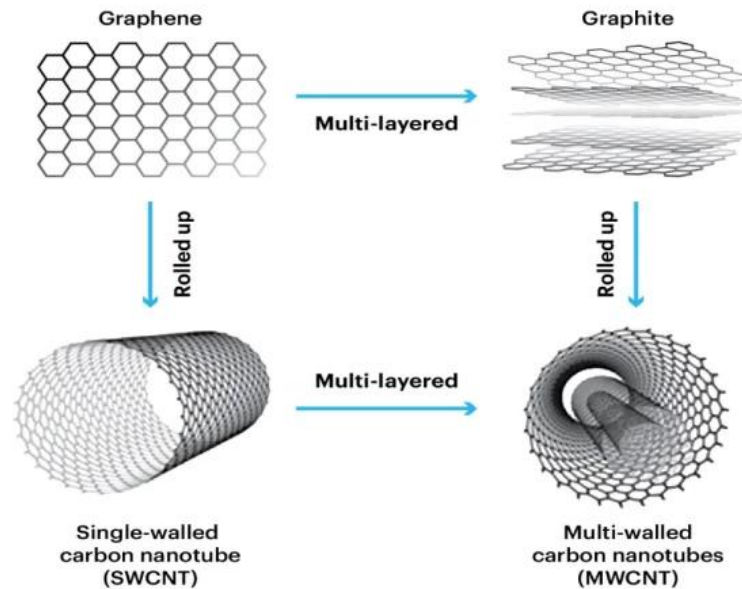
2. Degradación de interfaces: En celdas de alta eficiencia como las solare híbridas, las capas de silicio amorfo hidrogenado se degradan irreversiblemente si se exponen a temperaturas superiores a los 250-400 °C, perdiendo sus propiedades de pasivación [3].
3. Contaminación por difusión: El calor extremo facilita la migración de impurezas metálicas hacia la unión p-n, reduciendo el tiempo de vida de los portadores de carga [4]

Debido a esto, la manufactura avanzada busca migrar hacia procesos de baja temperatura. La integración de nanomateriales de carbono, procesados mediante técnicas que confinan el calor (como el láser), permite consolidar contactos eléctricos eficientes sin someter el bulto del silicio a ciclos térmicos destructivos [3], [20].

1.4.2 Nanotubos de carbono como materiales conductores avanzados

Desde su descubrimiento y caracterización inicial por Lijima, los nanotubos de carbono (CNTs) han sido reconocidos como materiales de interés estratégico para aplicaciones electrónicas y energéticas debido a su conjunto excepcional de propiedades físicas [5]. Estructuralmente, los CNTs consisten en láminas de grafeno enrolladas en configuraciones cilíndricas unidimensionales (1D), esta configuración nanométrica es la responsable directa de sus eminentes características de transporte y resistencia.

Figura 1. Relación estructural grafeno, grafito y nanotubos de carbono (SWCNT Y MWCNT)



Nota: Adaptado de Carbon Nano [6], [24]

Dentro de la familia de los CNTs, los nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT, del inglés Single-Walled Carbon Nanotube) representan la forma más elemental. Estos consisten en una monocapa de grafeno enrollada sobre sí misma, formando cilindros con diámetros que oscilan típicamente entre 0.7 a 2 nm y longitudes que pueden alcanzar varios micrómetros [5], [25]. La propiedad más distinta de los SWCNT es que sus características electrónicas dependen críticamente de su estructura quiral, definida por el vector de enrollamiento (n,m):

- Si $n-m=3k$ (donde k es un entero), el nanotubo presenta un comportamiento metálico.
- En cualquier otro caso, el nanotubo se comporta como un semiconductor, con un *bandgap* (ancho de banda prohibida) ajustable según su diámetro y quiralidad [25].

Esta capacidad de ser intrínsecamente metálicos o semiconductores, únicamente por variaciones atómicas en su estructura, es única y abre un abanico enorme de posibilidades en nanoelectrónica.

✓ **Propiedades eléctricas y térmicas:**

- **Conductividad eléctrica:** Los CNT metálicos presentan conductividades eléctricas intrínsecas del orden de 10^6 S/m, comparables a las de los metales convencionales como el cobre, pero con una capacidad superior para transportar densidades de corriente [25].
 - **Conductividad térmica:** Su conductividad térmica puede superar los 3000 W/mk, excediendo incluso la del diamante, lo que los posiciona como materiales ideales para la gestión térmica en dispositivos de alta densidad [7].
- ✓ **Propiedades mecánicas y estructurales:**
- **Fuerza y Rigidez:** Poseen un módulo de Young cercano a 1 TPa y una resistencia a la tracción del orden de 50-200 GPa, siendo uno de los materiales más fuertes y rígidos conocidos [7].
 - **Flexibilidad:** A pesar de su extrema rigidez, presentan una elevada flexibilidad elástica, pudiendo deformarse significativamente sin fracturarse, lo que permite su integración sobre sustratos rígidos o deformables in comprometer su integridad [7].
 - **Baja densidad:** Con una densidad aproximada de 1.3 g/cm^3 , son materiales extremadamente ligeros, ofreciendo una relación resistencia-peso excepcional [7],[8].

Debido a esta combinación sinergia de propiedades – alta conductividad eléctrica y térmica, resistencia mecánica extraordinaria, flexibilidad y bajo peso, en diferentes bibliografías destacan el potencial estratégico de los CNTs y especialmente de los SWCNT metálicos, para la fabricación de capas conductoras delgadas, ligeras y mecánicamente robustas [8].

1.4.3 Limitaciones del desempeño macroscópico en redes de nanotubos de carbono

A pesar de las propiedades sobresalientes de los CNTs individuales, su implementación en forma de películas o redes macroscópicas introduce limitaciones significativas en el transporte eléctrico. Numerosos estudios han demostrado que la conductividad efectiva de una red de CNTs está dominada por la resistencia de contacto en las uniones tubo-tubo, conocida como *junction resistance*, más que por la conductividad intrínseca de cada nanotubo [8].

En estas uniones, el transporte de carga se ve obstaculizado por barreras de energía asociados a mecanismos de túnel a través de espacios nanométricos. Además, la presencia de capas de surfactante residual (utilizado durante la dispersión) y defectos estructurales en los puntos de contacto incrementan drásticamente la resistividad global [5],[8]. Como resultado, las películas de CNTs recién depositadas suelen exhibir valores elevados de resistividad de lámina, típicamente entre 10^3 a $10^5 \Omega/sq$, muy superiores a los requeridos para contactos eléctricos eficientes en dispositivos fotovoltaicos y electrónicos [19].

Por tanto, la literatura coincide que el comportamiento eléctrico de la red se rige por la teoría de percolación, donde la formación de una ruta conductora continua es necesaria pero no suficiente si las conexiones intertubulares son deficientes [8]. Por lo tanto, existe un consenso académico en que la activación del potencial conductor de las redes de CNTs demanda un proceso de consolidación posterior a la deposición. Dicho tratamiento debe ser capaz de reducir la resistencia inter tubular promoviendo el contacto íntimo entre paredes de grafeno, sin inducir la degradación térmica del nanomaterial ni del sustrato subyacente [20].

1.4.4 Sinterizado térmico convencional y sus limitaciones en sustratos sensibles

El sinterizado térmico es una técnica ampliamente utilizada para consolidar materiales particulados mediante difusión atómica activada por temperatura, promoviendo la formación de enlaces físicos entre partículas adyacentes. En el caso de películas de nanomateriales, este proceso permite mejorar la conectividad eléctrica al reducir la resistencia en las interfaces [20].

No obstante, cuando el sinterizado térmico convencional se aplica sobre sustratos sensibles, como el silicio utilizado en dispositivos fotovoltaicos, surgen limitaciones importantes. La literatura técnica indica que las temperaturas elevadas (≥ 400 C) y los tiempos prolongados de exposición en hornos suelen inducir daños térmicos irreversibles. Entre los efectos destacan la degradación de las capas de pasivación, el aumento del estrés mecánico en la oblea y la pérdida de eficiencia en las interfaces activas [1], [3].

Estas desventajas posicionan al sinterizado térmico global como un método incompatible con las tendencias actuales de la industria, las cuales demandan procesos de baja temperatura y manufactura selectiva. Esto justifica la transición hacia técnicas de procesamiento localizado que confinen la energía exclusivamente en la capa nanométrica, protegiendo la integridad del sustrato de silicio y reduciendo el consumo energético [4], [11].

1.4.5 Técnica de deposición de películas delgadas: doctor blade

La técnica de doctor blade, también conocida como recubrimiento por cuchilla, es un método de recubrimiento por solución que permite la fabricación de películas delgadas con control preciso del espesor y alta uniformidad. El proceso se basa en el desplazamiento de una cuchilla o espátula a una altura relativa constante (g) sobre un sustrato, extendiendo una suspensión precursora [12].

Desde una perspectiva reológica, el éxito de la deposición depende del esfuerzo de cizalla (shear stress) aplicado. Las suspensiones de nanotubos de carbono, modificadas con agentes como la carboximetilcelulosa (CMC), exhiben un comportamiento tixotrópico o pseudoplástico; bajo el

movimiento de la cuchilla, la viscosidad disminuye permitiendo el flujo y nivelado, mientras que en reposo la viscosidad aumenta para preservar la geometría del patrón [11].

La relevancia de esta técnica en aplicaciones fotovoltaicas radica en su capacidad para reproducir películas con espesores controlados desde la escala nanométrica hasta micras, optimizando la transparencia y conductividad de la capa de SWCNT. Frente a otros métodos, el doctor blade presenta ventajas críticas:

- **Eficiencia de material:** A diferencia del spin coating, que desperdicia hasta el 90% del material por fuerza centrífuga, el doctor blade permite un aprovechamiento casi total de la pasta, factor vital dado el costo de los SWCNT [12].
- **Morfología superior:** Comparada con el spray coating, que genera superficies rugosas y porosas, la acción mecánica de la cuchilla promueve una compactación inicial de la red, mejorando la densidad de contactos intrínsecos previo al sinterizado [11], [20].
- **Escalabilidad:** Esta técnica es intrínsecamente compatible con procesos de manufactura continua de gran escala, como el Roll-to-Roll (R2R), facilitando la transición industrial de los dispositivos optoelectrónicos basados en nanomateriales [12].

1.4.6 Interfaz EVA/oblea de silicio en la adhesión

En la arquitectura fotovoltaica, la estabilidad mecánica de los contactos es tan crítica como su conductividad. La incorporación de una capa de Etil Vinil Acetato (EVA) sobre el sustrato de silicio no solo actúa como agente de acoplamiento, sino que aprovecha su naturaleza polimérica para mejorar la adhesión de la red de nanotubos.

El EVA, consolidado como el estándar en la industria fotovoltaica debido a su elevada transparencia óptica y resistencia ante la degradación ambiental [26], permite que la red de

SWCNT se ancle mecánicamente a la superficie. Este mecanismo de adhesión es vital, ya que reduce significativamente el riesgo de delaminación o desprendimiento de las películas conductoras durante los ciclos térmicos rápidos y localizados inducidos por el procesamiento con láser de CO₂ [1], [12].

La sinergia en esta interfaz asegura que la mejora en la conductividad se complemente con una robustez mecánica capaz de soportar las tensiones operativas del dispositivo final.

1.4.7 Sinterizado láser como alternativa de procesamiento localizado

El sinterizado por láser se ha propuesto como una alternativa de manufactura avanzada capaz de superar las limitaciones del procesamiento térmico convencional. A diferencia del calentamiento global en horno, el sinterizado láser se basa en la absorción fototérmica selectiva del material objetivo, permitiendo un calentamiento altamente localizado y una duración corta del orden de milisegundos [20].

En este proceso, la energía de haz láser es absorbida preferentemente por el material conductor, mientras que el sustrato subyacente permanece cercano a la temperatura ambiente debido a diferencias en absorbancia, reflectividad y tiempos característicos de difusión térmica. Para materiales carbonáceos, el uso de láseres de CO₂ con longitud de onda de 10.6 μm resulta particularmente efectivo. Esto se debe a la fuerte sección eficaz de absorción asociada a las vibraciones moleculares del carbono en el infrarrojo lejano, lo que maximiza la eficiencia de la transferencia energética [20].

Este enfoque permite inducir la formación de uniones intertubulares y mejorar la conductividad de las películas de CNTs sin comprometer la integridad estructural o electrónica del sustrato de silicio o polímeros sensibles. Esta selectividad convierte al sinterizado láser en una técnica

estratégica para la integración de contactos en dispositivos avanzados y otras tecnologías sensibles al calor, donde el control preciso de la carga térmica es un requerimiento mandatorio [23], [27].

1.4.8 Modelos teóricos para la estimación de temperatura en sinterizado láser

Para apoyar la selección racional de parámetros de proceso, diversos autores han desarrollado modelos analíticos que permiten estimar la temperatura alcanzada durante la interacción láser-material. Estos modelos se basan en la transferencia de calor por conducción y consideran variables como la potencia del láser (P), la velocidad de escaneo (V), la conductividad térmica (K) y la difusividad (α) del material procesado.

En el contexto del procesamiento láser de nanomateriales carbonáceos, dichos modelos asumen un régimen de calentamiento localizado dominado por absorción fototérmica, lo que resulta adecuado para películas delgadas de CNTs sobre sustratos poliméricos o de silicio. La formulación general permite expresar la temperatura máxima (T_{max}) alcanzada como la suma de la temperatura ambiente (T_0) y un término dependiente de la energía absorbida y de las propiedades térmicas efectivas del medio [28].

$$T_{max} = T_0 + \Delta T(P, V, \alpha, K) \quad (1)$$

Este enfoque analítico permite predecir el comportamiento térmico de la red de nanotubos, asegurando que la energía suministrada sea suficiente para promover la coalescencia de los contactos inter-turbulares sin exceder el umbral de daño térmico de los materiales adyacentes [28],[29].

1.4.9 Mecanismos de interacción fototérmica y modelado matemático de la temperatura

El procesamiento térmico de películas delgadas mediante láser de CO₂ ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) se rige por la transferencia de energía radiactiva y su conversión en flujo térmico localizado. La viabilidad técnica de este modelo para la consolidación de capas nanométricas ha sido validada experimentalmente por investigadores como Singh et al., quienes demostraron que el sinterizado asistido por láser de CO₂ permite obtener películas de nanopartículas con alta conectividad y transparencia funcional [30].

Para predecir el comportamiento térmico del sistema y trascender el ajuste empírico, se adopta el modelo de conducción de calor en régimen transitorio desarrollado por Bougdid et al. (2023) [28]. Este modelo considera la película como un medio absorbente sobre un sustrato, sujeto a un flujo de calor superficial constante durante un intervalo de exposición determinado. La temperatura máxima alcanzada en el centro del punto de incidencia (spot) se modela mediante la siguiente solución analítica:

$$T(0,t) = T_r + \frac{2AP}{ka} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \quad (2)$$

- $T(0,t)$: Temperatura superficial transitoria en el centro del haz.
- T_r : Temperatura ambiente inicial de referencia.
- A : Absortividad efectiva del material a la longitud de onda de operación.
- P : Potencia nominal del haz láser incidente.
- K y α : Conductividad y difusividad térmica efectivas del sistema, respectivamente.
- a : Área efectiva de interacción del haz con el recubrimiento.

- t : Tiempo de interacción o exposición del material al flujo energético.

En un régimen de barrido lineal, el tiempo de exposición (t) se relaciona con el diámetro efectivo de haz (d) y la velocidad de escaneo (V) mediante la ecuación (3):

$$t = \frac{d}{v} \quad (3)$$

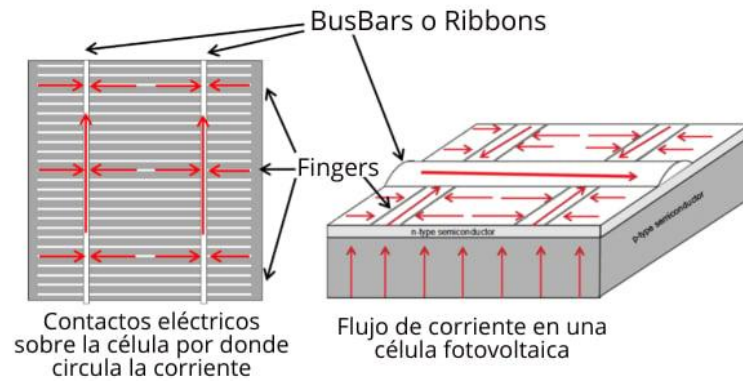
Esta relación matemática establece que la temperatura máxima es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad de barrido, permitiendo un control preciso de la densidad de energía depositada sobre la red de nanotubos.

1.4.10 Fundamentos del diseño de rejillas colectoras en celdas solares

El desempeño de una celda fotovoltaica depende críticamente de la arquitectura de sus contactos superficiales. La rejilla colectoras compuesta por fingers y busbars tiene la función de recolectar los portadores de carga generados en la unión p-n y transportarlos hacia el circuito externo.

Como se ilustra en la figura 2. Este proceso implica un compromiso (trade-off) entre dos fenómenos físicos opuestos:

Figura 2. *Mecanismos de transporte de carga y flujo de corriente en una celda solar*



Nota. Fuente de [31].

- ✓ **Pérdidas óhmicas:** Los electrones deben viajar lateralmente a través de la capa semiconductor hasta alcanzar un dedo. Un espaciamiento mayor (d) incrementa la resistencia en serie (R_s) y reduce el Factor de Llenado (Fill Factor). Según Green et al., el espaciamiento óptimo para celdas de alta eficiencia se sitúa entre 1.5mm y 2.5mm [32].
- ✓ **Pérdidas por sombreado:** Un diseño con dedos muy anchos (a) bloquea la luz incidente. La literatura técnica sugiere que para minimizar la penalización en la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el ancho de los contactos no debería exceder los 100 μm [32].

1.4.11 Ventaja de procesamiento y optimización de parámetros en sinterizado láser

Investigaciones sistemáticas en el procesamiento laser de nanomateriales han demostrado la existencia de una ventana óptima de densidad de energía (E_d) para el sinterizado efectivo de redes de CNTs. Esta ventana de procesamiento es crítica, ya que el transporte de carga en la red macroscópica se rige por tres regímenes térmicos claramente diferenciados [20], [27]:

- **Régimen de sub- sinterizado:** En este estado, la energía térmica absorbida por la red es insuficiente para inducir una difusión atómica significativa en las interfaces intertubulares.

Como consecuencia, no se produce la coalescencia de las paredes de grafeno, resultando en mejoras marginales de la conductividad eléctrica que no satisfacen los requerimientos de un contacto óhmico eficiente.

- **Régimen óptimo:** Bajo condiciones controladas de potencia y velocidad, se promueve la formación de cuellos conductivos “necks” entre nanotubos adyacentes. Este proceso reduce de manera sustancial la resistencia de unión “junction resistance” al aumentar el área de contacto íntimo, lo que se traduce en una disminución drástica de la resistividad sin comprometer la integridad del material. [20].
- **Régimen de sobre-sinterizado:** Una densidad de energía excesiva eleva la temperatura por encima del umbral de estabilidad térmica de los SWCNT. Esto puede provocar fenómenos indeseables como la ablación del material, la oxidación, la grafitización amorfa o incluso la delaminación de la película debido al estrés térmico inducido en la interfaz con el sustrato de silicio o el polímero adhesivo [33].

La identificación precisa de esta ventana de procesamiento fundamenta en el modelo analítico de interacción haz-materia, es esencial para maximizar el desempeño eléctrico de la red y asegurar la estabilidad a largo plazo del dispositivo fotovoltaico.

1.4.12 Caracterización morfológica, estructural y eléctrica

- **Difracción de rayos X (XRD)**

Esta técnica permite evaluar el ordenamiento atómico de los SWCNT y monitorear posibles cambios en su hibridación tras la exposición energética. Para materiales carbonáceos, el análisis se centra en el pico de difracción correspondiente al plano (002), ubicado típicamente cerca de $2\theta \approx 26^\circ$, el cual está asociado a la distancia interplanar entre las paredes de grafeno.

La relevancia del XRD en este estudio radica en su capacidad para detectar procesos de oxidación o grafitización amorfa, proporcionara una métrica cuantitativa de la estabilidad estructural, asegurando que el proceso de consolidación térmica no alteró las propiedades intrínsecas del nanomaterial [34].

- **Espectroscopía de energía dispersa (EDS)**

Es una técnica de microanálisis químico elemental basada en la detección de rayos X característicos. Estos se generan cuando el haz de electrones de SEM desplaza un electrón de una capa interna del átomo, provocando que un electrón de una capa superior ocupe su lugar y libere energía en forma de fotón. Dado que cada elemento tiene una firma energética única, el EDS permite identificar y cuantificar la composición de la muestra para identificar la composición elemental de la muestra [35].

Su inclusión es crítica en este estudio para monitorear la pureza química de la red de SWCNTs, que actúa como un control de calidad sobre la estequiometría de la superficie, asegurando la integridad química del nanomaterial antes de las etapas de procesamiento térmico.

- **Comportamiento eléctrico y resistencia**

La validación del proceso de sinterizado láser en redes de SWCNT requiere la cuantificación de su capacidad de transporte de carga. A nivel macroscópico, la propiedad más relevante para películas delgadas es la resistencia de hoja (R_s), expresada en Ohmios por cuadro (Ω/sq).

A diferencia de la resistencia convencional, la R_s es independiente de las dimensiones laterales del contacto, lo que permite comparar la calidad de la red de nanotubos de diferentes muestras de manera estandarizada [36]. En este estudio, la medición se realiza mediante el método de contacto

directo con un multímetro digital. La resistencia medida (R) se relaciona con la resistividad del material (ρ) y la geometría de la película mediante la ecuación (4):

$$R = \rho \frac{L}{W t} = \frac{\rho}{t} \left(\frac{L}{W} \right) = R_s \left(\frac{L}{W} \right) \quad (4)$$

Donde t es el espesor de la película, L la longitud y W el ancho. Por lo tanto, una disminución en la resistencia tras el paso del láser es evidencia directa a dos fenómenos físicos, que optimizan el transporte de carga en redes percolantes [36].

- **Reducción de la resistencia de unión “junction resistance”:** El calor del láser promueve la coalescencia de los nanotubos, en sus puntos de contacto, facilitando el transporte de electrones (incluyendo el efecto túnel) al reducir las barreras de potencial entre tubos adyacentes.
- **Densificación de la red:** El proceso térmico elimina solventes residuales y compacta la red, aumentando el número de rutas conductoras efectivas por unidad de área.

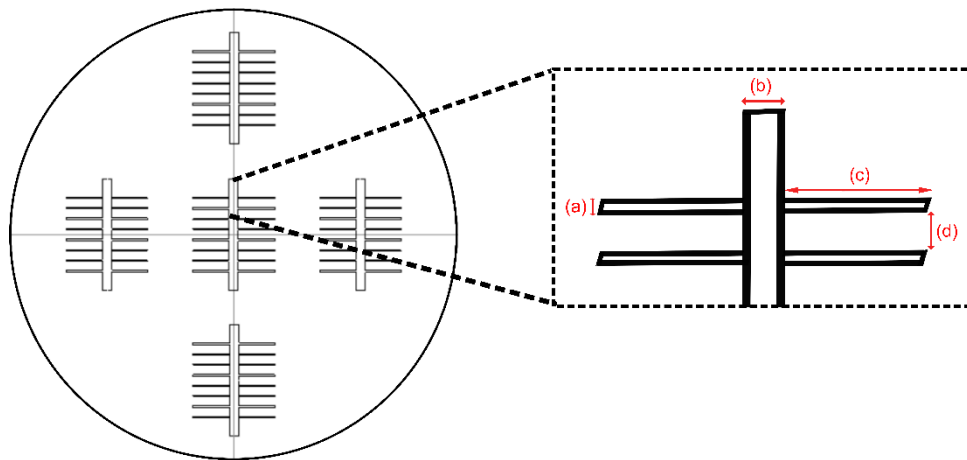
Capítulo 2

2. METODOLOGÍA.

2.1 Diseño de la rejilla de contacto y especificaciones de parámetros geométricos

Para los prototipos de esta investigación, se desarrolló un patrón de rejilla optimizado para las propiedades de las películas de SWCNT sinterizadas por láser. El esquema geométrico, Plano 1 busca maximizar la recolección de portadores y minimizar la resistencia serie, manteniendo un balance crítico con la transparencia óptica del dispositivo. Las dimensiones finales y su fundamentación técnica se detallan en la Tabla 1.

Plano 1. Esquema geométrico del patrón de contactos o vías de SWCNT



Nota. (a) Ancho del dedo “finger”, (b) Ancho de barra colectora “busbar”, (c) Longitud de los dedos y (d) Espaciamiento entre dedos.

Tabla 1. *Parámetros de diseño geométrico de la rejilla de contacto frontal sobre la capa activa de SWCNT*

	Valor	Justificación
(a) Ancho de dedo	35 μm	Reducción del factor de sombreado para maximizar la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}). El valor supera el estado del arte convencional (100 μm), aprovechando la precisión del sinterizado selectivo.
(b) Ancho de barra de colectora	2 mm	Dimensionamiento basado en la compatibilidad mecánica en los pines de contacto del simulador solar, asegurando una baja resistencia de contacto (R_s) durante la extracción de potencia.
(c) Longitud de dedo	8 mm	Ajuste a la apertura geométrica de la celda para evitar zonas muertas y garantizar la colección de portadores en el perímetro del área activa.
(d) Espaciamiento	2 mm	Optimización de la longitud de transferencia de carga. Este valor balancea la resistencia de la capa de SWCNT con las pérdidas por sombreado, según criterios de diseño de rejillas.

2.2 Materiales y Equipos utilizados

2.2.1 Materiales y reactivos para la síntesis de la pasta

Para la síntesis de la pasta conductora, se seleccionaron precursores que garantizan una dispersión coloidal estable y una red percolante eficiente. Las cantidades fueron calculadas para una formulación base de aproximadamente 90g de mezcla, asegurando la viscosidad necesaria para el proceso de deposición por doctor blade.

Tabla 2. *Insumos y reactivos empleados en la formulación de la pasta de SWCNTs*

Material	Cantidad	Función
Nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT)	1.0g	Fase activa conductora.
Darvan 670 (Na polinaftalenosulfonato)	1.5g	Surfactante/dispersante aniónico.
Agua desionizada	70.0 g	Medio dispersante principal.
Glicerol ($\geq 99\%$)	15.0 g	Humectante y agente antievaporante
Carboximetilcelulosa sódica (CMC)	0.5 g	Espesante y modificador reológico.
Etanol	5.0 mL	Cosolvente para humectación

2.2.2 Equipos de laboratorio e instrumentación

Para la ejecución de la fase experimental, se utilizó instrumentación de alta precisión que permitió controlar las variables críticas de síntesis, dispersión y procesamiento térmico. Las especificaciones de los equipos empleados se consolidan en la Tabla 3.

Tabla 3. *Equipos de laboratorio e instrumentación*

Equipo	Especificación técnica	Aplicación
Sonda ultrasónica (Sonicador)	Potencia: 120 W (Pulsos: 5s ON/ 3s OFF)	Desaglomeración de los haces de SWCNT mediante el fenómeno de cavitación acústica.
Medidor de pH digital	Ajuste medio (pH \approx 7-8)	Monitoreo del potencial de hidrogeno para garantizar la estabilidad coloidal y evitar la re-aglomeración.
Balanza analítica	Precisión: ± 0.0001 g	Pesaje de alta precisión de los precursores y aditivos de la pasta.
Agitador magnético	Control digital de velocidad (RPM)	Disolución de la CMC y homogenización de la suspensión post-sonicación

Láser CO ₂	Longitud de onda: $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$	Sinterizado térmico selectivo para la formación de la red de contacto.
Baño termostático	Control de temperatura (35°C)	Control de la energía térmica para evitar el sobrecalentamiento de la pasta durante la sonicación

2.3 Determinación de los parámetros de sinterizado láser mediante modelado térmico

La selección de la ventana operativa de potencia (P) y velocidad (V) se derivó de la implementación del modelo descrito en el Capítulo 1, de la ecuación (2). Se estableció una temperatura objetivo de 120 °C como criterio de diseño, fundamentado en la necesidad de garantizar la evaporación del solvente y la consolidación de la red de SWCNT sin comprometer la estabilidad de los aditivos orgánicos ni inducir la oxidación térmica de los nanotubos.

Para la ejecución del modelo y la validación de las cinco condiciones experimentales, se dieron los siguientes criterios para los parámetros de entrada:

- **Absortividad efectiva (A):** Se asignó un valor de 0.85. Aunque los SWCNT presentan una alta sección eficaz de absorción en el infrarrojo, la naturaleza multifásica de la pasta (presencia de glicerol y CMC) justifica una absortividad ligeramente inferior a la unidad.

- **Área de interacción del láser (a):** Se calculó a partir de un diámetro efectivo (d) de 0.9 mm, valor validado experimental mediante la medición del ancho de pista de las muestras sinterizadas.
- **Propiedades térmicas (k, α):** Se utilizaron valores efectivos basados en la fase líquida dominante (agua-glicerol) asumiendo que el transporte de calor inicial está gobernado por el medio dispersante.

Tabla 4. *Matriz de parámetros experimentales y temperaturas estimadas*

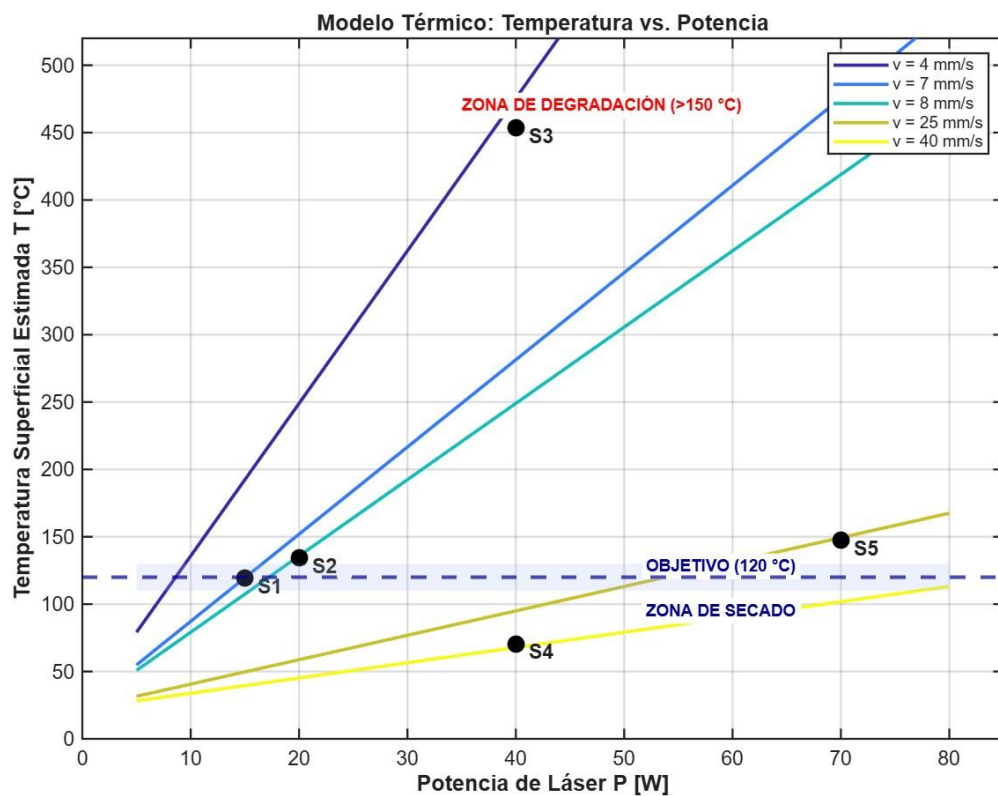
Probeta	Potencia (P) [W]	Velocidad (V) [mm/s]	Tiempo de int. (t_{int}) [ms]	Temp. estimada (T_{est}) [°C]	Condición térmica
S1	15	7	0.14	119.25	Punto óptimo (Objetivo)
S2	20	8	0.125	134.44	Sinterizado moderado
S3	40	4	0.25	453.48	Degradación térmica
S4	40	40	0.025	70.64	Sub- sinterizado
S5	70	25	0.04	147.21	Límite de estabilidad

Nota. Los cálculos de tiempo de interacción (t_{int}) se basan en la relación d/V para un diámetro de 0.9 mm.

Como se observa en los resultados de la Tabla 4, la condición S1 se aproxima de manera óptima a la isoterma de diseño (119.25 °C), mientras que las condiciones extremas como S3 evidencian un aporte energético excesivo.

Para visualizar la correlación entre estas variables y delimitar la ventana operativa, se generó la Figura 3, la cual superpone los puntos experimentales al modelo analítico.

Figura 3. Mapa de isotermas y validación experimental del modelo térmico de sinterizado para películas de SWCNT

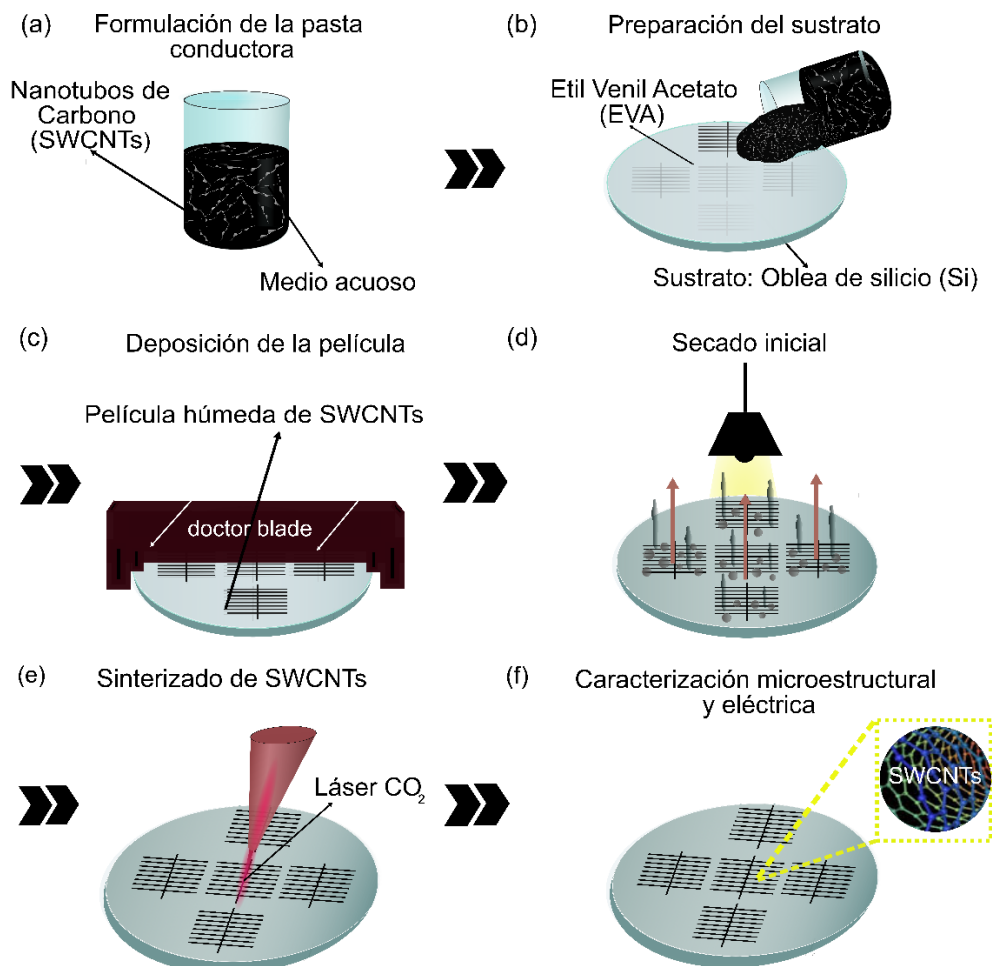


Para validar la precisión predictiva del modelo analítico, los parámetros de las probetas S1 a S5 se proyectaron sobre el mapa de isotermas resultante en la Figura 3. Esta representación permite confirmar que la condición S1 se sitúa en la región de equilibrio térmico de 120°C, mientras que las variaciones en la velocidad de barrido desplazan a las muestras restantes hacia regímenes de sub-sinterizado (energía insuficiente) o degradación térmica evidente (ablación o grafitización).

2.4 Procedimiento experimental de la síntesis de la pasta conductora de SWCNT.

La Figura 4, sistematiza la arquitectura del proceso, estableciendo la jerarquía entre la estabilización reológica de la pasta conductora, el confinamiento geométrico del depósito y la activación térmica selectiva mediante láser. Basado en este flujo, el procedimiento se divide en tres fases principales: síntesis, deposición y caracterización.

Figura 4. Ruta experimental para la obtención de electrodos de SWCNTs



(a) **Humectación y dispersión primaria:** Inicialmente, se pesaron 1.0 g de SWCNT y se trataron con 5 ML de etanol. Este paso es crítico para reducir la tensión superficial y favorecer la humectación de la superficie hidrofóbica de los nanotubos antes de su contacto con el medio acuoso. Posteriormente, se incorporó la solución de Darvan 670 disuelta en 70g de agua desionizada.

Dispersión ultrasónica y control de pH: La mezcla se sometió a una sonda ultrasónica de alta potencia en un baño de hielo para mantener la temperatura del sistema por debajo de los 35 °C. Se utilizó un régimen de pulsos (5s ON / 3s OFF) para evitar la degradación térmica del surfactante y la ruptura excesiva de los nanotubos.

Durante este proceso, se utilizó el pH-metro para monitorizar la acidez de la suspensión, asegurando que el pH se mantuviera en el rango de estabilidad electrostática proporcionado por el Darvan 670. Un pH controlado garantiza que las fuerzas de repulsión aniónica superen las fuerzas de atracción de Van de Waals, evitando la reglomeración espontánea de los SWCNT.

Estabilización reológica y maduración: Una vez alcanzada una suspensión visualmente homogénea y sin grumos visibles, se añadieron 15g de glicerol y 0.5 de CMC bajo agitación mecánica suave durante 30minutos. La CMC como un agente tixotrópico que eleva la viscosidad de la mezcla, transformando la suspensión fluida en una pasta apta para la técnica de doctor blade. Finalmente, la pasta se dejó reposar por 24 horas para la eliminación natural de burbujas de aire atrapadas.

(b) **Preparación del sustrato:** Se utilizaron sustratos de silicio cristalino, los cuales se recubrieron con una lámina de Etil Vinil Acetato (EVA) para mejorar la adhesión de la película.

Delimitación del área: Sobre el sustrato se fijó cinta técnica de espesor controlado para definir la geometría de la celda.

Dispensado de la pasta: Se depositó un volumen controlado de la pasta de SWCNT en un extremo del área delimitada.

- (c) **Extendido con doctor blade (cuchilla micrométrica):** Se distribuyó la pasta de forma uniforme al desplazar la cuchilla manualmente a lo largo del sustrato, manteniendo un ángulo y velocidad constante.
- (d) **Estabilización:** La película resultante se dejó reposar a temperatura ambiente antes del tratamiento térmico posterior.
- (e) **Preparación del equipo y la muestra:** Se aseguro que el sistema láser estuviera en condiciones óptimas.

Configuración de los parámetros de operación: Se establecieron la potencia (P), la velocidad de barrido (v), según su diseño experimental previamente.

Ejecución del sinterizado: Se activó el láser para irradiar la superficie de la película. El haz siguió un patrón de escaneo programado que cubrió de manera uniforme toda el área de la celda.

- (f) **Difracción de rayos X (XRD):** Se determinó la estructura y la pureza de las muestras utilizando un difractómetro PANalytical X'Pert. El análisis se realizó mediante un barrido regular continuo en un rango de 2θ . Los patrones de difracción obtenidos permitieron evaluar el grado de cristalinidad y la presencia de posibles impurezas.

Espectroscopía de energía dispersa (EDS): Esta técnica se empleó como control de pureza para verificar la estequiometría de la red de SWCNT, permitiendo identifica la presencia de oxígeno residual y asegurar la ausencia de contaminantes metálicos o degradación térmica.

Microscopía electrónica de barrido (SEM): La topografía superficial, la porosidad y la distribución de la red de nanotubos se analizaron mediante SEM. Para mitigar el efecto de carga electrostática y optimizar la resolución de las micrografías. Las imágenes se capturaron a diferentes aumentos para evaluar la homogeneidad del recubrimiento tras la deposición por doctor blade.

Caracterización eléctrica y resistencia: Se determinó mediante el método de contacto directo utilizando un multímetro digital de alta precisión. Para garantizar la representatividad estadística y evaluar la uniformidad del sinterizado, se aplicó un muestreo en 4 puntos independientes de la película. Los valores de resistencia obtenidos se emplearon para calcular la conductividad de la red de SWCNT, correlacionando la eficiencia del transporte de carga con los parámetros de procesamiento láser.

Capítulo 3

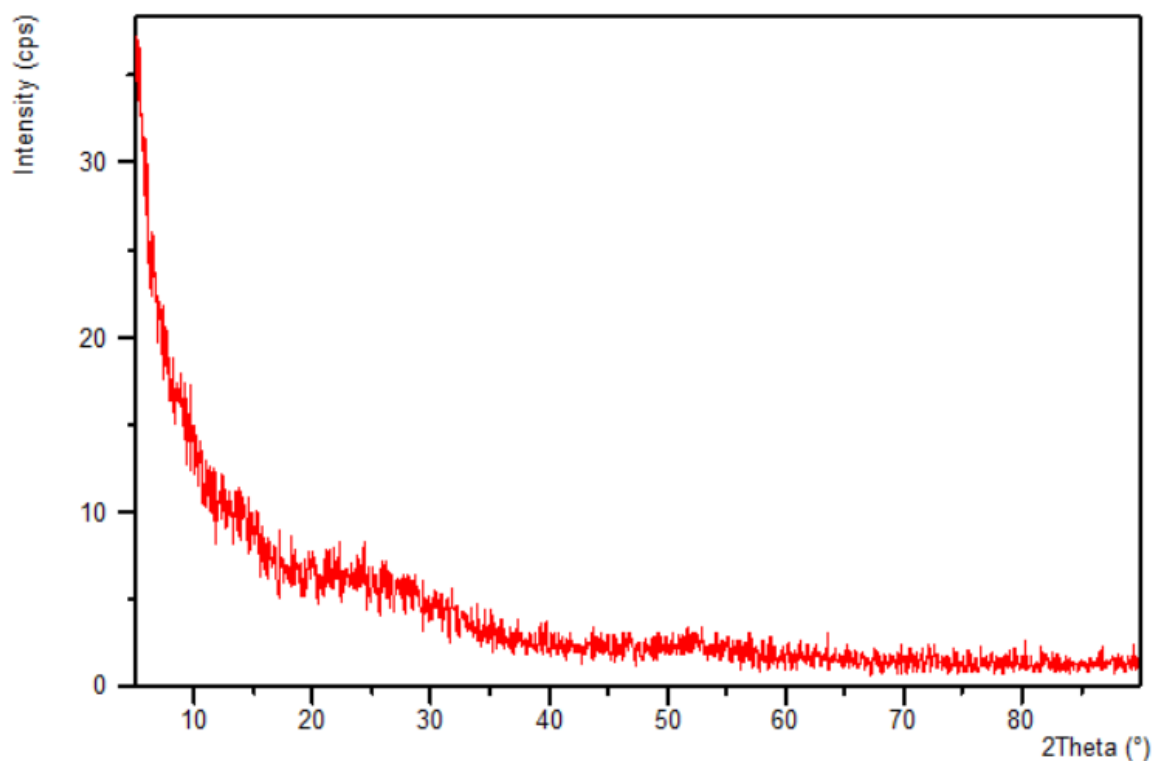
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización estructural de los SWCNTs

3.1.1 Difracción de rayos X (XRD)

El perfil de difracción obtenido para la muestra de SWCNT, figura 5 revela una naturaleza estructural predominante desordenada, consistente con la física de los nanomateriales de carbono unidimensionales. A continuación, se detalla la discusión de los hallazgos fundamentada en la literatura científica:

Figura 5. *Difractograma de los nanotubos de carbono (SWCNTs)*



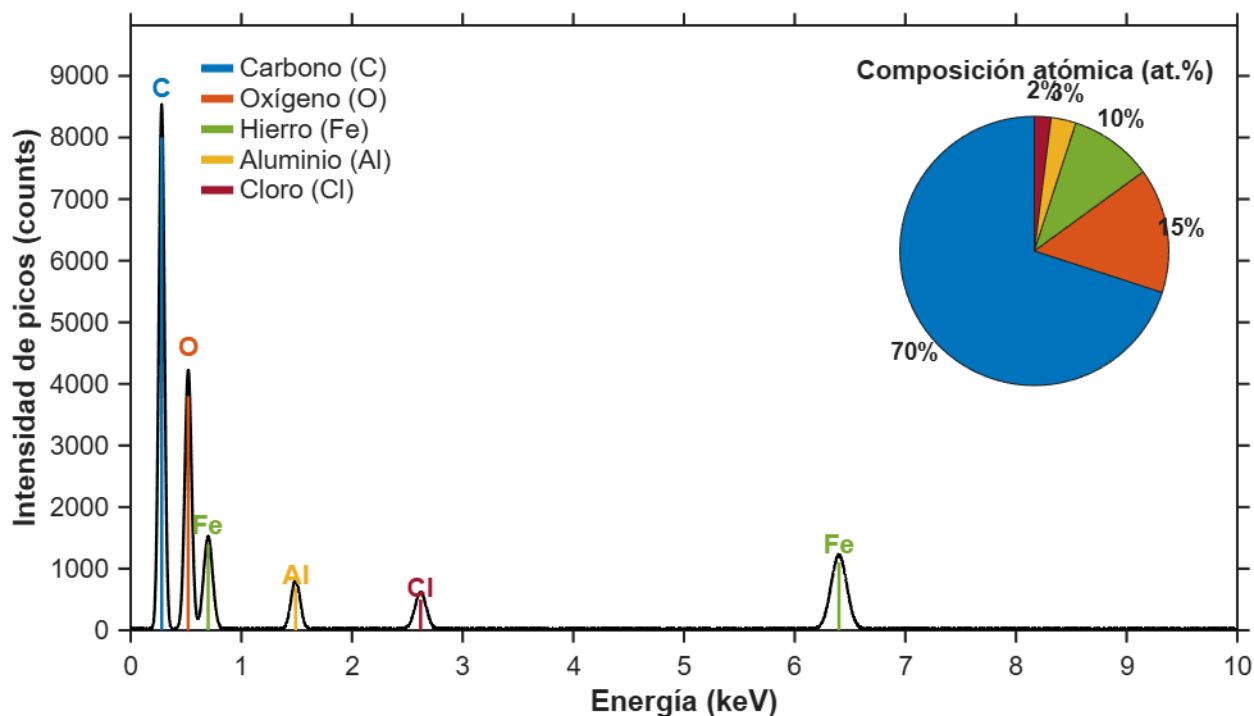
- **Baja cristalinidad y ensanchamiento de picos:** El difractograma presenta un fondo elevado y una señal difusa sin picos intensos, lo cual es indicativo de un bajo grado de cristalinidad a largo alcance. Este comportamiento es característico de los SWCNTs, es inherentemente débil y ancha en comparación con otras formas de carbono. De acuerdo

con la literatura, la curvatura de las láminas de grafeno y el reducido tamaño de los dominios cristalinos provocan un ensanchamiento de Bragg significativo [37]. Esto se debe a que la estructura de los SWCNT consiste en una única capa enrollada que carece de apilamiento periódico tridimensional (multi-capa) que posee en cambio, el grafito o los MWCNT [38].

- **Análisis del plano (002):** En materiales grafiticos, el pico de reflexión del plano (002) se ubica típicamente en $2\theta \approx 26.2^\circ$ [38]. Sin embargo, en la figura 5, se observa que este pico es extremadamente ancho y de baja intensidad. Esta observación coincide con las investigaciones que establecen que en redes de SWCNT sin tratamientos de grafitización a alta temperatura, suele quedar enmascarado por el desorden estructural y la presencia de carbono amorfo residual proveniente del proceso de síntesis

3.1.2 Espectroscopia de energía dispersa (EDS)

Figura 6. Composición química elemental, "Energy Dispersive Spectroscopy" (EDS) de los SWCNTs empleados.



El análisis EDS de la muestra evidencia una composición predominante carbonoso, con un contenido aproximado de 70 at. % de carbono, lo cual es característico de materiales basados en nanotubos de carbono, cuya estructura está constituida por redes grafiticas de átomos de Carbono con hibridación sp^2 [39]. Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en la literatura para CNTs sintetizados por métodos como deposición química de vapor (CVD), donde la matriz carbono aparece como el elemento dominante en los espectros EDS [40].

La presencia de oxígeno (15 at. %) se atribuye principalmente a la oxidación superficial del material y a la existencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie de los nanotubos, generados por exposición ambiental o por tratamientos químicos durante las etapas de procesamiento, fenómeno común en materiales carbonosos [39], [40].

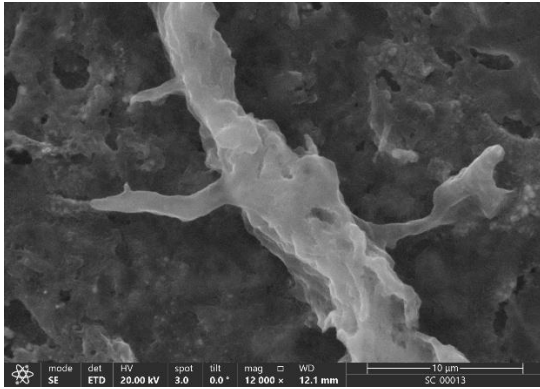
Un hallazgo relevante es la detección de hierro (10 at. %). Este elemento se identifica como residuo del catalizador metálico empleado durante la síntesis de los nanotubos [41]. De acuerdo con Kuznetsov et al., es común que partículas del catalizador permanezcan encapsulados o adheridas a la estructura de los CNT incluso después de procesos de purificación con ácidos fuertes. Asimismo, la persistencia de estos residuos metálicos juega un rol crítico en las propiedades fisicoquímicas del material final, tal como lo señalan Xia et al. en sus estudios sobre la estabilidad de redes de nanotubos [42].

Finalmente, las señales de aluminio (3 at. %) y cloro (2 at. %), presentes en proporciones traza, se asocian a efectos experimentales, como el soporte de montaje del SEM o residuos de reactivos empleados durante la preparación de la muestra, y no representan fases constituidas del material. En conjunto, los resultados confirman una matriz rica en carbono con contribuciones secundarias coherentes con el proceso de síntesis y caracterización de nanotubos de carbono.

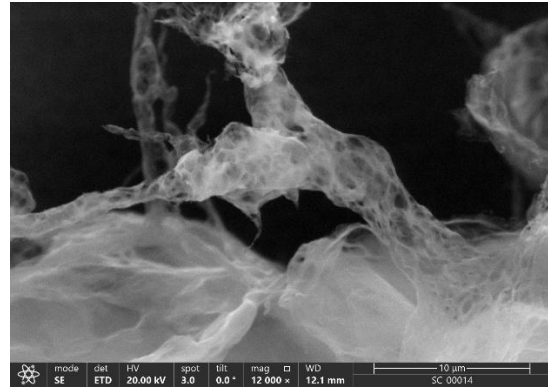
3.2 Caracterización microscópica electrónica de barrido (SEM)

La morfología superficial y la configuración de la red de nanotubos de carbono (SWCNT) tras el proceso de manufactura avanzada dieron evaluadas mediante microscopía electrónica de barrido. El análisis se centró en la verificación de la red percoladora, la efectividad del sinterizado localizado y la preservación de la integridad del sustrato.

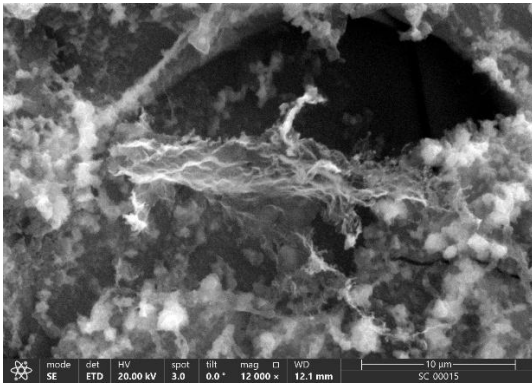
Figura 7. *Micrografías SEM de la microestructura sinterizadas de los SWCNTs a (a) 119.25 °C, (b) 453.48 °C, (c) 70.64 °C, (d) 147.21 °C, (e) 134.44 °C*



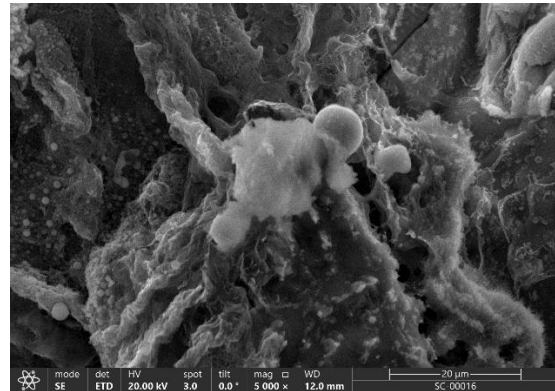
(a)



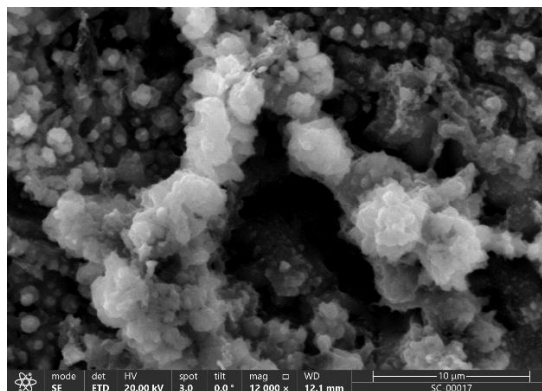
(b)



(c)



(d)



(e)

La evolución morfológica de la red de SWCNTs bajo el tratamiento láser de CO₂ revela una dependencia crítica entre la isoterma alcanzada y la consolidación de la red conductora.

- **Régimen de sub-sinterizado (70.64°C):** En la condición (c), la energía térmica es insuficiente para superar la barrera de activación necesaria para la volatilización de los agentes dispersantes (CMC/Darvan), Esto resulta en haces recubiertos por una capa orgánica residual que actúa como una barrera dieléctrica, impidiendo un contacto íntimo entre tubos y elevando drásticamente la resistencia de contacto [37].
- **Punto óptimo de sinterizado (119.25 °C):** Al alcanzar la temperatura de diseño en la condición (a), se observa una limpieza estructural efectiva. La eliminación de los surfactantes permite la formación de cuellos de sinterización en los puntos de cruce de los nanotubos. Este fenómeno maximiza la densidad de interconexiones y habilita el transporte de carga por efecto túnel (tunneling) y salto de corto alcance (hopping), optimizando la conductividad eléctrica de la película [29],[38].
- **Régimen de transición (134.44 °C y 147.21 °C):** Con el incremento térmico en las condiciones (e) y (d), la red inicia un proceso de aglomeración y aumento de rugosidad. Aunque esto puede mejorar el anclaje mecánico, comienza a distorsionar la relación de aspecto de los haces y a estresar térmicamente la interfaz polimérica.
- **Régimen de degradación térmica (453.48 °C):** En la condición (b), el exceso de densidad de energía provoca la destrucción de la red. Se evidencia oxidación térmica y fragmentación de los nanotubos, lo que implica la pérdida de hibridación sp²[40].

Por consiguiente, se valida que la isoterma de 119.25 °C garantiza el umbral de percolación óptimo para el transporte de carga lateral, preservando la estabilidad estructural necesaria para la integración en dispositivos fotovoltaicos.

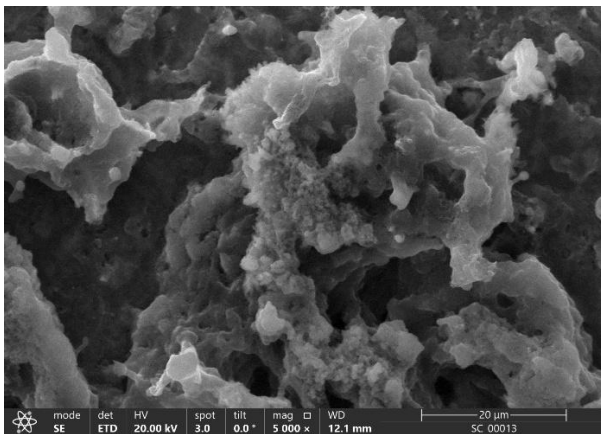
3.2.1 Morfología de la interfaz nanotubo-semiconductor (119.25 °C)

El análisis de la muestra sinterizada a 119.25 °C permite validar la arquitectura del contacto frontal tras la remoción de la máscara de sacrificio. A esta isoterma, el sistema demuestra un equilibrio óptimo entre la consolidación de la red y la integridad de la oblea de silicio subyacente.

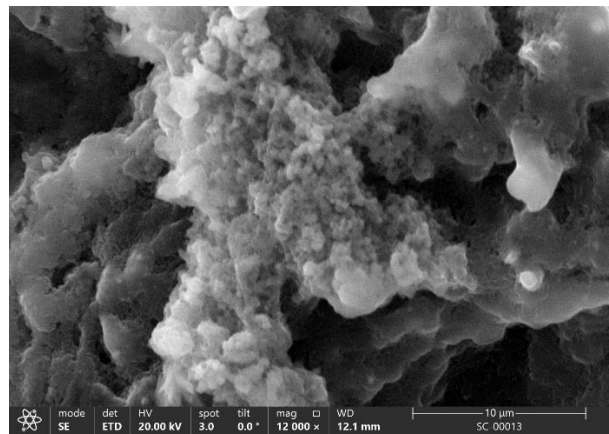
3.2.2 Consolidación de la red y dinámica de uniones

La micrografía revela una malla de SWCNTs con una distribución estocástica altamente interconectada. Se identifican tres hitos morfológicos:

Figura 8. *Micrografías SEM de la red microestructural de SWCNTs sinterizados a 119.25 °C: a) Densidad de red, (b) Integridad de haces y limpieza interfacial, (c) Cuellos de sinterizado.*



(a)



(b)



(c)

- **Red de percolación (a):** La formación de una red densa y homogénea asegura que la carga generada en el silicio sea recolectada de manera eficiente, minimizando las pérdidas por recombinación en zonas de baja conectividad, optimizando la densidad de corriente de cortocircuito [38].
- **Haces de alta relación de aspecto (b):** Los haces mantienen su continuidad estructural, funcionando como las vías principales de transporte electrónico. Su integridad confirma el sinterizado laser fue selectivo, eliminado la fase orgánica sin inducir la fragmentación o ablación de los nanotubos [29].
- **Limpieza interfacial (b):** La nitidez de los haces y la ausencia de velos opaco confirman una remoción total de la máscara de EVA y del surfactante CMC. Una interfaz silicio-carbono libre de residuos poliméricos es vital para garantizar un contacto óhmico o una barrera Schottky eficiente, según el dopaje del semiconductor [43].

- **Cuellos de sinterizado (c):** En los puntos de intersección se observa una coalescencia real de las paredes de los nanotubos. Esta “soldadura nanométrica” es el factor crítico de diseño, sustituye los contactos mecánicos simples por uniones de baja impedancia reduciendo la resistencia (R_s) del dispositivo [29].
- **Selectividad térmica:** La superficie del silicio permanece libre de micro cráteres o daño por ablación. Esto demuestra que la energía del láser CO_2 fue absorbida casi exclusivamente por los nanotubos, protegiendo las propiedades cristalinas de la oblea.
- **Resiliencia mecánica de la red:** Tras el retirado físico del EVA, la malla de SWCNTs conserva su densidad y topografía original. El hecho de que los haces no se hayan desprendido ni desplazado durante el desenmascarado es una prueba directa de una fuerte interacción de Van der Waals y un acoplamiento mecánico efectivo con la rugosidad superficial del silicio [40].

3.3 Caracterización eléctrica y resistencia

3.3.1 Análisis de la respuesta óhmica y transporte en la red consolidada

La evaluación de la malla de SWCNTs tratada a 119.25 °C permite cuantificar la eficiencia de la red de percolación. En esta sección, los valores de resistencia validan si la pasta depositada sobre la oblea de silicio ha formado interconexión molecular efectiva tras sinterizado láser.

Tabla 5. *Medición de resistencia superficial en cuadrantes de la red de SWCNTs*

Región de Muestreo	Resistencia (R) [Ω]	Desviación (%)
Vértice Superior	45.2	+0.89
Vértice Inferior	44.1	-1.56
Zona Central	43.8	-2.23
Lateral Derecho	46.1	+2.90
Media Experimental	44.8 Ω	Homogénea

Nota. La estabilidad de los valores (44.8 Ω promedio) comprueba que la pasta es funcional bajo los principales físicos descritos.

- **Transición del mecanismo de conducción y energía de activación:** Los resultados demuestran que la isoterma de 119.25°C suministró la energía necesaria para superar la resistencia de salto (hopping). En redes de nanotubos no tratadas, los electrones deben tunelar a través de barreras dieléctricas formadas por residuos de surfactante (CMC/Darvan). El valor de 44.8 Ω confirma que el sinterizado laser indujo una transición hacia una conducción puramente óhmica mediante la coalescencia de los haces, un fenómeno alineado con los hallazgos de Hecht et. al.[44], quienes reportan que la eliminación de surfactantes orgánicos es el paso limitante para reducir la resistencia en redes de SWCNT.
- **Isotropía eléctrica y reología de la pasta:** La desviación estándar inferior al 5% entre cuadrantes no es un dato menor, es la prueba de la homogeneidad macroscópica del

electrodo. Desde un enfoque crítico [45], cualquier variación mayor indicaría una falla en la reología de la pasta durante el proceso de doctor blade, creando gradientes de densidad. En una celda solar, esto derivaría en “puntos calientes” (hotspots) que generarían caídas de tensión localizadas, reduciendo drásticamente el Factor de Llenado (FF). La uniformidad medida garantiza que la red de percolación es estable y capaz de distribuir la carga de manera equitativa en toda el área activa del silicio.

- **Resistencia de serie (R_s):** La literatura reporta valores de resistencia superficial para redes de SWCNTs bien percoladas en el rango (40-45 Ω) se encuentra dentro de este rango, lo que demuestra que la red optimizada, valiendo la efectividad del proceso de deposición y consolidación de la película conductora [46].

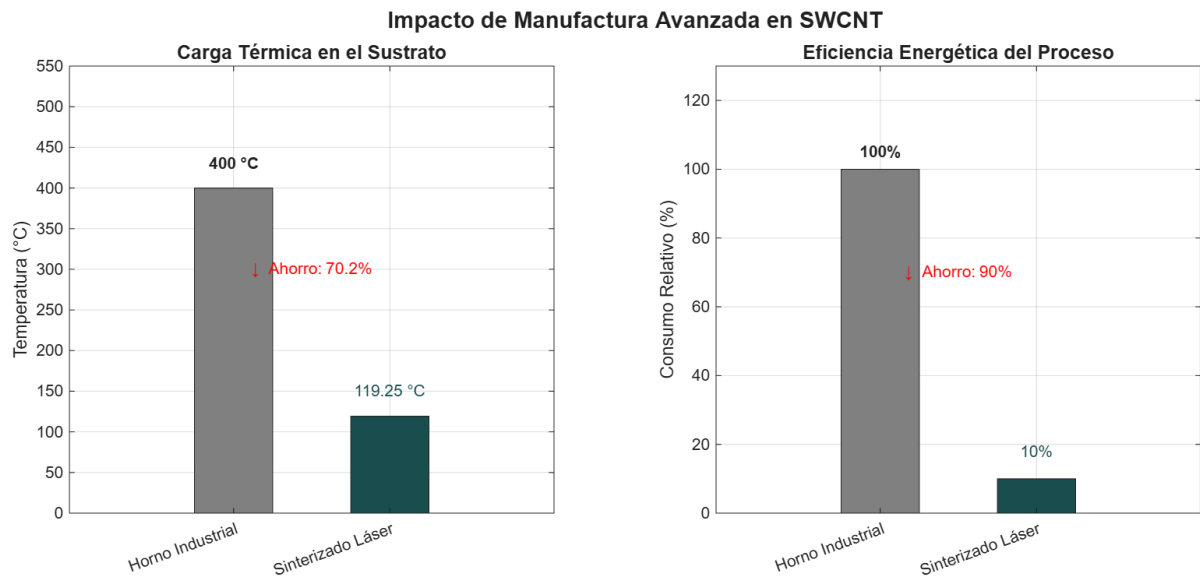
3.4 Discusión de impacto y viabilidad de las películas conductoras

A diferencia de los procesos de manufactura tradicionales, el protocolo de sinterizado láser desarrollado en esta investigación representa un cambio de paradigma en el procesamiento de nanomateriales. El análisis de los resultados permite establecer una comparativa crítica sobre la sostenibilidad del proyecto.

3.5.1. Análisis económico: eficiencia de proceso y escalabilidad

El éxito económico de esta propuesta no radica únicamente en el material, sino en la selectividad energética.

Figura 9. *Análisis de Impacto Económico: Horno Industrial y Sinterizado Láser*



- Ruptura del umbral térmico:** Mientras la literatura industrial establece que el sinterizado de redes de carbono requiere hornos a 400 °C para eliminar ligantes, este trabajo demuestra que el láser de CO₂ alcanza la misma funcionalidad a una isoterma de 119.25 °C. Esto implica que el 70.2 % del calor suministrado en métodos convencionales es desperdicio energético.
- Ahorro de CAPEX y OPEX:** Al operar a temperaturas reducidas, se elimina la necesidad de sistemas de enfriamiento forzado y cámaras de vacío costosas. El paso de un proceso de calentamiento global (horno) o uno puntual (láser) reduce el consumo energético estimado en un 90% permitiendo que la producción fotovoltaica competitiva a pequeña y mediana escala.

3.5.2. Análisis ambiental: manufactura verde y huella de carbono

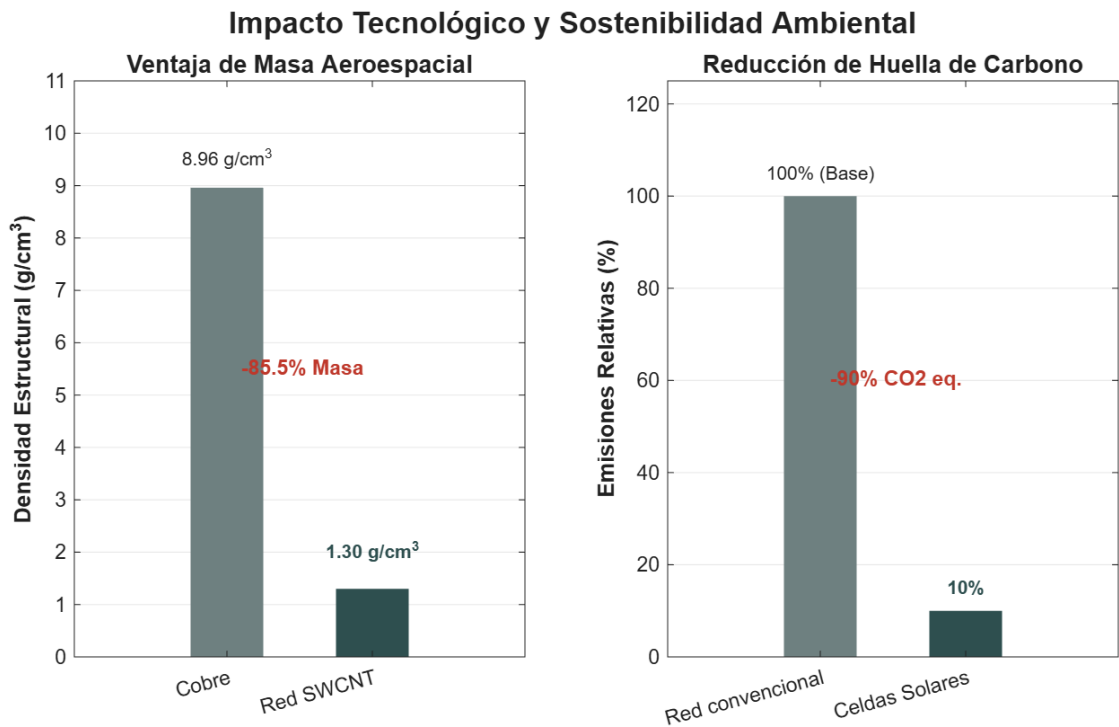
El protocolo desarrollado representa un avance significativo en la descarbonización de la manufactura de nanotubos, fundamentado en la química verde y la economía circular. Mediante la

sustitución de polímeros derivados del petróleo y solventes orgánicos volátiles (VOCs) por un sistema basado en carboximetilcelulosa (CMC) y medios acuosos, se mitiga la toxicidad de los efluentes y se garantiza el cumplimiento de normativas ambientales internacionales. Asimismo, la implementación de la técnica de doctor blade optimiza la eficiencia de uso de los SWCNTs alcanzando un aprovechamiento cercano al 100%, lo cual contrasta drásticamente con el desperdicio del 90% intrínseco en métodos convencionales como el spin coating. Esta optimización de recursos, sumada a la reducción del estrés térmico del proceso, impacta positivamente en el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) del dispositivo, reduciendo la huella de carbono incorporada y promoviendo una producción fotovoltaica de bajo impacto ambiental [47].

3.4.1 Análisis Social y Proyección Tecnológica: El Salto Aeroespacial

El impacto social se traduce en la democratización de tecnología de vanguardia y el avance en sectores estratégicos.

Figura 10. *Análisis social y tecnología asequible*



- La ventaja aeroespacial y satelital:** Una de las implicaciones más profundas es el ahorro de masa. Sustituir contactos de cobre ($\rho \approx 8.96 \text{ g/cm}^3$) reduce drásticamente por redes de SWCNTs ($\rho \approx 1.3 \text{ g/cm}^3$) reduce drásticamente el peso de los componentes. Socialmente, esto se traduce en misiones espaciales y satélites de comunicación más económicos, facilitando la conectividad global en zonas remotas.
- Viabilidad social y sostenibilidad urbana bajo el marco de las ODS:** La versatilidad de estos electrodos ligeros y flexibles democratiza el acceso a la tecnología avanzada, respondiendo directamente al Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (Energía Asequible y No Contaminante) al habilitar la fabricación de celdas solares de bajo costo para comunidades rurales desatendidas. Asimismo, este proyecto promueve la innovación y la infraestructura industrial sostenible (ODS 9), al desarrollar procesos de fabricación

eficientes y escalables para materiales avanzados como los SWCNTs. Finalmente, la optimización de los procesos y la reducción de su huella ambiental apoyan la acción por el clima (ODS 13); mediante soluciones energéticas de alta eficiencia que reducen el impacto ambiental asociado a la tecnología fotovoltaica.

Capítulo 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. La investigación determinó una temperatura de sinterizado óptima que consolida la red de nanotubos de carbono sin comprometer la estabilidad estructural del sustrato polimérico ni las propiedades de la oblea de silicio.
2. El uso de radiación láser demostró una ventaja competitiva sobre los métodos de horneado industrial al permitir un tratamiento localizado que evita el estrés térmico global de los componentes.
3. Las evidencias morfológicas confirmaron la formación de uniones permanentes en las intersecciones de los nanotubos transformando los contactos mecánicos simples en una red conductora robusta baja impedancia.
4. El tratamiento láser facilitó la transición desde una conducción limitada por saltos de energía a un transporte puramente óhmico optimizando la movilidad electrónica a través de la película.
5. El protocolo de manufactura avanzada eliminó exitosamente los residuos orgánicos y surfactantes garantizando una interfaz libre de barreras dieléctricas que dificulten la extracción de carga.
6. Se comprobó una distribución isotrópica de la red sobre la superficie del silicio asegurando una recolección de portadores uniforme y minimizando fallos localizados por puntos calientes, que presenta una buena conectividad y conductividad optimizada.
7. La implementación de una pasta base agua reduce el impacto ambiental al eliminar solventes orgánicos volátiles alineando el proceso con normativas internacionales de química verde.
8. La técnica de depósito seleccionada garantiza un aprovechamiento máximo del nanomaterial optimizando los costos de producción y reduciendo el desperdicio característico de otros métodos.

9. La reducción significativa en el consumo energético total dentro de este método ofrece una alternativa eficiente para la fabricación descentralizada de componentes fotovoltaicos.
10. El estudio valida una tecnología que favorece la democratización energética y el desarrollo de infraestructura urbana resiliente cumpliendo con los objetivos globales de descarbonización.

4.2 Recomendaciones

Tras culminar este estudio, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Realizar estudios de degradación acelerada bajo condiciones críticas de humedad y temperatura para determinar la vida útil de la interfaz entre nanotubos y silicio.
2. Investigar la incorporación de nanotubos para mejorar la dispersión y potenciar la conductividad eléctrica de la red percolante.
3. Utilizar espectroscopia Raman para cuantificar con precisión el nivel de defectos estructurales en los nanotubos antes y después de la exposición al haz láser.
4. Estudiar la posible implementación de redes de SWCNT en celdas solares para aplicaciones aeroespaciales, con el fin de sustituir los contactos metálicos densos por electrodos ultraligeros que optimicen la relación potencia-peso y reduzcan los costos de lanzamientos en misiones satélites.
5. Integrar los electrodos en una celda solar completa para cuantificar el impacto directo del sinterizado laser en la eficiencia de conversión energética final.
6. Evaluar el uso de atmosfera inertes para prevenir trazas de oxidación térmica y maximizar la pureza de las uniones entre los nanotubos a mayores intensidades.
7. Probar la compatibilidad del protocolo térmico sobre películas plásticas de nueva generación para habilitar aplicaciones en electrónica orgánica portable.
8. Desarrollar estudios específicos para desglosar la resistencia de contacto interfacial permitiendo una comparación directa con los contactos metálicos tradicionales.
9. Experimentar con diferentes configuraciones de escaneo y anchos de pulso para optimizar la velocidad de producción sin sacrificar la calidad de la red.
10. Considerar la solicitud de patentes para el protocolo de manufactura y la formulación de la pasta dado su potencial económico y su alineación con las tendencias globales.

5.Referencias:

- [1] VDMA, “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): 2023 Results,” Germany, 2023. Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.eupvsec.org/index.php>
- [2] A. S. Valencia, H. Jativa Cervantes, E. Castillo, O. A. Garavitto, G. E. Soriano, and L. D. Castro, “Analysis of a Vertical-Axis Spherical Turbine for Energy Harvesting in Urban Water Supply Systems,” in *Volume 6: Energy*, American Society of Mechanical Engineers, Nov. 2019. doi: 10.1115/IMECE2019-10643.
- [3] S. W. Glunz *et al.*, “High-efficiency silicon solar cells for low-illumination applications,” in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002. doi: 10.1109/pvsc.2002.1190556.
- [4] A. Kumar and C. Zhou, “The Race To Replace Tin-Doped Indium Oxide: Which Material Will Win?,” *ACS Nano*, vol. 4, no. 1, pp. 11–14, Jan. 2010, doi: 10.1021/nn901903b.
- [5] S. Iijima, “Helical microtubules of graphitic carbon,” *Nature*, vol. 354, no. 6348, pp. 56–58, Nov. 1991, doi: 10.1038/354056a0.
- [6] Mildred Dresselhaus, *Carbon Nanotubes*, vol. 80. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. doi: 10.1007/3-540-39947-X.
- [7] E. Pop, D. Mann, Q. Wang, K. Goodson, and H. Dai, “Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature,” *Nano Lett.*, vol. 6, no. 1, 2006, doi: 10.1021/nl052145f.
- [8] D. S. Hecht, L. Hu, and G. Irvin, “Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures,” *Advanced Materials*, vol. 23, no. 13, pp. 1482–1513, Apr. 2011, doi: 10.1002/adma.201003188.
- [9] S. De and J. N. Coleman, “Are There Fundamental Limitations on the Sheet Resistance and Transmittance of Thin Graphene Films?,” *ACS Nano*, vol. 4, no. 5, pp. 2713–2720, May 2010, doi: 10.1021/nn100343f.
- [10] L. Hu, D. S. Hecht, and G. Grüner, “Percolation in Transparent and Conducting Carbon Nanotube Networks,” *Nano Lett.*, vol. 4, no. 12, pp. 2513–2517, Dec. 2004, doi: 10.1021/nl048435y.

- [11] E. B. Secor, S. Lim, H. Zhang, C. D. Frisbie, L. F. Francis, and M. C. Hersam, "Gravure Printing of Graphene for Large-area Flexible Electronics," *Advanced Materials*, vol. 26, no. 26, pp. 4533–4538, Jul. 2014, doi: 10.1002/adma.201401052.
- [12] F. C. Krebs, "Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques," 2009. doi: 10.1016/j.solmat.2008.10.004.
- [13] P. Pathak, E. Castillo-Orozco, R. Kumar, A. Kar, and H. J. Cho, "Effect of laser power on conductivity and morphology of silver nanoparticle thin films prepared by a laser assisted electrospray deposition method," *J. Laser Appl.*, vol. 33, no. 1, Feb. 2021, doi: 10.2351/7.0000331.
- [14] E. Castillo-Orozco, R. Kumar, and A. Kar, "Thermal response of Bessel beam-heated microdroplets carrying nanoparticles for deposition," *J. Laser Appl.*, vol. 33, no. 1, Feb. 2021, doi: 10.2351/7.0000332.
- [15] E. Castillo Orozco, R. Kumar, and A. Kar, "Silver nanoparticle electrospray laser deposition for additive manufacturing of microlayers on rigid or flexible substrates," in *Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications VII*, S. Zhang and K. G. Harding, Eds., SPIE, May 2018, p. 19. doi: 10.1117/12.2306826.
- [16] S. Park *et al.*, "Aqueous suspension and characterization of chemically modified graphene sheets," *Chemistry of Materials*, vol. 20, no. 21, 2008, doi: 10.1021/cm801932u.
- [17] P. G. Collins, M. S. Arnold, and P. Avouris, "Engineering carbon nanotubes and nanotube circuits using electrical breakdown," *Science (1979)*, vol. 292, no. 5517, 2001, doi: 10.1126/science.1058782.
- [18] A. General, "United Nations Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development," *Division for Sustainable Development Goals: New York, NY, USA*, 2015.
- [19] T. M. Barnes *et al.*, "Carbon nanotube network electrodes enabling efficient organic solar cells without a hole transport layer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 24, Jun. 2010, doi: 10.1063/1.3453445.
- [20] J. Gómez, O. Tigli, and M. Roca, "Laser sintering of carbon nanotube networks for highly conductive and transparent electrodes," *Carbon N. Y.*, vol. 162, pp. 375–383, 2020.

- [21] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, N. W. M. Ritchie, J. H. J. Scott, and D. C. Joy, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. New York, NY: Springer New York, 2018. doi: 10.1007/978-1-4939-6676-9.
- [22] N. W. Gregory, "Elements of X-Ray Diffraction," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 79, no. 7, 1957, doi: 10.1021/ja01564a077.
- [23] I. N. Kholmanov *et al.*, "Improved Electrical Conductivity of Graphene Films Integrated with Metal Nanowires," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 5679–5683, Nov. 2012, doi: 10.1021/nl302870x.
- [24] "¿Qué son los nanotubos de carbono? Una guía completa," Carbon Nano. Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: <https://carbon-nano.com/es/que-son-los-nanotubos-de-carbono-una-guia-completa/>
- [25] "Carbon nanotubes: Advanced topics in the synthesis, structure, properties and applications," *Materials Today*, vol. 11, no. 3, 2008, doi: 10.1016/s1369-7021(08)70021-x.
- [26] A. W. Czanderna and F. J. Pern, "Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 43, no. 2, 1996, doi: 10.1016/0927-0248(95)00150-6.
- [27] A. Dutta, K. Sathiyar, D. Sharon, and A. Borenstein, "Laser induced incorporation of CNTs in graphene electrodes improves flexibility and conductivity," *FlatChem*, vol. 33, p. 100378, May 2022, doi: 10.1016/j.flatc.2022.100378.
- [28] Y. Bougdid, F. Chenard, J. Sugrim, R. Kumar, and A. Kar, "CO₂ laser-assisted sintering of TiO₂ nanoparticles for transparent films," *J. Laser Appl.*, vol. 35, no. 1, Feb. 2023, doi: 10.2351/7.0000821.
- [29] W. M. Steen and J. Mazumder, *Laser Material Processing*. London: Springer London, 2010. doi: 10.1007/978-1-84996-062-5.
- [30] G. Sharma, S. K. Arya, and K. Singh, "Optical and thermal properties of glasses and glass-ceramics derived from agricultural wastes," *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 1, pp. 947–952, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.10.027.
- [31] J. A. Alonso, "Funcionamiento de las placas solares," 2025. Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/funcionamiento/>

- [32] “Solar cells—Operating principles, technology and system applications,” *Solar Energy*, vol. 28, no. 5, 1982, doi: 10.1016/0038-092x(82)90265-1.
- [33] B. J. Kim, J. S. Park, and M. S. Kim, “Laser sintering of carbon nanotubes for improved electrical conductivity,” *Applied Physics A*, vol. 111, no. 3, pp. 835–840, 2013, doi: 10.1007/s00339-013-7667-0.
- [34] C. J. Lee, J. Park, and J. A. Yu, “Structural and morphological characterization of carbon nanotubes,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 333, no. 1–2, pp. 40–44, 2001, doi: 10.1016/S0009-2614(00)01211-1.
- [35] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, N. W. M. Ritchie, J. H. J. Scott, and D. C. Joy, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. New York, NY: Springer New York, 2018. doi: 10.1007/978-1-4939-6676-9.
- [36] S. De, P. J. King, M. Lotya, A. O’Neill, and J. N. Coleman, “Flexible, transparent, conducting films of antimony-doped tin oxide nanoparticles and carbon nanotubes,” *ACS Nano*, vol. 4, no. 12, pp. 7064–7070, 2010, doi: 10.1021/nn102551y.
- [37] S.-T. Chiou, W.-C. Cheng, and W.-S. Lee, “Characterization methods of carbon nanotubes: a review,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 386, no. 1–2, pp. 460–467, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.msea.2004.08.012.
- [38] A. Cao, C. Xu, J. Liang, D. Wu, and B. Wei, “X-ray diffraction characterization on the alignment degree of carbon nanotubes,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 344, no. 1–2, pp. 13–17, Aug. 2001, doi: 10.1016/S0009-2614(01)00671-6.
- [39] P. J. F. Harris, *Carbon Nanotube Science: Synthesis, Properties and Applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [40] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and P. Avouris, *Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications*, vol. 80. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. doi: 10.1007/3-540-39947-X.
- [41] V. L. Kuznetsov, “Carbon nanotubes contain residual metal catalyst nanoparticles even after washing with nitric acid at elevated temperature,” *Carbon N. Y.*, vol. 45, no. 6, pp. 1242–1253, May 2007, doi: 10.1016/j.carbon.2007.01.021.
- [42] W. Xia, Y. Wang, E. Castillejos, W. Reschetilowski, and M. Muhler, “On the role of the residual iron growth catalyst in the gasification of multi-walled carbon nanotubes,” *Catal. Today*, vol. 186, no. 1, pp. 36–46, May 2012, doi: 10.1016/j.cattod.2011.08.016.

- [43] S. Nanot, A. Thompson, J. Lou, and J. Kono, "Optoelectronic properties of single-wall carbon nanotubes," in Handbook of Nanomaterials Properties," in *Handbook of Nanomaterials Properties*, Bhushan, B., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 105–145.
- [44] D. S. Hecht, L. Hu, and G. Irvin, "Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures," *Advanced Materials*, vol. 23, no. 13, pp. 1482–1513, Apr. 2011, doi: 10.1002/adma.201003188.
- [45] L. Hu, D. S. Hecht, and G. Grüner, "Percolation in Transparent and Conducting Carbon Nanotube Networks," *Nano Lett.*, vol. 4, no. 12, pp. 2513–2517, Dec. 2004, doi: 10.1021/nl048435y.
- [46] K. Akuzov, "Carbon Nanotube-Silicon Solar Cells," in *Nanostructured Solar Cells*, Narottam Das., 2017, pp. 133–152.
- [47] K. Parajuly and H. Wenzel, "Environmental impact of carbon nanotube synthesis," *J. Clean. Prod.*, vol. 151, pp. 272–285, May 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.045.

Apéndice A

Figura 11. *Formulación de la pasta conductora de SWCNTs*



Figura 12. *Medición de pH a la solución*



Figura 13. *Manejo de la sonda ultrasónica*



Figura 14. *Consistencia de la pasta de SWCNTs*

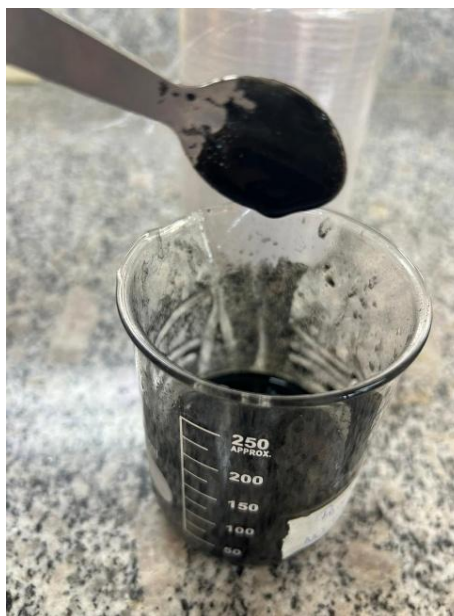


Figura 15. *Corte del EVA con el láser CO₂*

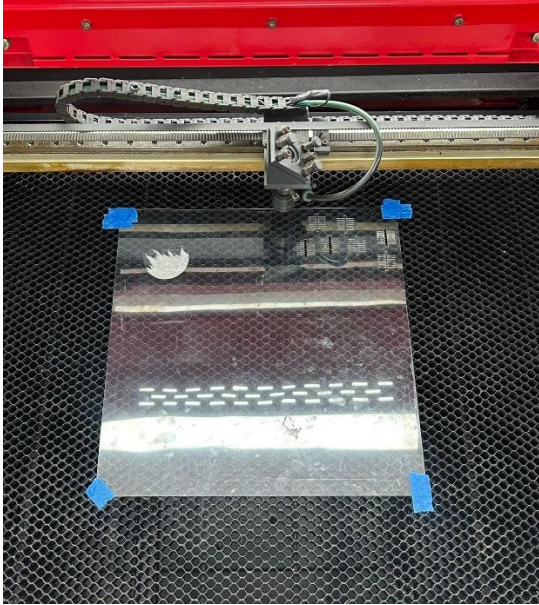


Figura 16. *Resultado de la máscara de EVA*



Figura 17. *Obleas de Silicio – Mascara de EVA*



Figura 18. *Resultado de la muestra aplicando doctor blade*

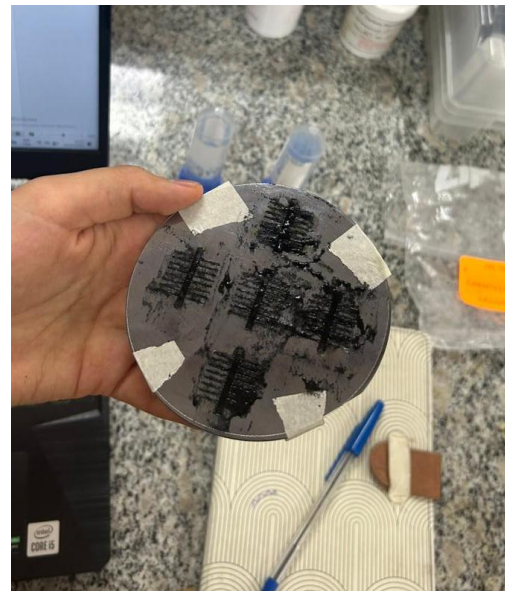


Figura 19. Resultado del sustrato oblea de Si + Pasta conductora de SWCNTs



Figura 20. Oblea de silicio con las 5 muestras ya sinterizadas por láser de CO₂

