



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

**SÍNTESIS Y EVALUACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO
CERÁMICO-POLIMÉRICO BASADO EN ALFA-ALÚMINA PARA SU
APLICACIÓN COMO REFLECTOR DIFUSO EN SISTEMAS HÍBRIDOS
SOLARES**

Para obtener el grado de
Doctor en Ciencias de los Materiales

PRESENTA

**Maestro en Ciencias de los Materiales
Miguel Ángel Ortega González**

Directores

Dr. Gustavo Urbano Reyes

Dr. Edgar Arturo Chávez Urbiola

Mineral de la reforma, Hgo., México, 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 15 de mayo de 2025

Número de control: ICB-D/767/2025
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial de la tesis titulada “SÍNTESIS Y EVALUACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO CERÁMICO-POLIMÉRICO BASADO EN ALFA-ALÚMINA PARA SU APLICACIÓN COMO REFLECTOR DIFUSO EN SISTEMAS HÍBRIDOS SOLARES.” realizado por el sustentante Miguel Ángel Ortega González con número de cuenta 415427 perteneciente al programa de Doctorado en Ciencias de los Materiales (tradicional), una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

El Comité Tutorial

Dr. Gustavo Urbano Reyes
Director de tesis

Dr. Felipe Legorreta García
Titular

Dr. Edgar Arturo Chávez Urbiola
Codirector

Dra. Marissa Vargas Ramírez
Suplente

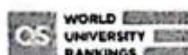
Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICB



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
dirección_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

GVRIBO

“Amor, Orden y Progreso”



2025



uaeh.edu.mx

A mi hijo Santi,
fuente constante de inspiración, alegría y motivo de esfuerzo;
a mi esposa y a mis padres,
por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

Agradecimientos

A Dios, por permitirme alcanzar esta meta y darme la fortaleza necesaria para concluir este camino.

A mi esposa por su apoyo incondicional, paciencia y confianza en cada etapa de mi formación. A mis padres y a toda mi familia, por acompañarme y alentarme siempre.

A los doctores Felipe Legorreta y Edgar Arturo Chávez, quienes han sido guías y mentores desde mis estudios de maestría. Su acompañamiento continuo, su exigencia académica y su ejemplo profesional han sido pilares fundamentales en mi desarrollo científico y personal. Mi más sincero reconocimiento por su apoyo, confianza y orientación a lo largo de estos años.

A los doctores Gustavo Urbano Reyes y Marissa Vargas Ramírez, por su valiosa asesoría, sus observaciones precisas y disposición constante para contribuir a mi formación durante el doctorado.

Al Ingeniero Alain Christian Beltrán, por su comprensión y apoyo durante este proceso, por brindarme las facilidades necesarias para cumplir con mis compromisos académicos y por su constante disposición para respaldar mi crecimiento profesional.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAETH) y al Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías (ICBI), por permitirme formar parte de su comunidad académica y proporcionarme el entorno necesario para desarrollar mi labor científica y profesional.

Finalmente, el autor expresa su sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado a través del Programa de Ciencia Básica, proyecto No. 282260, así como por la beca de doctorado que hizo posible la realización de los presentes estudios.

Contenido

Índice de Tablas	viii
Índice de Figuras	ix
ABSTRACT	1
RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	3
I. MARCO TEÓRICO	5
1.1 Principios básicos de la energía solar y su interacción con los materiales.....	5
1.2 Análisis de los sistemas híbridos desde la perspectiva de materiales.....	6
1.3 Caracterización avanzada de materiales reflectantes.	8
1.3.1 Propiedades ópticas.	10
1.3.2 Propiedades mecánicas y durabilidad.....	15
1.3.3 Conductividad térmica y estabilidad a altas temperaturas.....	18
1.4 Reflexión difusa: mecanismos y materiales implicados.....	18
1.5 Nuevos materiales y tratamientos superficiales para la mejora de la reflexión difusa.	19
1.6 Métodos de síntesis y aplicación del recubrimiento	21
1.7 Impacto de los materiales reflectantes en la eficiencia y costo del sistema solar.....	25
1.8 Innovaciones en materiales reflectantes para sistemas híbridos.	26
1.9 Materiales reflectantes en sistemas solares y energías complementarias.....	27
II. ANTECEDENTES	29
2.1 Evolución histórica de los materiales en sistemas solares.	29
2.2 Estudios de caso centrados en el uso de materiales reflectantes en sistemas solares...	30

2.3	Desafíos específicos de los materiales en el mercado de sistemas solares a nivel global y regional.....	31
2.4	Normativas y estándares de materiales para sistemas solares.	32
2.5	Influencia de factores ambientales en la selección de materiales reflectantes para sistemas solares.....	33
2.6	Estrategias de diseño de materiales reflectantes para diferentes entornos.	34
2.7	Enfoques multidisciplinarios en la investigación de materiales reflectantes.	35
2.8	Innovaciones y tendencias actuales en materiales reflectantes para la energía solar... ..	36
2.9	Evaluación económica de la implementación de nuevos materiales reflectantes en sistemas solares.....	36
2.10	Desafíos éticos y sociales en la producción y uso de materiales reflectantes para sistemas solares.	37
III.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	38
IV.	JUSTIFICACIÓN.....	39
V.	HIPÓTESIS.....	41
VI.	OBJETIVOS.....	42
6.1	Objetivo general.	42
6.2	Objetivos específicos.	42
VII.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
7.1	Precursos y sustrato.....	43
7.2	Tratamiento de limpieza.....	45
7.3	Síntesis del recubrimiento.....	46
7.4	Aplicación del recubrimiento	46
7.5	Caracterización del recubrimiento	48

7.5.1	Caracterización de materiales de referencia	48
7.5.2	Difracción de rayos X (XRD)	48
7.5.3	Reflectancia relativa difusa (ρd)	48
7.5.4	Espesor y rugosidad del recubrimiento.....	49
7.5.5	Dureza del recubrimiento (ASTM D3363)	49
7.5.6	Adherencia del recubrimiento (ASTM D3359)	50
7.5.7	Prueba de corrosión por niebla salina del recubrimiento.....	50
VIII.	RESULTADOS y DISCUSIÓN.....	51
8.1	Análisis del polvo precursor	51
8.2	Evaluación de los sustratos	54
8.3	Resultados de la síntesis y aplicación del recubrimiento.....	56
8.4	Caracterización del recubrimiento	57
IX.	CONCLUSIONES.....	62
X.	REFERENCIAS.....	64
XI.	ANEXOS	80

Índice de Tablas

Tabla 1. Análisis comparativo de propiedades ópticas fundamentales.	12
Tabla 2. Clasificación de técnicas de síntesis y aplicación de recubrimientos reflectantes, incluyendo sus principios operativos y funciones específicas.	21
Tabla 3. Precursores, sustratos y reactivos utilizados en la síntesis del recubrimiento.	44
Tabla 4. Valores difusos de sustrato de reflectancia relativa, espesor y rugosidad.	55
Tabla 5. Análisis cualitativo de las técnicas de aplicación del recubrimiento.	56
Tabla 6. Comparativa de resultados para reflectancia relativa difusa (ρ_d), dureza, adherencia, espesor (d) y rugosidad del recubrimiento cerámico.....	57

Índice de Figuras

Figura 1. Representación integral de los aspectos cruciales en sistemas híbridos solares	7
Figura 2. Diagrama de técnicas de caracterización en materiales reflectantes.....	9
Figura 3. Características mecánicas clave para materiales reflectantes.	15
Figura 4. Factores que influyen en la durabilidad de materiales reflectantes.	17
Figura 5. Componentes directas (unidireccionales) y difusas de la reflexión y transmisión al ser iluminada una película no homogénea.	18
Figura 6. Principio de la tecnología de deposición física de vapor de alta velocidad.	23
Figura 7. Proceso de deposición química de vapor.....	23
Figura 8. Esquema de la técnica de deposición electroforética (DAP) utilizada en la síntesis de películas delgadas de CuO dopadas con Fe.	24
Figura 9. Metodología general para el desarrollo del recubrimiento cerámico.	43
Figura 10. Tratamiento de limpieza del sustrato	45
Figura 11. Preparación de la mezcla sol-gel para la síntesis del recubrimiento cerámico.	46
Figura 12. Técnicas de aplicación por spray-coating y dip-coating para el recubrimiento.	47
Figura 13. Montaje del dispositivo de inmersión eléctrica para la técnica de Dip-coating.....	47
Figura 14. a) Patrón de difracción, b) Gráfico de reflectancia relativa difusa para alúmina.	51
Figura 15. a) Patrón de difracción, b) Gráfico de reflectancia relativa difusa para celestita.....	52
Figura 16. a) Patrón de difracción, b) Gráfico de reflectancia relativa difusa para dióxido de titanio.	53
Figura 17. Patrón de difracción de rayos X de las tres fases en el recubrimiento final.	59
Figura 18. Reflectancia relativa difusa del recubrimiento por inmersión antes de la corrosión salina (A) y después del ensayo de corrosión salina (B).....	60

Figura 19. a) reflectancia relativa difusa del recubrimiento por aspersión antes de la corrosión salina y b) después de la prueba de corrosión salina..... 61

ABSTRACT

ABSTRACT

Our research focused on developing a ceramic coating to optimize the performance of thermal solar systems (T), photovoltaic systems (PV), and their combined photovoltaic-thermal systems (PVT). After assessing various metals, we selected enameled low-carbon steel SAE 1008 as the best-suited substrate. Potential precursor powders, namely celestite, titanium dioxide, and alpha alumina, emerged as the top choice due to their impressive attributes. The ceramic coating was synthesized using the sol-gel process and applied through spraying and dip-coating. Coating characterization was conducted using UV–VIS, X-ray diffraction, and mechanical property assessments. Initial substrate cleaning significantly increased diffuse relative reflectance. Alpha alumina exhibited a reflectance of 93.71 %, titanium dioxide 98 %, and celestite 79.81 %. Dip-coating showed a reflectance of 76.07 % in the 400–800 nm range, decreasing to 74.70 % after the 24-h salt corrosion test. This method resulted in a coating with a 2H hardness rating, 4B adhesion, 95 % coverage, a thickness of 0.043 mm, and surface roughness metrics of $3.22 \mu\text{m(Ra)}$. In contrast, the spraying technique yielded coatings with a slightly better reflectance of 78.31 %, which diminished to 77.34 % after a 24-hour spray salt test. These coatings displayed a 4H hardness, 5B adhesion, full 100 % adhesion coverage, a thickness of 0.053 mm, and a roughness of $6.44 \mu\text{m (Ra)}$. Conclusively, our data suggests that the tailored ceramic coatings, especially the sprayable variant, have significant potential for large-scale applications, thereby playing a pivotal role in amplifying solar system performance.

RESUMEN

RESUMEN

Esta investigación se centró en el desarrollo de un recubrimiento cerámico para optimizar el rendimiento de los sistemas solares térmicos (T), los sistemas fotovoltaicos (PV) y los sistemas fotovoltaico-térmicos combinados (PVT). Tras evaluar diversos metales, se seleccionó el acero de bajo carbono esmaltado SAE 1008 como el sustrato más adecuado. Los polvos precursores potenciales fueron celestita, dióxido de titanio y alfa-alúmina, identificados como las mejores opciones debido a sus propiedades ópticas y mecánicas. El recubrimiento cerámico se sintetizó mediante el proceso sol-gel y se aplicó mediante pulverización y recubrimiento por inmersión (dip-coating). La caracterización de los recubrimientos se realizó mediante espectroscopía UV-VIS, difracción de rayos X y evaluaciones de propiedades mecánicas. La limpieza inicial del sustrato aumentó significativamente la reflectancia relativa difusa. La alfa-alúmina presentó una reflectancia del 93.71%, el dióxido de titanio del 98% y la celestita del 79.81%. El recubrimiento por inmersión mostró una reflectancia del 76.07% en el rango de 400–800 nm, disminuyendo a 74.70% después de la prueba de corrosión salina de 24 horas. Este método produjo un recubrimiento con una dureza de 2H, adhesión de 4B, una adherencia del 95%, un espesor de 0.043 mm y una rugosidad superficial de 3.22 μm (Ra). En contraste, la técnica de aspersión generó recubrimientos con una reflectancia ligeramente superior de 78.31 %, que se redujo a 77.34 % después de la prueba de corrosión salina de 24 horas. Estos recubrimientos presentaron una dureza de 4H, adhesión de 5B, adherencia 100 %, un espesor de 0.053 mm y una rugosidad de 6.44 μm (Ra). En conclusión, estos resultados indican que los recubrimientos cerámicos desarrollados, en especial la variante aplicada por aspersión, tienen un gran potencial para aplicaciones a gran escala, desempeñando un papel clave en la mejora del rendimiento de los sistemas solares.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La energía solar se ha convertido en una de las soluciones más prometedoras y sostenibles para satisfacer las necesidades energéticas mundiales en la incansable búsqueda de mitigar los efectos adversos del cambio climático y reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables (Hussain et al., 2017). El aprovechamiento de esta energía puede realizarse mediante sistemas solares fotovoltaicos, térmicos e híbridos. Sin embargo, el desempeño de estos sistemas depende de la eficiencia con la que captan y utilizan la radiación solar disponible (Makki et al., 2015). En este contexto, optimizar los componentes de estos sistemas para aumentar su eficiencia y rentabilidad es fundamental. El uso de reflectores difusos de refuerzo es una parte crucial para mejorar el rendimiento de los sistemas solares (Bharti et al., 2019).

Los reflectores difusos tienen la capacidad de redireccionar y dispersar la luz solar incidente de manera uniforme sobre las superficies fotovoltaicas o térmicas, aumentando así la cantidad de energía captada y convertida (Nostell, 2000). Su aplicación estratégica en sistemas solares híbridos puede mejorar significativamente la eficiencia global del sistema al optimizar la utilización de la radiación solar directa e indirecta (Baccoli et al., 2021).

Estos materiales deben tener excelentes propiedades ópticas y térmicas, además de ser duraderos y resistentes a condiciones ambientales extremas. Para garantizar la comercialización a gran escala de los sistemas solares mejorados, su producción también debe ser económicamente viable (Khan et al., 2023).

La creación y evaluación de materiales innovadores destinados a ser utilizados como reflectores difusos en sistemas solares híbridos es el objetivo principal de esta investigación doctoral. Para lograr este objetivo, se utilizará un enfoque multidisciplinario que integre conocimientos de ciencia de materiales, ingeniería óptica y energética, así como tecnologías de fabricación avanzadas.

El presente trabajo se estructurará en torno a varios aspectos fundamentales. En primer lugar, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre materiales reflectantes y su aplicación en sistemas solares, con el fin de identificar las lagunas de conocimiento y las áreas de oportunidad para la investigación. Después, se llevará a cabo la síntesis y caracterización de

INTRODUCCIÓN

materiales candidatos, empleando técnicas avanzadas de análisis y evaluación para determinar sus propiedades ópticas, térmicas y mecánicas.

Una vez sintetizados, los materiales serán sometidos a pruebas de rendimiento en condiciones simuladas de desgaste, con el fin de evaluar su eficacia como reflectores difusos en aplicaciones prácticas. Este proceso incluirá la optimización de parámetros clave, como la geometría superficial y la composición química, para maximizar el rendimiento del material en términos de reflectividad y durabilidad.

Por último, se realizará un análisis detallado de los aspectos económicos y ambientales relacionados con la producción y el despliegue de los materiales desarrollados. Se evaluará su viabilidad comercial y su potencial impacto en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el uso de recursos no renovables. Como parte del enfoque experimental, además del material desarrollado con base en alfa alúmina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), se incorporaron dióxido de titanio (TiO_2) y celestita (SrSO_4) como materiales de referencia para establecer comparaciones estructurales y ópticas. Ambos materiales se seleccionaron por sus propiedades reflectantes reportadas en literatura, lo que permitió contextualizar los resultados del recubrimiento propuesto frente a alternativas disponibles o potenciales.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo contribuir al avance de la tecnología solar mediante el desarrollo de materiales innovadores para reflectores difusos, con el potencial de mejorar significativamente la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas solares híbridos.

MARCO TEÓRICO

I. MARCO TEÓRICO

1.1 Principios básicos de la energía solar y su interacción con los materiales.

La energía solar, como fuente renovable del sol, puede convertirse en diversas formas útiles, como eléctrica o térmica. (Pandey et al., 2022). Los principios fundamentales implican la captura y conversión de la radiación solar en energía aprovechable mediante tecnologías específicas, como los paneles solares (Fahrenbruch & Bube, 2012). La interacción de esta con los materiales desempeña un papel crucial en el rendimiento y la eficiencia de los sistemas solares. En este contexto, los materiales reflectantes desempeñan un papel significativo en la optimización de la captura de energía solar, especialmente en sistemas fotovoltaicos (Tripanagnostopoulos, 2007). La reflexión no uniforme de la luz solar puede resultar en la pérdida de radiación útil, reduciendo así la eficiencia total de los sistemas solares (Baig et al., 2012). Por lo tanto, la selección cuidadosa de materiales y su aplicación estratégica son esenciales para maximizar la radiación solar y, en consecuencia, mejorar la eficiencia de los sistemas solares (Granqvist, 2003). Estos materiales incluyen revestimientos, superficies texturizadas, espejos y reflectores, entre otros, todos diseñados para dirigir la luz de manera eficiente y minimizar la pérdida de energía solar aprovechable (Tong & Tong, 2019). La investigación que continua en este ámbito busca desarrollar materiales más avanzados y técnicas innovadoras para garantizar un mejor rendimiento y durabilidad en la captura y conversión de la energía solar.

La radiación solar, compuesta por fotones, al alcanzar la superficie de un material, puede ser absorbida, reflejada o transmitida. En tecnologías solares, la elección de materiales es clave para maximizar la absorción y la reflexión de fotones y, por ende, mejorar la eficiencia de la conversión de energía (Granqvist & Niklasson, 2018; Seraphin, 1979). Los paneles solares fotovoltaicos, por ejemplo, emplean materiales semiconductores, como el silicio, que generan corriente eléctrica al ser expuestos a la luz solar (Razykov et al., 2011). El uso de recubrimientos antirreflectantes es esencial para minimizar la pérdida de luz solar en la superficie de los materiales, especialmente en paneles solares (Raut et al., 2011). Estos recubrimientos consisten en capas delgadas diseñadas para cancelar las ondas reflejadas, permitiendo que más luz penetre y se absorba eficientemente para la generación de energía (Kumaragurubaran & Anandhi, 2014). Además, superficies

MARCO TEÓRICO

texturizadas, espejos y reflectores son estrategias adicionales para maximizar la reflexión y que los sistemas solares puedan aprovechar esta radiación (Rönnelid et al., 2000; Schuster et al., 2022). La durabilidad y resistencia a la degradación de estos recubrimientos y materiales también son aspectos críticos, ya que los sistemas solares están expuestos a condiciones climáticas extremas durante períodos prolongados (Brogren et al., 2004). Por esta razón, algunas investigaciones en este ámbito se enfocan en desarrollar recubrimientos y materiales reflectantes más avanzados y duraderos que puedan resistir la radiación solar, la humedad y las temperaturas extremas (García-Segura et al., 2016). La aplicación inteligente de materiales y recubrimientos reflectantes en tecnologías solares busca minimizar la pérdida de radiación, mejorar la eficiencia y garantizar la durabilidad de los sistemas solares. La investigación se concentra en desarrollar materiales más avanzados y encontrar nuevas formas de implementar recubrimientos reflectantes para lograr una mejor captura y conversión de la energía solar (Mishra et al., 2016).

1.2 Análisis de los sistemas híbridos desde la perspectiva de materiales.

Los sistemas híbridos solares, se refieren a la combinación de dos o más fuentes de energía para generar electricidad o proveer servicios energéticos (Farhat et al., 2022). Estos sistemas pueden integrar fuentes renovables, como la solar o eólica, con fuentes convencionales o almacenamiento de energía (Manwell, 2004). El análisis de los sistemas híbridos desde la perspectiva de materiales es crucial para comprender cómo los diferentes componentes interactúan y cómo los materiales utilizados afectan la eficiencia y durabilidad del sistema (Yang & Yin, 2011). En el contexto de sistemas híbridos, la perspectiva de materiales se concentra en diversos aspectos cruciales como se muestra en la Figura 1.

Paneles solares. Los sistemas híbridos a menudo incluyen paneles solares combinados con otras fuentes de energía, como la eólica o la hidroeléctrica (Bajpai & Dash, 2012). El material predominante en los paneles solares es el silicio, pero también se utilizan materiales avanzados, como perovskitas o celdas solares orgánicas. La elección de materiales para los paneles solares es crucial para la eficiencia y la durabilidad (Petrović et al., 2015).

Baterías y almacenamiento. En sistemas híbridos, el almacenamiento de energía desempeña un papel vital. Las baterías de ion de litio son comunes, pero también se están explorando otros

MARCO TEÓRICO

materiales para electrodos y electrolitos que mejoren la eficiencia y la estabilidad de las baterías, así como en tecnologías emergentes como las baterías de estado sólido. (Xie et al., 2020).



Figura 1. Representación integral de los aspectos cruciales en sistemas híbridos solares

(Elaboración propia).

Componentes mecánicos. Los sistemas híbridos que incluyen energía eólica o hidroeléctrica tienen componentes mecánicos críticos, como turbinas eólicas o hidroeléctricas. Los materiales utilizados en estas estructuras deben ser robustos y duraderos, capaces de soportar condiciones climáticas extremas y ciclos repetitivos de carga y descarga (Mahato & Ghoshal, 2019).

Sistemas de gestión de energía. Los materiales utilizados en los sistemas de gestión de energía, como inversores y controladores, también son cruciales. Deben ser eficientes en la conversión de energía y ser capaces de gestionar eficazmente las diferentes fuentes de energía en el sistema híbrido (Olatomiwa et al., 2016).

Materiales para la infraestructura de red. La infraestructura de red que conecta y distribuye la energía generada por sistemas híbridos requiere materiales resistentes y eficientes. Esto incluye

MARCO TEÓRICO

cables, transformadores y otros componentes que deben ser seleccionados cuidadosamente para minimizar las pérdidas de energía y mantener la integridad del sistema (Nema et al., 2009).

Adaptabilidad y sostenibilidad. La selección de materiales debe considerar la adaptabilidad del sistema a diferentes condiciones geográficas y climáticas. Además, la sostenibilidad de los materiales, incluyendo la posibilidad de reciclaje al final de su vida útil, es un aspecto crítico para reducir el impacto ambiental (Khan et al., 2021).

Investigación en materiales avanzados. La investigación continua se centra en materiales avanzados, nanotecnología y nuevos compuestos para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas híbridos. Esto incluye el desarrollo de materiales que permitan una mejor captura, almacenamiento y distribución de la energía (Rowan et al., 2008).

1.3 Caracterización avanzada de materiales reflectantes.

La caracterización avanzada de materiales reflectantes implica un análisis integral que abarca desde propiedades ópticas hasta características estructurales y químicas, proporcionando una base sólida para el desarrollo y la optimización de tecnologías que aprovechan la reflexión de la luz solar (Sarver et al., 2013). Este enfoque es esencial para garantizar la eficiencia y la fiabilidad de estos materiales en diversas aplicaciones tecnológicas, con el objetivo de comprender a fondo sus características fundamentales (Sharma & Chandel, 2013). Se examinan las propiedades ópticas de los materiales, evaluando factores como la reflectividad, transmitancia y absorción de la luz en distintas longitudes de onda. Esta información es crucial para comprender cómo interactúan los materiales con la radiación solar en situaciones específicas, permitiendo así optimizar su diseño y selección para aplicaciones particulares, como sistemas fotovoltaicos y colectores solares (Heavens, 1960).

Además, la caracterización incluye la evaluación de la durabilidad y estabilidad térmica de los materiales reflectantes. La resistencia a condiciones ambientales adversas, cambios de temperatura y otros factores externos es esencial para garantizar un rendimiento sostenible a lo largo del tiempo (García-Segura et al., 2021). Esto se vuelve especialmente crítico en el caso de los materiales reflectantes utilizados en plantas termo solares, donde las condiciones extremas pueden desafiar la integridad de estos (García-Segura et al., 2016).

MARCO TEÓRICO

La microestructura y composición química de los materiales también son objeto de estudio en la caracterización avanzada. La comprensión detallada de la morfología y la composición a nivel microscópico permite identificar posibles imperfecciones, defectos o áreas susceptibles a deterioro, brindando información valiosa para mejorar la calidad y la durabilidad de los materiales reflectantes (Leng, 2013). Algunas técnicas de caracterización se representan en la Figura 2.

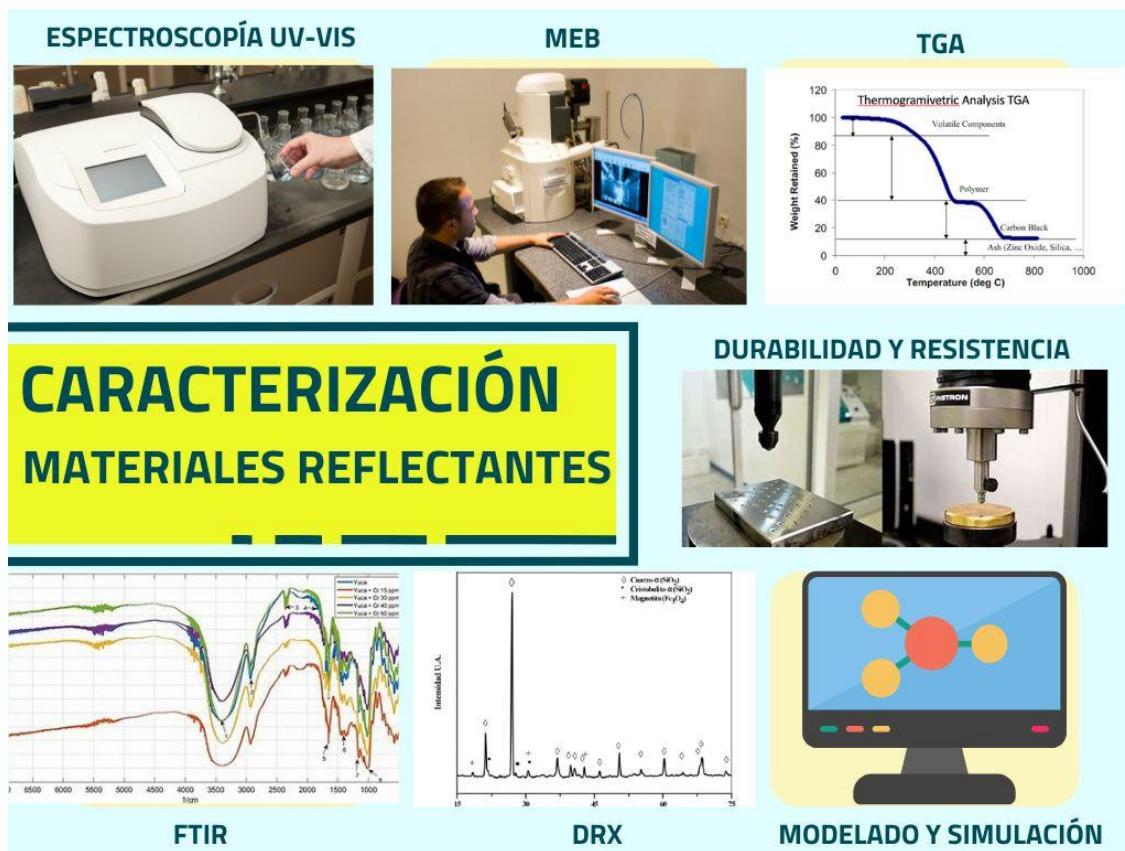


Figura 2. Diagrama de técnicas de caracterización en materiales reflectantes
(Elaboración propia).

Espectroscopia UV-VIS de reflectancia: Esta técnica implica iluminar un material con luz y medir la reflectancia en diferentes longitudes de onda. Permite obtener información detallada sobre la capacidad del material para reflejar la luz solar en diferentes rangos espectrales, ayudando a entender sus propiedades ópticas y su comportamiento frente a la radiación solar (Picollo et al., 2018).

MARCO TEÓRICO

Microscopía electrónica de barrido (MEB): Proporciona imágenes de alta resolución de la topografía y morfología de los materiales reflectantes. Permite identificar imperfecciones, evaluar la uniformidad de la superficie y detectar posibles defectos que podrían afectar la reflectividad y la durabilidad del material (Inkson, 2016).

Análisis termogravimétrico (ATG): Esta técnica mide cambios en la masa de un material a medida que se somete a variaciones de temperatura. Permite evaluar la estabilidad térmica y la resistencia del material a condiciones extremas, proporcionando información crítica sobre su comportamiento bajo fluctuaciones de temperatura, lo cual es esencial para aplicaciones en entornos solares (Prime et al., 2009).

Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR): Analiza la interacción de los materiales con la radiación infrarroja, proporcionando información sobre su composición química. Permite identificar enlaces químicos, funcionalidades y contaminantes que podrían influir en la reflectividad del material (Khan et al., 2018). Este análisis químico detallado contribuye a controlar la calidad de los materiales reflectantes y por lo tanto su durabilidad.

Análisis de difracción de rayos X (DRX): Revela la estructura cristalina de los materiales, permitiendo estudiar su ordenamiento atómico. Esta técnica es útil para comprender la influencia de la estructura cristalina en las propiedades ópticas y mecánicas de los materiales reflectantes. La información obtenida contribuye a optimizar el diseño y la selección de materiales para aplicaciones específicas (Shih, 2013).

Análisis de durabilidad y resistencia a la degradación: La durabilidad de los materiales reflectantes es esencial en entornos solares adversos. Pruebas de resistencia a la degradación, como la exposición prolongada a la radiación solar, la humedad y cambios de temperatura, son parte integral de la caracterización avanzada para evaluar la vida útil de los materiales (Carlsson et al., 2004).

1.3.1 Propiedades ópticas.

La comprensión de estas propiedades permite seleccionar los materiales adecuados para aplicaciones específicas y optimizar su diseño para mejorar la eficiencia en la captura y reflexión de la radiación solar. En este sentido, la investigación y caracterización de las propiedades ópticas de

MARCO TEÓRICO

los materiales reflectantes son fundamentales para el desarrollo exitoso de tecnologías solares y otras aplicaciones relacionadas (French et al., 2011).

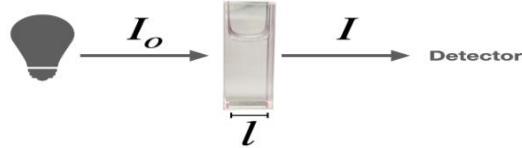
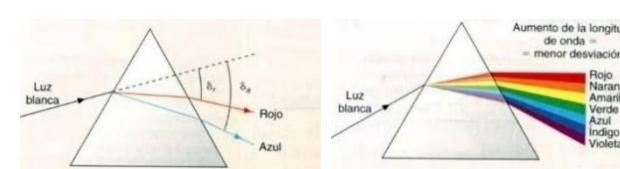
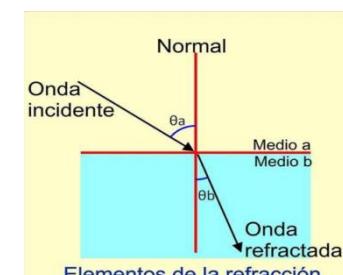
La Tabla 1 presenta una comparativa de propiedades ópticas, brindando una visión integral de su importancia y aplicación. Se muestran algunas propiedades, su definición, fórmula utilizada y una imagen representativa. Se observa que la absorción implica la conversión de la energía lumínica en energía térmica dentro del material. En materiales reflectantes, se busca minimizar la absorción para evitar pérdidas de energía y garantizar una reflectividad eficiente. Evaluar la absorción es esencial para comprender cómo el material maneja la energía solar incidente (Yu et al., 2012). La ecuación de Lambert-Beer, representa el comportamiento de la absorción. Donde z es el inverso del coeficiente de absorción x y también se conoce como la longitud de absorción L . Este parámetro mide la distancia z a la cual la intensidad $I(z)$ decae a $1/e$ de su valor inicial I_0 .

La dispersión se refiere a la separación de las diferentes longitudes de onda de la luz al interactuar con un material. Comprender la dispersión permite optimizar la respuesta espectral de los materiales reflectantes, especialmente en aplicaciones donde se busca una reflexión eficiente en rangos específicos del espectro solar (Diddams & Diels, 1996). La polarización es la orientación de las oscilaciones de los campos eléctricos y magnéticos. En el caso de materiales reflectantes, la polarización a la reflexión puede influir en la eficiencia de ciertos sistemas ópticos y mejorar la calidad de la reflectividad (Wolf, 2007).

En materiales reflectantes, el índice de refracción describe cómo la luz se refracta y refleja en la superficie del material. Un índice de refracción adecuado contribuye a una reflectividad óptima (Singh, 2002). La tabla 1 muestra la ecuación de la ley de Snell, n_a es el índice de refracción del medio a . Los índices de refracción dependen de cada sustancia. Para un par dado de sustancias transparentes y para una luz monocromática dada, la relación entre el seno del ángulo de incidencia (θ_1) y el seno del ángulo de refracción (θ_2) es constante (Cardenas, 2024).

MARCO TEÓRICO

Tabla 1. Análisis comparativo de propiedades ópticas fundamentales.

Propiedad	Definición	Fórmula/ Imagen	Referencia
Absorción	La onda electromagnética es atenuada al pasar por un medio.	Ley de Lambert-Beer: $z = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{I_0}{I(z)}$ 	(Salas, 2015)
Dispersión	Separación de la luz en diferentes longitudes de onda	Ley de Sellmeier $\eta(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}}$ 	(Álvarez González, 2015; Yang et al., 2022)
Refracción	Cambio de velocidad de la onda luminosa	Ley de Snell: $n_a = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$ 	(Cardenas, 2024)

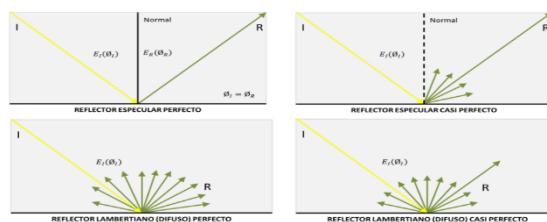
MARCO TEÓRICO

$$Rp = \frac{G_p}{G_{st}} \times R_{st}$$

Cambio de dirección de una

Reflectancia

onda

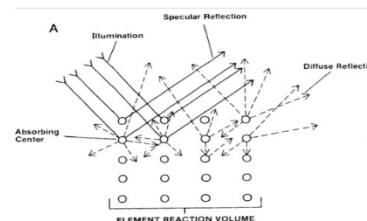


(Boyer et al., 2007; Pelaez-Martinez, 2017)

$$\rho_d(\lambda) = \frac{I_s(\lambda)}{I_r(\lambda)} \times R_r$$

Reflectancia
relativa di-
fusa (ρ_d)

Luz dispersada en múltiples di-
recciones

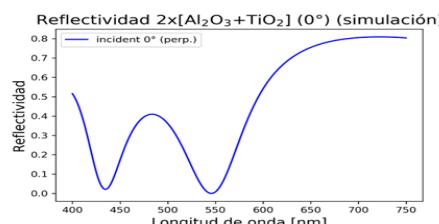


(Danielson, 1996)

$$p(y) = \frac{g_r(y)}{g_i(y)}$$

Reflectividad

La reflectividad es una medida
de la reflectancia.

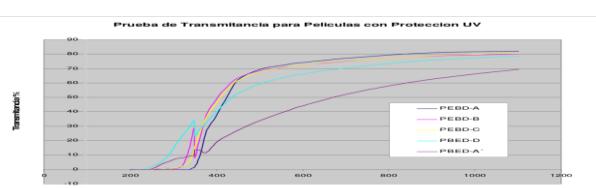


(Boyer et al., 2007)

$$\tau = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}}$$

Transmitan-
cia

Capacidad de un medio para
transmitir energía



(Aggarwal, 2004)

(Elaboración propia)

MARCO TEÓRICO

Por otro lado, la reflectancia, es una medida de la cantidad de luz reflejada por una superficie en relación con la cantidad de luz incidente que la golpea. Es una propiedad específica de la superficie y puede variar dependiendo de factores como el ángulo de incidencia de la luz, la longitud de onda de la luz y las características ópticas del material. La reflectancia también puede expresarse en términos absolutos (por ejemplo, porcentaje de luz reflejada) o en términos relativos (Hapke, 1981).

Además de la reflectancia specular (asociada a una reflexión en un ángulo definido), existe la reflectancia difusa, que se refiere a la luz dispersada en múltiples direcciones tras incidir sobre una superficie rugosa o granular (Lindberg, 1987). Esta propiedad es especialmente relevante en materiales cerámicos, ya que proporciona información sobre la textura superficial, el tamaño de partícula y la homogeneidad óptica del recubrimiento.

La reflectancia relativa difusa (ρd) se define como el cociente entre la intensidad de luz reflejada por la muestra (I_s) y la intensidad reflejada por un estándar blanco de referencia (I_r), multiplicado por el valor nominal de reflectividad del patrón (R_r), donde $\rho d(\lambda)$ representa la reflectancia relativa difusa en función de la longitud de onda λ , $I_s(\lambda)$ es la intensidad de luz reflejada por la muestra, $I_r(\lambda)$ es la intensidad reflejada por el estándar, y R_r es la reflectancia conocida del patrón, generalmente 98 % o 100 % (Danielson, 1996).

Esta relación permite expresar la reflectancia como un porcentaje normalizado en función de la longitud de onda, usualmente en el espectro visible o UV-VIS. La medición de ρd se realiza típicamente mediante espectroscopía UV-VIS, utilizando sondas de fibra óptica con geometría de 45°/0°, lo cual maximiza la detección de la componente difusa y reduce la interferencia de la reflectancia specular.

En términos complementarios, la reflectividad es la capacidad de un material para reflejar la luz incidente. Se expresa como un porcentaje y representa la fracción de luz reflejada en comparación con la luz incidente. Para materiales reflectantes, una alta reflectividad es deseada, ya que significa una mayor capacidad para redirigir la luz solar (Bortz & French, 1989). La reflectividad se puede calcular como $p(y) = gr(y) / gi(y)$ donde p es la longitud de onda de la luz, gr es la radiación reflejada y gi es la radiación incidente.

MARCO TEÓRICO

Finalmente, la transmitancia como se muestra en la Tabla 1, se refiere a la capacidad de un material para permitir el paso de la luz a través de él. En el contexto de materiales reflectantes, la transmitancia suele ser baja, ya que se busca maximizar la reflexión de la luz en lugar de su paso a través del material. Sin embargo, en algunas aplicaciones específicas, como sistemas ópticos complejos, la transmitancia puede ser un factor relevante (McCarthy, 1967). Es conocido que la transmitancia se mide como el cociente entre la intensidad luminosa de salida y la intensidad luminosa de entrada.

1.3.2 Propiedades mecánicas y durabilidad.

Las propiedades mecánicas y la durabilidad de los materiales reflectantes son aspectos críticos que afectan su rendimiento y longevidad en aplicaciones específicas, como en sistemas fotovoltaicos, colectores y reflectores solares (García-Segura et al., 2016). A continuación, se detalla cada uno de estos aspectos.

Propiedades mecánicas.

La figura 3 muestra las características mecánicas fundamentales que influyen en la selección y el rendimiento de los materiales reflectantes.



Figura 3. Características mecánicas clave para materiales reflectantes.

(Elaboración propia).

MARCO TEÓRICO

La resistencia a la tensión mide la capacidad de un material para resistir fuerzas de estiramiento. En materiales reflectantes, la resistencia a la tensión es vital, especialmente si están expuestos a condiciones climáticas adversas, ya que deben mantener su integridad estructural bajo tensiones mecánicas (Pavlina & Van Tyne, 2008).

La dureza, indica la resistencia de un material a la deformación permanente o al rayado. En entornos solares, donde puede haber partículas abrasivas en suspensión en el aire, la dureza es esencial para evitar daños en la superficie del material reflectante (Tabor, 2000).

Una propiedad mecánica importante es la adherencia, debido a que algunos materiales reflectantes pueden estar sujetos a condiciones ambientales adversas o a cambios de temperatura. La adherencia se refiere a la capacidad de un material para mantener una unión fuerte con otra superficie, ya sea del mismo material o de otro (Comyn, 2021).

La tenacidad evalúa la capacidad de un material para absorber energía antes de romperse. Esta propiedad es importante para prevenir fracturas o fallas catastróficas, especialmente en situaciones donde los materiales pueden estar sometidos a tensiones y deformaciones repetidas (Launey & Ritchie, 2009).

Finalmente, en materiales reflectantes, como espejos, recubrimientos o láminas reflectantes, a menudo necesitan cierta flexibilidad para adaptarse a cambios de temperatura y condiciones climáticas. La flexibilidad asegura que los materiales puedan soportar expansiones y contracciones térmicas sin sufrir daños (Zhang et al., 2021).

Durabilidad.

La durabilidad de los materiales reflectantes es una consideración crítica en aplicaciones donde están expuestos a condiciones ambientales adversas y a la intemperie. La figura 4 muestra una representación detallada de una serie de características relacionadas con la durabilidad, que incluyen la resistencia a la corrosión, la estabilidad térmica, la resistencia a la radiación UV y la estabilidad química.

MARCO TEÓRICO



Figura 4. Factores que influyen en la durabilidad de materiales reflectantes.
(Elaboración propia).

Los materiales reflectantes pueden estar expuestos a la intemperie y a condiciones ambientales que favorecen la corrosión. La resistencia a la corrosión es crucial para mantener la integridad estructural y la reflectividad a lo largo del tiempo (Schweitzer, 2021).

La estabilidad térmica, es esencial en aplicaciones solares, donde los materiales pueden experimentar fluctuaciones extremas de temperatura. La capacidad de resistir cambios térmicos evita deformaciones y daños que podrían afectar la eficiencia reflectante (Ferrer et al., 2015).

La radiación ultravioleta del sol puede degradar la calidad de los materiales a lo largo del tiempo. La resistencia a la radiación UV es vital para evitar la pérdida de reflectividad y el deterioro de las propiedades mecánicas (Rus et al., 2017).

Además, algunas condiciones ambientales pueden involucrar exposición a productos químicos que podrían afectar los materiales. La estabilidad química es esencial para prevenir reacciones no deseadas y garantizar la integridad a largo plazo (Darband et al., 2020).

MARCO TEÓRICO

1.3.3 Conductividad térmica y estabilidad a altas temperaturas.

La evaluación de la conductividad térmica y la estabilidad a altas temperaturas son esenciales para seleccionar y diseñar materiales reflectantes que puedan mantener su rendimiento y durabilidad en entornos solares desafiantes. La investigación y la caracterización avanzada de estos aspectos son fundamentales en el desarrollo de tecnologías solares eficientes y fiables (Li & Wu, 2016).

1.4 Reflexión difusa: mecanismos y materiales implicados.

La reflexión difusa es un fenómeno óptico que ocurre cuando la luz incidente se refleja en muchas direcciones diferentes después de interactuar con una superficie rugosa o irregular. A diferencia de la reflexión especular, donde la luz se refleja en una dirección específica según la ley de reflexión. (Kortüm, 2012). Este fenómeno es fundamental en la caracterización de materiales reflectantes, ya que afecta la distribución de la luz reflejada y, por lo tanto, la apariencia y el rendimiento de la superficie (van Ginneken et al., 1998).

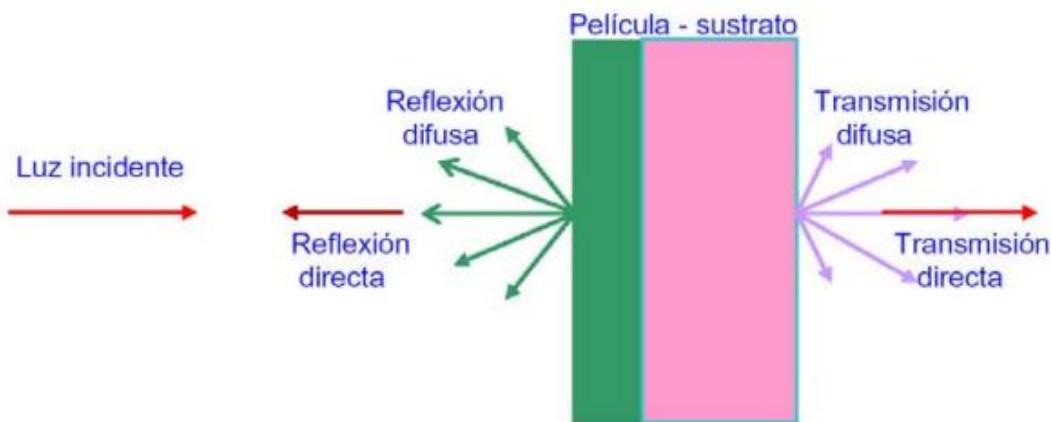


Figura 5. Componentes directas (unidireccionales) y difusas de la reflexión y transmisión al ser iluminada una película no homogénea.
(Tomado de Vargas, 2011)

La Figura 5 muestra cómo en materiales no homogéneos, se presentan componentes difusos debido a los procesos de dispersión de la luz al interaccionar con los gránulos de materia.

MARCO TEÓRICO

Las microestructuras en la superficie del material reflejan la luz en varias direcciones. Cada microestructura contribuye a la reflexión difusa, y la suma de estas reflexiones dispersas da como resultado la apariencia difusa de la luz reflejada (Tawfick et al., 2012).

Materiales implicados:

- a) Pinturas reflectantes: diversas pinturas reflectantes están diseñadas para tener superficies microestructuradas que favorecen la reflexión difusa. Esto puede aumentar la visibilidad de la luz reflejada y reducir el deslumbramiento (Uemoto et al., 2010).
- b) Recubrimientos anti-reflectantes: incorporan microestructuras diseñadas para reducir la reflexión especular y fomentar la reflexión difusa. Esto es común en aplicaciones ópticas donde se busca minimizar los reflejos no deseados (Sarkin et al., 2020).
- c) Superficies texturizadas: materiales con superficies texturizadas, como ciertos tipos de vidrio o películas plásticas, pueden favorecer la reflexión difusa al presentar irregularidades microscópicas en su estructura (Stephens & Cody, 1977).

1.5 Nuevos materiales y tratamientos superficiales para la mejora de la reflexión difusa.

La búsqueda de mejorar la reflexión difusa en materiales reflectantes implica explorar nuevas fronteras en la ingeniería de materiales y la óptica. Esta mejora se puede lograr mediante la introducción de innovadores materiales y técnicas de tratamiento superficial que afecten la microestructura y los mecanismos de reflexión de la luz (Dalapati et al., 2018).

Dentro de esta exploración, destacan tres áreas clave de desarrollo:

Las nanoestructuras, como nanopartículas o nanorrelieves, representan una vanguardia en esta búsqueda. La implementación de estas estructuras a escala nanométrica en la superficie de los materiales reflectantes permite una manipulación precisa de la reflexión de la luz, mejorando significativamente la dispersión lumínica y fomentando así una reflexión difusa más eficiente (Kang et al., 2015).

Los nanocomuestos ofrecen otra perspectiva. Al incorporar nanomateriales en la composición de los materiales reflectantes, se alteran sus propiedades ópticas de manera notable. Por ejemplo, la inclusión de nanopartículas en una pintura reflectante puede modificar la estructura superficial, lo que repercute en la capacidad de reflexión difusa del material (Veloso et al., 2021).

MARCO TEÓRICO

Por último, los materiales fotónicos, diseñados específicamente para manipular la interacción de la luz, representan una opción. Estos materiales poseen propiedades ópticas particulares que pueden ajustarse para influir en la dispersión de la luz incidente, ofreciendo así nuevas oportunidades para mejorar la reflexión difusa en materiales reflectantes (Rowell, 1986).

El mejoramiento de la reflexión difusa también involucra el desarrollo de tratamientos superficiales innovadores. Estos tratamientos implican técnicas especializadas que modifican la topografía y la composición de la superficie del material, permitiendo una manipulación precisa de la reflexión de la luz. Entre las técnicas más destacadas se encuentran:

Tratamientos superficiales.

La texturización láser representa uno de los enfoques más utilizados para mejorar la reflexión difusa en materiales, especialmente metales y sustratos sólidos. Mediante la aplicación de pulsos láser controlados, se pueden crear microtexturas específicas que favorecen una dispersión uniforme de la luz incidente (Etsion 2005).

Los recubrimientos nanoestructurados son otra estrategia efectiva para mejorar la dispersión de la luz en materiales reflectantes. Al aplicar capas delgadas de materiales específicos sobre la superficie del material base, se puede influir en la reflexión de manera controlada, optimizando así su capacidad de reflexión difusa (Gurrappa & Binder, 2008).

La fotolitografía es una técnica avanzada que utiliza patrones de luz para alterar la estructura superficial del material a nivel microscópico. Esta técnica puede emplearse para crear superficies texturizadas que mejoren la reflexión difusa de manera precisa y reproducible (Kim et al., 2020).

Por último, los tratamientos químicos ofrecen una opción versátil para modificar la composición superficial de los materiales reflectantes. Al aplicar tratamientos químicos adecuados, se pueden crear capas micro o nanotexturizadas que promuevan una reflexión difusa más eficiente, ampliando así las posibilidades de optimización de estos materiales (Vishnoi et al., 2021).

MARCO TEÓRICO

1.6 Métodos de síntesis y aplicación del recubrimiento

Los métodos de síntesis y los procesos de fabricación avanzados para materiales reflectantes son fundamentales para la creación de superficies con propiedades ópticas, mecánicas y de durabilidad específicas. La elección de la técnica depende de las características deseadas y de la aplicación final del material (Pérez, 2013; Sweeney, 2002). La Tabla 2, presenta una clasificación de las técnicas más utilizadas, diferenciando entre métodos de síntesis (formación del material) y métodos de aplicación (deposición del recubrimiento).

Tabla 2. Clasificación de técnicas de síntesis y aplicación de recubrimientos reflectantes, incluyendo sus principios operativos y funciones específicas.

Técnica o proceso	Tipo de método	Observaciones principales
Sol-gel	Síntesis y aplicación	Permite formar materiales mediante hidrólisis y condensación controladas
Deposición física de vapor (PVD)	Síntesis y aplicación	Material evaporado en vacío y depositado sobre el sustrato
Deposición química de vapor (CVD)	Síntesis y aplicación	Reacción química de gases sobre la superficie del sustrato
Dip-coating (inmersión)	Aplicación	Inmersión del sustrato en la suspensión y extracción controlada
Spin-coating (rotación)	Aplicación	Centrifugado del sustrato para generar una capa uniforme
Spray-coating (aspersión)	Aplicación (usada en este trabajo)	Pulverización neumática para aplicación homogénea en superficies amplias

(elaboración propia)

En este trabajo se utilizó el método de síntesis sol-gel, combinado con dos técnicas de aplicación distintas: dip-coating (inmersión) y spray-coating (aspersión). Estas técnicas permiten aplicar recubrimientos cerámico-poliméricos sobre sustratos metálicos, ofreciendo ventajas como control de espesor, compatibilidad con superficies complejas, y adaptabilidad a procesos industriales.

MARCO TEÓRICO

En cuanto al método sol-gel, es una de las técnicas más versátiles y difundidas en la actualidad. Es una ruta de síntesis química que permite transformar soluciones precursoras en materiales sólidos, a través de reacciones de hidrólisis y condensación de compuestos metálicos (como alcoóxidos). Este método es ampliamente utilizado para la obtención de películas delgadas, recubrimientos y nanopartículas, con control preciso de la composición química, la morfología y el grosor de capa. Una de sus principales ventajas es que puede llevarse a cabo a bajas temperaturas, lo que permite aplicar recubrimientos sobre sustratos sensibles al calor, como algunos metales o vidrios especiales (Brinker & Scherer, 1990). Este método es compatible con distintos métodos de aplicación, como dip-coating, spin-coating y spray-coating, lo que facilita su uso tanto en laboratorio como en contextos industriales. Su versatilidad ha posicionado al método sol-gel como una alternativa coste-eficiente, escalable y adaptable a diversas necesidades en la industria solar (Hench & West, 1990; Kumar et al., 2024).

La técnica de spray-coating, empleada en la presente investigación, se basa en la pulverización de la suspensión sol-gel mediante una pistola neumática de aspersión, permitiendo la formación de una película homogénea sobre el sustrato (Jacobs et al., 2021). Esta técnica destaca por su versatilidad, bajo costo y escalabilidad, lo que la hace especialmente atractiva para aplicaciones en sistemas solares híbridos donde se requieren superficies reflectantes con buena adherencia, resistencia mecánica y comportamiento estable frente a la intemperie.

Dip-coating es una técnica de aplicación de recubrimientos que consiste en sumergir un sustrato dentro de una solución o suspensión líquida y luego retirarlo a una velocidad controlada (Jebali et al., 2024). Durante la extracción, se forma una película líquida sobre la superficie del sustrato, la cual se solidifica posteriormente por evaporación del solvente y/o tratamiento térmico, formando un recubrimiento sólido uniforme.

Deposición física de vapor (PVD): En este método, los materiales se evaporan en forma de vapor y se depositan sobre la superficie del sustrato para formar una capa delgada. Puede incluir técnicas como la evaporación térmica, la pulverización catódica y la deposición por haz de electrones. Se utiliza para crear capas reflectantes en espejos y recubrimientos

MARCO TEÓRICO

reflectantes en superficies diversas. Permite un control preciso del grosor y la composición de las capas (Bejarano, 2000).

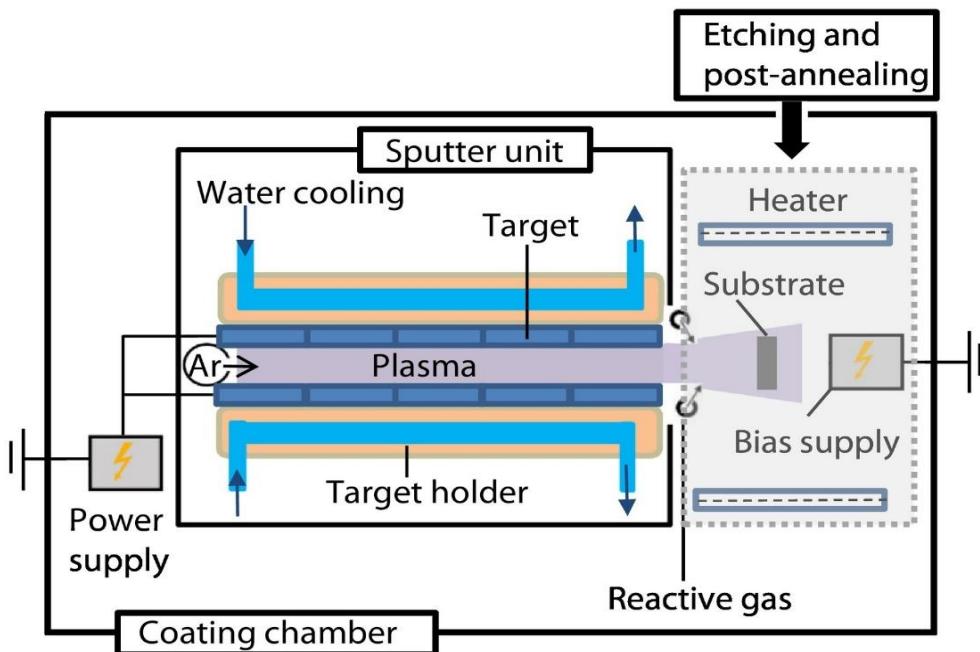


Figura 6. Principio de la tecnología de deposición física de vapor de alta velocidad.
Tomado de (Bobzin et al., 2019).

La Figura 6, muestra una descripción detallada de la tecnología de deposición física de vapor de alta velocidad en un diagrama esquemático de la configuración del dispositivo.

Deposición química de vapor (CVD): en CVD, reactivos químicos gaseosos reaccionan en la superficie del sustrato para formar una capa delgada. Puede lograr recubrimientos uniformes y complejos. Se utiliza para sintetizar recubrimientos reflectantes en espejos y componentes de sistemas ópticos (Creighton & Ho, 2001).

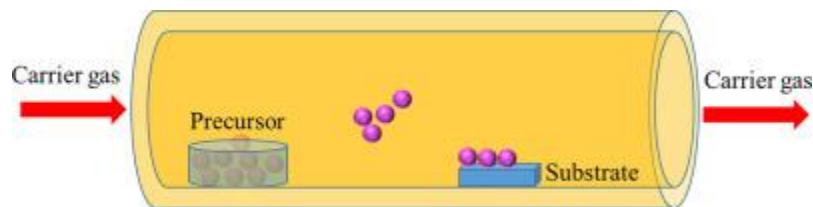


Figura 7. Proceso de deposición química de vapor.
Tomado de Mittal et al., 2021

MARCO TEÓRICO

La Figura 7 representa la técnica CVD en la que un material sólido se deposita a partir de un vapor mediante alguna reacción química que ocurre en o en las proximidades de una superficie de sustrato normalmente calentada. CVD es un ejemplo de reacción vapor-sólido. El proceso se utiliza a menudo en la industria de los semiconductores para producir películas delgadas (Mittal et al., 2021).

Deposición electroforética: partículas cargadas coloidalmente son movidas hacia un electrodo mediante la aplicación de un campo eléctrico, formando una capa sobre el sustrato. Se utiliza para crear recubrimientos reflectantes y anti-reflejo en diversos sustratos (Castro et al., 2000).

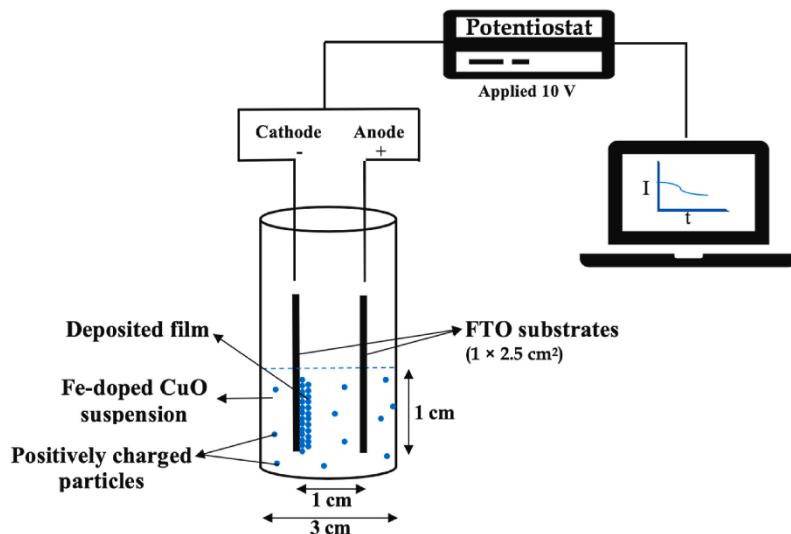


Figura 8. Esquema de la técnica de deposición electroforética (DAP) utilizada en la síntesis de películas delgadas de CuO dopadas con Fe.
(Tomado de Al-Shuayfani et al., 2021)

La Figura 8, representa la síntesis de películas delgadas de CuO dopadas con Fe y no dopadas.

Métodos de autoensamblaje: se basan en la capacidad de ciertos materiales para organizarse espontáneamente en patrones específicos. Puede incluir autoensamblaje molecular y de bloques. Se emplea para crear nanoestructuras y patrones que mejoren la reflexión difusa y controlen las propiedades ópticas (Whitesides et al., 2005).

MARCO TEÓRICO

1.7 Impacto de los materiales reflectantes en la eficiencia y costo del sistema solar.

La elección de materiales reflectantes influye directamente en la eficiencia de la captura y conversión de la radiación solar, así como en los costos asociados a la fabricación, instalación y mantenimiento de los sistemas (Green & Bremner, 2017). A continuación, se mencionan algunas características relacionadas directamente con la eficiencia del sistema solar:

Captura de radiación solar, reflexión difusa, durabilidad y estabilidad térmica, materiales resistentes a condiciones adversas, propiedades ópticas y espectrales, afinidad con el espectro solar e innovaciones en nanoestructuras (Dada & Popoola, 2023).

Mientras que los costos del sistema están directamente relacionados con la selección de materiales reflectantes asequibles y de fácil disponibilidad (Sandoval-Ruiz, 2018).

Procesos de fabricación eficientes: La implementación de métodos avanzados, como deposición física o química de vapor y procesos de autoensamblaje, puede influir en los costos de fabricación al mejorar la eficiencia de los procesos (Marzal Álvaro, 2023).

Durabilidad y mantenimiento: Los materiales reflectantes duraderos y resistentes pueden reducir los costos asociados con el mantenimiento y la sustitución frecuente de componentes del sistema (Nieves, 2011).

Eficiencia operativa a largo plazo: los materiales reflectantes que conservan su eficacia con el paso del tiempo ayudan a disminuir los gastos operativos en el largo plazo al necesitar menos mantenimiento y sustituciones (Akadiri et al., 2012).

Tendencias innovadoras en recubrimientos: La investigación en recubrimientos reflectantes innovadores puede llevar a la adopción de materiales más eficientes y rentables a medida que evolucionan las tecnologías (Wijewardane & Goswami, 2012).

La optimización de propiedades mecánicas y térmicas desempeña un papel crucial en estas estrategias avanzadas. La selección cuidadosa de materiales se orienta a mantener su eficiencia a lo largo del tiempo, garantizando durabilidad y resistencia ante condiciones ambientales adversas. Además, conserva un rendimiento óptimo en situaciones de temperaturas elevadas, comunes en aplicaciones solares y de concentración de energía (Zarmai et al., 2016). La integración de nanoestructuras y la gestión precisa de las propiedades térmicas

MARCO TEÓRICO

contribuyen a mejorar la transferencia eficiente de calor y potencian de manera significativa el rendimiento global en sistemas de energía termosolar (Paul et al., 2022).

Estas estrategias están intrínsecamente vinculadas a la sostenibilidad y la economía. La elección de materiales respetuosos con el medio ambiente y procesos de producción que minimizan la huella ecológica refleja el compromiso con la sostenibilidad (Cervera-Ferri & Luz Ureña, 2017). Además, la eficiencia en el uso de recursos y la consideración de aspectos económicos contribuyen a la viabilidad económica de la implementación de estas estrategias en la fabricación y procesamiento de materiales reflectantes (Lecca Díaz & Prado Canahuire, 2019).

1.8 Innovaciones en materiales reflectantes para sistemas híbridos.

Representa un análisis en profundidad de las últimas tendencias y avances en el diseño y aplicación de materiales que desempeñan un papel clave en la eficiencia y rendimiento de sistemas de energía híbridos (Py et al., 2013). Este ámbito de investigación abarca diversas disciplinas, desde la nanotecnología hasta la ingeniería de materiales, con el objetivo de mejorar la captación y utilización de energía de fuentes solares y otras fuentes renovables (Serrano et al., 2009).

La investigación se centra en las propiedades ópticas de los materiales reflectantes, buscando la capacidad de reflejar eficientemente la luz solar y adaptarse a condiciones variables (Tong et al., 2021). Las innovaciones en nanomateriales y revestimientos avanzados permiten desarrollar superficies reflectantes que pueden ajustar su capacidad de reflexión según la intensidad y ángulo de la radiación solar, optimizando así la captura de energía en diferentes situaciones climáticas y geográficas (Ziaeemehr et al., 2023).

El análisis se extiende hacia la búsqueda de materiales más duraderos y resistentes al desgaste, considerando los factores ambientales y climáticos a los que estos materiales estarán expuestos a lo largo de su vida útil. Innovaciones en la resistencia a la corrosión, degradación y abrasión son fundamentales para garantizar la longevidad y la eficiencia sostenida de los sistemas híbridos (Aljibori et al., 2023).

Además, se exploran tecnologías emergentes como materiales fotónicos, que pueden manipular la luz de manera específica para mejorar la absorción y reflexión en distintas

MARCO TEÓRICO

longitudes de onda. Estos avances abren la puerta a una mayor eficiencia en la conversión de energía solar y en la captación de energía de fuentes complementarias, como la termosolar (Zhou et al., 2018).

La interdisciplinariedad es un aspecto destacado en este tema, ya que se investigan sinergias entre materiales reflectantes y otros componentes de sistemas híbridos, como celdas fotovoltaicas y sistemas de almacenamiento de energía. La integración de estos elementos con materiales reflectantes avanzados puede resultar en soluciones más eficientes y versátiles que optimizan la generación y almacenamiento de energía (Sommese et al., 2023).

El análisis de las innovaciones en materiales reflectantes para sistemas híbridos no se limita únicamente a la perspectiva técnica, sino que también aborda aspectos económicos y sociales. Se evalúan los costos asociados con la implementación de estos nuevos materiales, así como los posibles impactos en el empleo y en la aceptación social de estas tecnologías (Geels et al., 2018).

1.9 Materiales reflectantes en sistemas solares y energías complementarias

Es un ámbito de investigación y desarrollo que se adentra de manera profunda en la sinergia entre tecnologías solares y otras formas de generación de energía. Este enfoque busca maximizar la eficiencia, la resiliencia y la sostenibilidad de los sistemas energéticos al combinar la captación de energía solar con otras fuentes complementarias (Temiz & Dincer, 2021).

Se investiga la capacidad de los materiales reflectantes para mejorar la eficiencia de los sistemas solares al integrarse con tecnologías fotovoltaicas y/o térmicas (Chow et al., 2012). Este enfoque implica reflejar la luz solar hacia las celdas fotovoltaicas o colectores solares y ajustar dinámicamente la reflexión para adaptarse a las condiciones cambiantes de la radiación solar (Meddeb et al., 2022). La combinación de materiales reflectantes avanzados con sistemas solares puede resultar en un aumento significativo en la generación de energía, especialmente en áreas con variabilidad climática (Mussard, 2017).

La integración con sistemas termosolares representa otro aspecto crucial de esta temática. La capacidad de los materiales reflectantes para concentrar la radiación solar y dirigirla hacia colectores térmicos puede mejorar la eficiencia en la generación de calor, que a su

MARCO TEÓRICO

vez puede utilizarse para impulsar procesos industriales o incluso generar electricidad mediante ciclos termodinámicos avanzados (Kalogirou, 2004).

El análisis se extiende hacia la integración con otras fuentes de energía, como la eólica o la hidroeléctrica. Aquí, la capacidad de los materiales reflectantes para mejorar la eficiencia de la generación solar puede contribuir a la estabilidad de la red, compensando las variaciones en la producción de otras fuentes renovables (Oyekale et al., 2020). La combinación de tecnologías puede resultar en sistemas más equilibrados y capaces de generar energía de manera continua y confiable.

La adaptabilidad de los materiales reflectantes también se examina en el contexto de la generación distribuida y los sistemas de almacenamiento de energía. La capacidad de ajustar la reflexión en función de las necesidades de la red eléctrica y de almacenar el excedente de energía en momentos de alta producción solar contribuye a la flexibilidad y estabilidad de los sistemas híbridos (Mahesh & Sandhu, 2015). Desde una perspectiva ambiental, se evalúan los impactos de la integración de materiales reflectantes en sistemas solares con otras fuentes de energía (Tsoutsos et al., 2005). Esto incluye el análisis de la huella de carbono de la producción y la disposición final de estos materiales, así como la evaluación de su contribución global a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con sistemas energéticos convencionales (Peng et al., 2013).

En términos económicos, se investiga la viabilidad y rentabilidad de esta integración. Los costos asociados con la implementación de materiales reflectantes se comparan con los beneficios derivados de la mejora en la eficiencia y la reducción de la dependencia de fuentes de energía convencionales (Omer, 2008).

ANTECEDENTES

II. ANTECEDENTES

El siguiente capítulo describe los sistemas solares y su impacto como una fuente de energía sostenible y prometedora en la búsqueda de soluciones para mitigar los desafíos energéticos globales y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. En este contexto, la investigación y desarrollo de materiales reflectantes juegan un papel fundamental en la optimización del rendimiento y la eficiencia de estos sistemas, así como en la reducción de los costos asociados.

2.1 Evolución histórica de los materiales en sistemas solares.

La evolución histórica de los materiales en los sistemas solares fotovoltaicos, térmicos e híbridos está estrechamente relacionada con el desarrollo de la energía solar como fuente viable de energía (Chow, 2018).

En los sistemas fotovoltaicos, los materiales utilizados para captar y convertir la luz solar en electricidad han experimentado importantes mejoras desde la invención de la celda solar en la década de 1950 (Mohammad & Mahjabeen, 2023). Las primeras celdas solares estaban hechas de silicio y, con el tiempo, la pureza y la eficiencia del silicio han mejorado, dando lugar a celdas solares más eficientes (Ushasree & Bora, 2019). Además, se están investigando y desarrollando nuevos materiales, como el teluro de cadmio, el seleniuro de cobre, indio y galio y los materiales basados en la perovskita, para mejorar la eficiencia de las células solares (Kettle et al., 2022).

En los sistemas solares térmicos, los materiales utilizados para absorber y transferir calor también han evolucionado con el tiempo. Los primeros sistemas solares térmicos utilizaban materiales básicos como placas de metal negro para absorber el calor (Hottel & Woertz, 1942). Los sistemas solares térmicos modernos utilizan revestimientos selectivos que absorben una gama más amplia de longitudes de onda y transfieren el calor de forma más eficiente (Liu et al., 2021). Además, se están desarrollando nuevos materiales como el grafito, los nanotubos de carbono y los aerogeles para mejorar la eficiencia y la funcionalidad de los sistemas térmicos solares (Yashim et al., 2021).

Los materiales utilizados en los sistemas híbridos varían en función del diseño específico del sistema, pero generalmente son una combinación de los materiales utilizados en los

ANTECEDENTES

sistemas fotovoltaicos y térmicos (Samykano, 2023). Por ejemplo, los sistemas solares híbridos pueden utilizar paneles solares fabricados con materiales avanzados de silicio con un colector térmico adosado para la transferencia de calor (Tyagi et al., 2012).

2.2 Estudios de caso centrados en el uso de materiales reflectantes en sistemas solares.

Estos estudios muestran cómo estos materiales pueden mejorar la eficiencia y la rentabilidad de los sistemas, abordar desafíos específicos asociados con la captura y conversión de energía solar, reducir costos y mitigar el impacto ambiental (Dalapati et al., 2023). Estos estudios son importantes para la toma de decisiones de diseño, inversión y políticas relacionadas con la implementación de sistemas solares (Ozorhon et al., 2018).

Eficiencia energética mejorada: Los materiales reflectantes se utilizan para mejorar la captura de la radiación solar incidente, lo que aumenta la eficiencia global del sistema. Estos estudios de caso analizan cómo diferentes tipos de materiales reflectantes, como láminas metálicas, recubrimientos ópticos y superficies especulares, pueden aumentar la cantidad de energía solar aprovechable (Alzahrani et al., 2021).

Reducción de costos: Los materiales reflectantes pueden ayudar a reducir los costos de instalación y operación de los sistemas solares al aumentar la producción de energía sin necesidad de aumentar significativamente el tamaño del sistema. Estos estudios de caso evalúan el impacto económico de la implementación de materiales reflectantes en términos de retorno de la inversión y costos de ciclo de vida (Parida et al., 2011).

Adaptabilidad a diferentes entornos: Los estudios de caso también destacan cómo los materiales reflectantes pueden adaptarse a una variedad de condiciones ambientales y geográficas. Esto incluye la optimización de la orientación y el ángulo de los reflectores para maximizar la captura de radiación solar en diferentes latitudes y climas (Agrawal et al., 2022).

Integración con tecnologías existentes: Los sistemas solares suelen integrar componentes fotovoltaicos y térmicos, y los materiales reflectantes deben ser compatibles con estas tecnologías existentes. Los estudios de caso exploran cómo los materiales reflectantes pueden integrarse de manera efectiva con paneles solares, colectores térmicos y otros componentes del sistema para maximizar su rendimiento (Chow, 2018).

ANTECEDENTES

Impacto ambiental: Los estudios de caso analizan el impacto ambiental de la implementación de materiales reflectantes en términos de reducción de emisiones de carbono, consumo de recursos naturales y otros indicadores ambientales relevantes (Giljum et al., 2011).

2.3 Desafíos específicos de los materiales en el mercado de sistemas solares a nivel global y regional.

A nivel global, los sistemas solares enfrentan desafíos técnicos, económicos y ambientales. En términos técnicos, la eficiencia y durabilidad de los paneles solares son cruciales (Khan & Arsalan, 2016). Los materiales deben resistir condiciones extremas y mantener una alta eficiencia energética a lo largo de su vida útil. La gestión de la degradación es esencial para garantizar un rendimiento óptimo, requiriendo la selección de materiales resistentes a la corrosión y al desgaste (Bond et al., 2008; Gutfleisch et al., 2011).

En términos económicos, el costo de los materiales puede afectar la viabilidad de los sistemas solares a nivel global. Las regiones con altos gastos de instalación y mantenimiento pueden enfrentar desafíos para lograr la rentabilidad (Sun et al., 2021). Además, la disponibilidad y el acceso a materias primas son consideraciones importantes.

En cuanto a los desafíos medioambientales, los materiales utilizados en sistemas solares tienen un impacto notable en el medio ambiente durante su ciclo de vida. La extracción, procesamiento y disposición de estos materiales pueden causar efectos negativos (Tawalbeh et al., 2021). Por ello, hay una creciente necesidad de emplear materiales sostenibles y promover procesos de fabricación más limpios para reducir la huella ambiental de los sistemas solares (Choudhary & Srivastava, 2019).

A nivel regional, los sistemas solares enfrentan desafíos específicos debido a las condiciones climáticas y ambientales únicas de cada región (Kohsaka & Kohyama, 2023). Estas variaciones pueden influir en la selección de materiales adecuados, con un enfoque en la resistencia a la degradación y la durabilidad. Además, las regulaciones y políticas regionales relacionadas con la energía solar pueden afectar la demanda y la disponibilidad de materiales (Rissman et al., 2020).

ANTECEDENTES

2.4 Normativas y estándares de materiales para sistemas solares.

Las normativas y estándares son esenciales para asegurar la calidad, seguridad, eficiencia y sostenibilidad de los sistemas solares. Estas regulaciones son establecidas por organizaciones gubernamentales, instituciones internacionales y organismos de normalización para guiar la fabricación, instalación y mantenimiento de componentes solares. En México, existen normas específicas para las instalaciones fotovoltaicas, como la NOM-001, que establece estándares para sistemas eléctricos y sistemas solares fotovoltaicos. Además, las normas ISO definen requisitos para garantizar la calidad, seguridad y eficiencia de los paneles solares y su instalación. (Curtis et al., 2021).

Certificación de paneles solares: Existen normativas que establecen los requisitos mínimos de calidad y eficiencia para los paneles solares. Algunos ejemplos incluyen las normas IEC (International Electrotechnical Commission) y UL (Underwriters Laboratories), que definen los criterios de rendimiento, seguridad y durabilidad para los paneles solares (Blair et al., 2021; Timilsina et al., 2012).

Certificación de inversores solares: Los inversores solares, que convierten la energía producida por los paneles solares en electricidad utilizable, también están sujetos a normativas y estándares específicos. Las normas IEC y UL también se aplican a los inversores solares, junto con otras regulaciones regionales y locales que pueden establecer requisitos adicionales de seguridad y eficiencia (Liu et al., 2014).

Normativas de seguridad eléctrica: Las instalaciones solares deben cumplir con normativas de seguridad eléctrica para garantizar la protección contra riesgos como cortocircuitos, sobrecargas y descargas eléctricas. Estas regulaciones pueden variar según el país o la región, pero suelen basarse en estándares internacionales como el Código Eléctrico Nacional (NEC) en Estados Unidos o el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) en la Unión Europea (Jamil et al., 1997).

Normativas de eficiencia energética: Algunos países han establecido normativas de eficiencia energética que requieren que los sistemas solares cumplan con ciertos estándares de rendimiento energético. Por ejemplo, la Directiva de Eficiencia Energética de la UE establece objetivos para la eficiencia energética de los edificios, lo que puede influir en la selección de materiales y componentes solares (Crawford et al., 2016).

ANTECEDENTES

Normativas ambientales: Las normativas ambientales abordan aspectos como el uso de materiales sostenibles, la gestión de residuos y el ciclo de vida de los sistemas solares. Por ejemplo, la directiva europea RoHS (Restriction of Hazardous Substances) prohíbe el uso de ciertas sustancias peligrosas en equipos eléctricos y electrónicos, lo que afecta a los materiales utilizados en la fabricación de paneles solares (Hazelton et al., 2014).

Certificaciones de sistemas integrados: Además de las certificaciones individuales de componentes, también existen certificaciones para sistemas solares integrados. Estas certificaciones evalúan el sistema en su conjunto, considerando aspectos como la eficiencia global, la seguridad y la compatibilidad de los componentes (Desideri et al., 2010).

2.5 Influencia de factores ambientales en la selección de materiales reflectantes para sistemas solares.

La selección de materiales reflectantes para sistemas solares es crucial para optimizar su diseño y eficiencia. Estos materiales son esenciales para maximizar la captación de energía solar al reflejar la radiación incidente hacia los receptores o paneles solares, incrementando así la eficiencia del sistema (García-Segura et al., 2021).

Dada la importancia de los factores ambientales, existen diversas opciones de materiales reflectantes, como vidrio, espejos de aluminio o acero inoxidable, películas de polímero y recubrimientos de alta reflectividad (Jamali, 2019). La elección del material apropiado depende de las condiciones específicas del lugar, los criterios de rendimiento y la durabilidad deseada del sistema solar (Villanueva Fernández, 2010).

Además, es esencial realizar pruebas y evaluaciones en condiciones ambientales simuladas para garantizar que los materiales seleccionados cumplan con los estándares de rendimiento y durabilidad necesarios para una operación confiable y a largo plazo del sistema solar (Kim et al., 2021). Los factores ambientales, como la radiación solar, la temperatura, la humedad, la corrosión y la contaminación, tienen un impacto significativo en la selección de los materiales reflectantes más adecuados (Santamouris et al., 2011). Aquí se describe de forma detallada cómo estos factores influyen en la selección de materiales reflectantes:

Radiación solar: La cantidad y la intensidad de la radiación solar incidente varían según la ubicación geográfica y la hora del día. Los materiales reflectantes deben ser capaces de

ANTECEDENTES

mantener altos niveles de reflectividad bajo diferentes condiciones de radiación solar para garantizar una captación óptima de energía (Raut et al., 2011).

Temperatura: Las fluctuaciones de temperatura pueden afectar las propiedades físicas y químicas de los materiales reflectantes, como la reflectividad, la estabilidad dimensional y la resistencia al calor. Es importante seleccionar materiales que mantengan su rendimiento reflectante incluso en condiciones de alta temperatura (Al-Homoud, 2005).

Humedad: La exposición a la humedad puede provocar la corrosión y la degradación de los materiales reflectantes, lo que afecta negativamente su durabilidad y eficiencia. Es crucial elegir materiales que sean resistentes a la corrosión y que mantengan su reflectividad incluso en ambientes húmedos (García-Segura et al., 2021).

Corrosión: La corrosión causada por la exposición a agentes corrosivos en el ambiente, como la lluvia ácida o la contaminación atmosférica, puede dañar los materiales reflectantes y reducir su vida útil. Por lo tanto, es importante seleccionar materiales con alta resistencia a la corrosión para garantizar la durabilidad del sistema solar (Buendía-Martínez et al., 2021).

Contaminación: La acumulación de polvo, suciedad u otros contaminantes en la superficie de los materiales reflectantes puede reducir su reflectividad y disminuir la eficiencia del sistema solar. Se deben elegir materiales que sean fáciles de limpiar y que mantengan su reflectividad incluso en condiciones de contaminación (Saber et al., 2021).

2.6 Estrategias de diseño de materiales reflectantes para diferentes entornos.

Para garantizar la eficiencia y durabilidad de los sistemas solares en diversas condiciones ambientales, es necesario implementar estrategias específicas. Estas estrategias se adaptan a factores como la radiación solar, la temperatura, la humedad, la corrosión y la contaminación. Su objetivo es asegurar un rendimiento óptimo del sistema solar a lo largo del tiempo. Esto implica seleccionar materiales adecuados y mejorar su resistencia frente a estos factores, lo que garantiza un funcionamiento óptimo y duradero de los sistemas solares en diferentes entornos. (Alami et al., 2022; Cheela et al., 2021).

ANTECEDENTES

2.7 Enfoques multidisciplinarios en la investigación de materiales reflectantes.

La investigación de materiales reflectantes para aplicaciones solares es un campo multidisciplinario que combina conocimientos de diversas áreas científicas y tecnológicas. Estos enfoques interdisciplinarios permiten abordar los desafíos relacionados con la eficiencia, durabilidad y sostenibilidad de los materiales utilizados en sistemas solares. (Du et al., 2014). Este enfoque se ha vuelto cada vez más crucial debido a la complejidad de los desafíos que enfrentan los materiales reflectantes (Chel & Kaushik, 2018).

Una de las áreas clave de enfoque multidisciplinario en esta investigación es la ciencia de materiales, que se centra en comprender las propiedades y estructuras de los materiales reflectantes a nivel atómico y molecular . Esto incluye el estudio de la composición química, la cristalográfica, la microestructura y las propiedades ópticas de los materiales (Brostow & Lobland, 2016).

La física también desempeña un papel fundamental en la investigación de materiales reflectantes, ya que estudia cómo interactúan los fotones con la superficie de los materiales y cómo se reflejan, refractan y absorben. Comprender estos fenómenos es esencial para optimizar la eficiencia de reflexión de los materiales (Tilley, 2020).

La ingeniería juega un papel crucial en la aplicación práctica de los materiales reflectantes. Los ingenieros trabajan en el diseño y la fabricación de sistemas y dispositivos que utilizan estos materiales, como paneles solares, revestimientos reflectantes para edificios y carreteras, y sistemas de iluminación eficientes (Yao & He, 2014).

Además, la investigación en nanotecnología ha abierto nuevas posibilidades para mejorar las propiedades reflectantes de los materiales a través de la manipulación a escala nanométrica. La capacidad de diseñar nanoestructuras con propiedades ópticas específicas ha llevado a avances significativos en la creación de materiales reflectantes más eficientes y versátiles (Logothetidis, 2011).

Otro aspecto importante es la integración de enfoques computacionales y modelado numérico en la investigación de materiales reflectantes. Estas herramientas permiten simular y predecir el comportamiento óptico de los materiales a diferentes condiciones

ANTECEDENTES

ambientales y geometrías, lo que acelera el proceso de diseño y optimización (Blatchley III, 1997).

Además de las disciplinas científicas y tecnológicas, los enfoques multidisciplinarios en la investigación de materiales reflectantes también pueden involucrar campos como la economía, la sociología y la política. Esto es especialmente relevante en el desarrollo de políticas y regulaciones relacionadas con la eficiencia energética y la adopción de tecnologías sostenibles (Cristino et al., 2021).

2.8 Innovaciones y tendencias actuales en materiales reflectantes para la energía solar.

Destaca el desarrollo de materiales reflectantes de alto rendimiento con propiedades ópticas mejoradas, incluyendo el uso de nanotecnología para manipular estructuras a escala nanométrica (Wang & Qi, 2019). La investigación en materiales reflectantes multifuncionales, que ofrecen ventajas como autolimpieza y resistencia a la corrosión son de gran importancia. Además, se explora la integración de estos materiales en sistemas solares híbridos y en aplicaciones arquitectónicas para mejorar la eficiencia energética de los edificios (Cheng et al., 2021). Se espera que la investigación futura se centre en el desarrollo de materiales más eficientes, económicos y sostenibles, incluyendo nuevos materiales y la optimización de procesos de fabricación (Gharat et al., 2021).

2.9 Evaluación económica de la implementación de nuevos materiales reflectantes en sistemas solares.

Implica analizar los costos de adquisición, instalación y mantenimiento, así como los beneficios en términos de ahorro de energía y costos operativos reducidos. Se considera el costo inicial en comparación con los materiales convencionales, incluyendo mano de obra y equipos (Simon et al., 2020). También se evalúan los beneficios económicos derivados, como el ahorro en costos de energía y operativos. Se realiza un análisis de retorno de inversión para determinar la rentabilidad a largo plazo, considerando factores como la tasa de interés y la vida útil esperada. Además, se deben considerar los impactos económicos indirectos y externos, como beneficios ambientales y sociales (Cuce et al., 2016). La evaluación debe ser integral y tener en cuenta la incertidumbre y los riesgos asociados con la implementación (Rabaia et al., 2021).

ANTECEDENTES

2.10 Desafíos éticos y sociales en la producción y uso de materiales reflectantes para sistemas solares.

Estos desafíos se relacionan con cuestiones éticas, ambientales y sociales desde la extracción de materias primas hasta el desecho de los materiales . La equidad en el acceso a la energía solar es un desafío clave, ya que las comunidades marginadas pueden ser excluidas debido a barreras económicas y sociales, exacerbando las desigualdades energéticas y generando tensiones sociales (Levenda et al., 2021). La producción y el uso de materiales reflectantes también pueden tener impactos ambientales significativos, y se requieren prácticas de producción sostenibles para minimizar estos impactos (Tsoutsos et al., 2005). Los desafíos sociales incluyen la seguridad y el bienestar de los trabajadores, la competencia por el uso de tierras y recursos naturales, y la necesidad de transparencia y responsabilidad en la toma de decisiones (Sachs et al., 2019). Es esencial involucrar a las comunidades afectadas desde las etapas iniciales para mitigar conflictos y abordar las preocupaciones de todas las partes interesadas (Rogers et al., 2012).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La creciente necesidad de fuentes de energía limpias y eficientes ha impulsado el desarrollo de sistemas híbridos solares, que combinan tecnologías fotovoltaicas y térmicas para aprovechar de manera integral la radiación solar. Estos sistemas requieren componentes ópticos avanzados que maximicen la captación de energía, entre los cuales los reflectores solares difusos de refuerzo juegan un papel fundamental.

Sin embargo, actualmente existe una limitación crítica en la disponibilidad de materiales adecuados para la fabricación de reflectores difusos de alto rendimiento. Muchos materiales comerciales presentan baja estabilidad térmica y óptica, se degradan con la exposición prolongada a condiciones ambientales agresivas (como radiación UV y humedad), o implican altos costos de producción que dificultan su implementación a gran escala. La falta de materiales reflectantes optimizados afecta directamente la eficiencia energética y la viabilidad económica de los sistemas solares híbridos. Además, la mayoría de los desarrollos actuales no considera un enfoque integral que combine propiedades ópticas mejoradas, resistencia a la intemperie y viabilidad de síntesis a bajo costo. En este contexto, es necesario investigar nuevas rutas de síntesis y evaluación de materiales reflectantes, con énfasis en tecnologías accesibles como el método sol-gel, que permitan desarrollar recubrimientos cerámicos difusos con alta reflectancia, durabilidad y compatibilidad con distintos sustratos. Este proyecto de tesis doctoral surge como respuesta a esta problemática, con el objetivo de contribuir al diseño y validación de materiales innovadores para reflectores difusos de refuerzo en sistemas solares híbridos, abordando simultáneamente los desafíos de eficiencia, durabilidad y escalabilidad..

JUSTIFICACIÓN

IV. JUSTIFICACIÓN.

La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles es una necesidad apremiante en la lucha contra el cambio climático y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles (Adewumi et al., 2024). México, con su abundante radiación solar durante todo el año, especialmente en regiones como el norte y el centro del país, presenta un gran potencial para la generación de energía fotovoltaica (Prăvălie et al., 2019). La inversión en tecnología solar podría contribuir significativamente a la matriz energética nacional de México (Eli-zondo et al., 2023), similar a lo que ha logrado Alemania, un líder mundial en energía solar fotovoltaica, a pesar de su ubicación geográfica menos favorable (Dharshing, 2017). En este contexto, la energía solar se destaca como una solución prometedora y viable para satisfacer nuestras necesidades energéticas de manera sostenible. Además, México forma parte de acuerdos internacionales clave en materia de energías renovables, destacando su adhesión al Acuerdo de París, en el cual se comprometió a reducir en un 22% sus emisiones de gases de efecto invernadero y en un 51% las emisiones de carbono negro para el año 2030, respecto a una línea base tendencial (SEMARNAT, 2020). A nivel nacional, estos compromisos se respaldan mediante instrumentos como la Ley de Transición Energética, que establece como meta que al menos el 35% de la generación eléctrica del país provenga de fuentes limpias para el año 2030, y un 50% para el año 2050 (DOF, 2015). Estas metas reflejan una política energética orientada hacia la sostenibilidad y la diversificación de la matriz energética nacional mediante el aprovechamiento de recursos renovables como la energía solar.

Para maximizar el desempeño de los sistemas híbridos solares y hacerlos económicamente viables a gran escala, es crucial optimizar cada componente del sistema. Los reflectores difusos de refuerzo juegan un papel central en este proceso al dispersar la radiación solar de manera uniforme sobre los colectores y paneles solares. Es esencial desarrollar materiales reflectantes que sean altamente eficientes, duraderos, económicamente accesibles y respetuosos con el medio ambiente.

Esta tesis se enfoca en el desarrollo de materiales innovadores para reflectores difusos de refuerzo, buscando superar los desafíos técnicos y científicos asociados con su síntesis, caracterización y evaluación. Al mejorar la eficiencia y viabilidad económica de los sistemas híbridos solares, este proyecto contribuirá al desarrollo de tecnologías más eficientes y

JUSTIFICACIÓN

sostenibles en el campo de la energía solar. Además, los conocimientos y metodologías desarrolladas durante este estudio podrán aplicarse en otros ámbitos de la energía solar, ampliando su relevancia en la comunidad científica y tecnológica y acelerando la transición hacia un sistema energético más sostenible.

HIPÓTESIS

V. HIPÓTESIS.

La incorporación de aditivos poliméricos durante la síntesis por sol-gel de un recubrimiento cerámico basado en alfa-alúmina, aplicado sobre acero esmaltado mediante técnicas de aspersión y dip-coating, permite obtener una combinación de alta reflectancia difusa, resistencia mecánica y estabilidad frente a condiciones ambientales, evaluadas experimentalmente mediante pruebas como la corrosión por niebla salina, lo que lo hará adecuado como reflector difuso en sistemas híbridos solares.

OBJETIVOS

VI. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general.

Desarrollar un recubrimiento cerámico-polimérico basado en alfa alúmina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), mediante la técnica sol-gel y aplicado por dip-coating y aspersión sobre acero esmaltado 1008, para evaluar su reflectancia difusa, dureza, adherencia y durabilidad en su uso como reflector de refuerzo en sistemas híbridos solares

6.2 Objetivos específicos.

- 6.2.1 Establecer un procedimiento para la síntesis mediante el método sol-gel y la aplicación del recubrimiento utilizando técnicas de inmersión (dip-coating) y aspersión, optimizando las condiciones de reacción y los parámetros del proceso para garantizar la pureza y uniformidad del producto final, con el fin de asegurar una cobertura homogénea con alta reflectancia, dureza y adherencia sobre el sustrato de acero esmaltado de bajo carbono 1008.
- 6.2.2 Caracterizar el recubrimiento obtenido con distintas técnicas de deposición, mediante difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía UV-VIS, para comparar la uniformidad, adherencia, dureza, reflectancia y eficiencia de cobertura para determinar la técnica de aplicación más adecuada en sistemas solares híbridos
- 6.2.3 Evaluar la resistencia a la corrosión y la degradación del recubrimiento sintetizado, realizando ensayos de durabilidad utilizando en cámara salina durante un período de 24 horas, equivalente a 10 años de exposición en condiciones reales para asegurar la confiabilidad y longevidad del recubrimiento en sistemas solares híbridos y mejorar su eficiencia energética

MATERIALES Y MÉTODOS

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

Las siguientes secciones describen la metodología para desarrollar un recubrimiento cerámico como reflector difuso de refuerzo en sistemas solares. En la Figura 9 se describen de manera general las fases de análisis, selección, caracterización y evaluación del sustrato, polvo precursor y el recubrimiento cerámico.

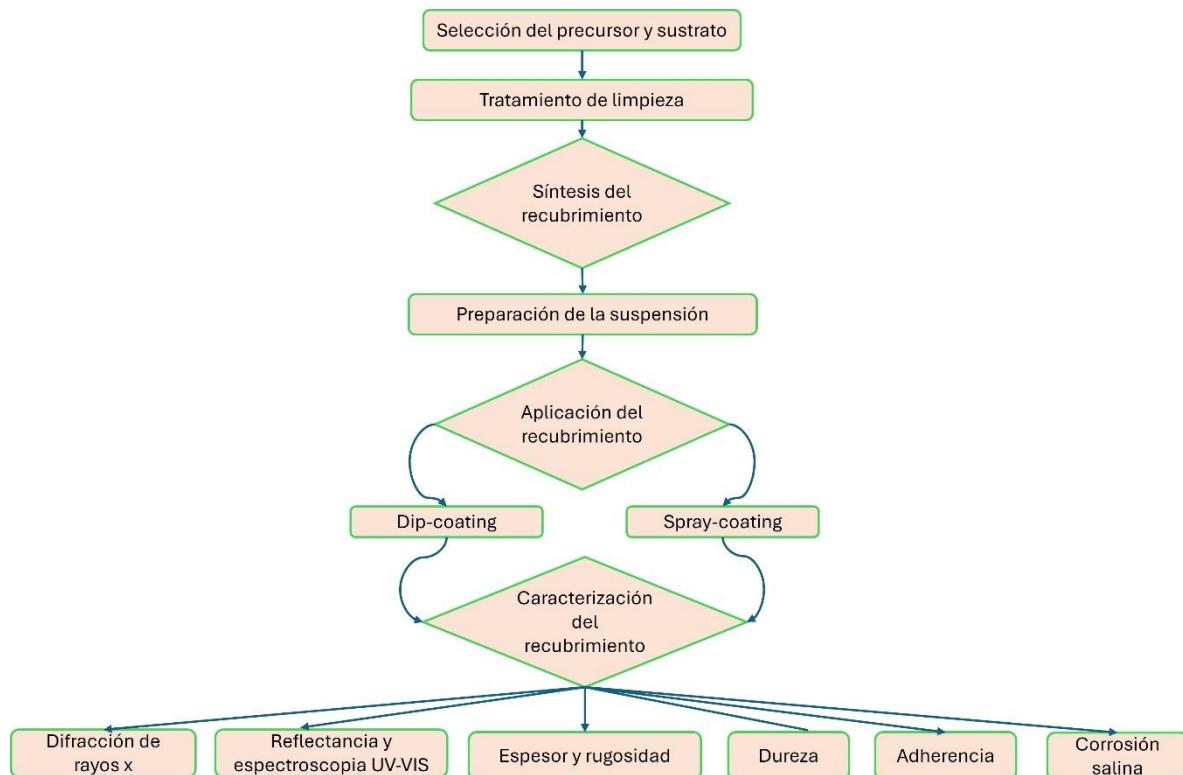


Figura 9. Metodología general para el desarrollo del recubrimiento cerámico.

7.1 Precursores y sustrato.

La Tabla 3 muestra la relación de los precursores, solventes, catalizadores y materiales utilizados en la síntesis del recubrimiento sobre sustrato de acero bajo en carbono esmaltado. Se incluyen los proveedores, números CAS (Chemical Abstracts Service) y el grado de pureza cuando aplica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 3. Precursores, sustratos y reactivos utilizados en la síntesis del recubrimiento.

Sustancia	Descripción	Proveedor	CAS Número	Pureza / Concentración
Precursor inorgánico	Tetraetil ortosilicato (TEOS)	Sigma-Aldrich®	78-10-4	98%
Solvente	Etanol (C_2H_5OH)	Sigma-Aldrich®	64-17-5	No especificada
Catalizador	Ácido nítrico (HNO_3) al 5%	Meyer®	7697-37-2	5%
Agua	Agua desionizada (H_2O)	Meyer®	7732-18-5	No aplica
Sellador adhesivo	$(C_4H_6O_2)_n$	Comex® B-18 Pazti	No aplica	No especificada
Pintura	Pintura blanca	Comex®	No aplica	No especificada
Solución limpadora	Base fosfato	Comex®	No aplica	No aplica
Alúmina	$(\alpha-Al_2O_3)$	Sigma-Aldrich®	1344-28-1	98%
Sustratos	aluminio (Al), cobre (Cu), latón, acero inoxidable, acero galvanizado y acero bajo en carbono con recubrimiento de esmalte.	No aplica	7.6 cm × 2.5 cm × 0.6 mm	(calibre 24)

La Tabla 3 presenta la relación completa de los materiales utilizados en la síntesis del recubrimiento cerámico y en la evaluación comparativa de distintos sustratos metálicos. Se incluyen los precursores químicos, solventes, catalizadores y materiales auxiliares empleados en la formulación sol-gel, así como los sustratos utilizados para la aplicación del recubrimiento y los análisis de reflectancia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sustrato base sobre el que se aplicó el recubrimiento fue acero bajo en carbono con recubrimiento de esmalte (SAE 1008), seleccionado por su estabilidad térmica, propiedades mecánicas adecuadas y su compatibilidad con procesos de esmaltado. Adicionalmente, con el fin de evaluar el efecto del tipo de material sobre la reflectancia relativa difusa, se incluyeron como sustratos comparativos el aluminio (Al), cobre (Cu), latón, acero inoxidable tipo T304 y acero galvanizado. Todos los sustratos fueron obtenidos en formato comercial con dimensiones de 7.6 cm × 2.5 cm × 0.6 mm (calibre 24), y fueron sometidos a las mismas condiciones de tratamiento superficial descritas en el apartado 7.2. La inclusión de estos materiales permite establecer una línea base comparativa sobre su comportamiento óptico antes y después del tratamiento de limpieza.

7.2 Tratamiento de limpieza

El tratamiento de limpieza se realizó utilizando una solución desengrasante a base de fosfato (marca: Comex®) en una proporción de 1:2 (una parte de solución por dos partes de agua). El sustrato se colocó en un limpiador ultrasónico AS2060B de Auto Science (Figura 10), operando a 40 kHz durante diez minutos, garantizando una limpieza óptima. Posteriormente fue enjuagado con agua desionizada y secado con una toalla de microfibra para eliminar residuos. Se realizó una ligera rugosidad superficial mediante un lijado manual suave con un abrasivo de grano 500 proporcionado por 3M™ para superficies húmedas, con el fin de mejorar la adherencia del recubrimiento. Finalmente, los sustratos fueron lavados con agua desionizada y secados con aire comprimido, asegurando la eliminación de partículas.



Figura 10. Tratamiento de limpieza del sustrato

MATERIALES Y MÉTODOS

7.3 Síntesis del recubrimiento

Preparación de la suspensión. La suspensión se preparó utilizando tetraetil ortosilicato (TEOS), sellador adhesivo, etanol, agua desionizada, ácido nítrico al 5% y para mejorar la adherencia del recubrimiento al sustrato metálico y estabilizar la dispersión de polvos cerámicos, se incorporó pintura blanca Comex® (descritos en la Tabla 3).



Figura 11. Preparación de la mezcla sol-gel para la síntesis del recubrimiento cerámico.

El recubrimiento cerámico se obtuvo mediante el método sol-gel: en un vaso de precipitados de 250 ml se agregaron 10.08 g de sellador adhesivo B-18, 15 ml de etanol, 3.66 ml de agua desionizada, 2 g de α -Al₂O₃, 10.13 g de pintura blanca y 2 ml de ácido nítrico al 5% utilizado como agente de hidrólisis (Figura 11). Esta mezcla se agitó en un agitador digital a 1500 rpm durante 10 minutos a temperatura ambiente para permitir el desarrollo de las reacciones de hidrólisis y condensación parcial, formando un sol homogéneo

7.4 Aplicación del recubrimiento

Antes de aplicar el recubrimiento, las probetas fueron sometidas al tratamiento de limpieza descrito en el apartado anterior. Se adoptaron dos métodos distintos para la aplicación del recubrimiento sintetizado sobre los sustratos, empleando la misma solución como se muestra en la Figura 12.

MATERIALES Y MÉTODOS

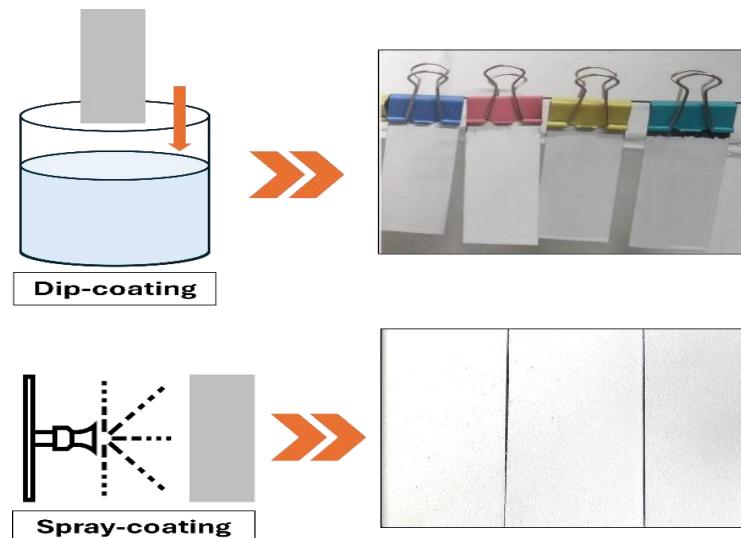


Figura 12. Técnicas de aplicación por spray-coating y dip-coating para el recubrimiento.

Para la técnica de Dip-coating, se utilizó un dispositivo de inmersión eléctrica con una velocidad de salida de 1 mm/s (Figura 13). Los sustratos fueron sumergidos directamente en la solución de recubrimiento y secados al aire en condiciones ambientales. En contraste, en la técnica por spray-coating, se empleó una pistola de aspersión industrial por gravedad Carman® de la serie 400, con una presión constante de 30 psi, diámetro de boquilla de 1.4 mm, tamaño del abanico de 20 a 24 cm, capacidad del depósito de 600 ml, entrada de aire en la parte inferior y un consumo de aire de 396 L/min. Se ejecutó siguiendo las especificaciones del fabricante de la pistola de aspersión, seguido de un secado al aire a temperatura ambiente.

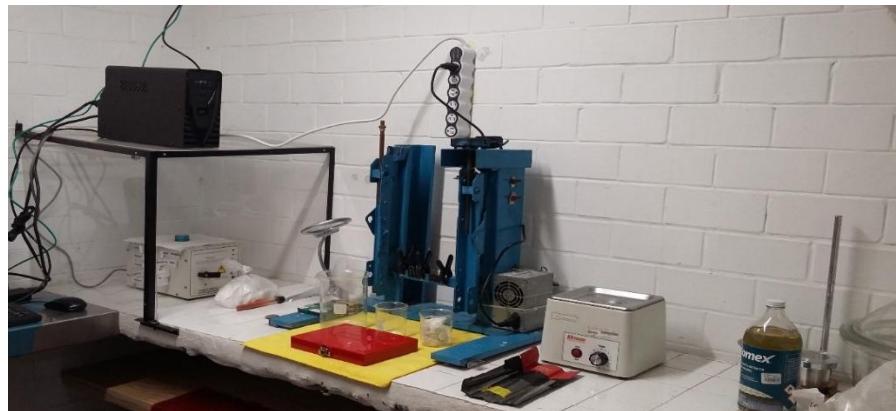


Figura 13. Montaje del dispositivo de inmersión eléctrica para la técnica de Dip-coating.

MATERIALES Y MÉTODOS

Finalmente, en el tratamiento térmico, ambos recubrimientos fueron sometidos a un proceso de tratamiento térmico. Se introdujeron en un horno Boekel™ modelo 107800 previamente ajustado a 100 °C, se mantuvieron durante una hora y posteriormente se dejaron enfriar de forma natural.

7.5 Caracterización del recubrimiento

Con el fin de evaluar las propiedades estructurales, ópticas, mecánicas y funcionales del recubrimiento cerámico aplicado sobre los sustratos, se llevaron a cabo diversas técnicas de caracterización. Estas pruebas permitieron analizar la composición cristalina, la respuesta óptica, el comportamiento superficial, adherencia, dureza y resistencia a la corrosión del recubrimiento sintetizado.

7.5.1 Caracterización de materiales de referencia

Con el propósito de comparar la respuesta estructural y óptica de la alúmina con otros materiales reflectantes, se seleccionaron dióxido de titanio (TiO_2) y celestita ($SrSO_4$) como materiales de referencia. El dióxido de titanio se consideró debido a su elevado índice de refracción, estabilidad térmica y amplia aplicación en superficies reflectantes. La celestita, por su parte, fue incluida por su estructura cristalina ortorrómica y comportamiento reflectante observado en aplicaciones ópticas. Ambos materiales fueron caracterizados mediante difracción de rayos X (DRX) y reflectancia difusa relativa (ρ_d) para establecer una línea base comparativa con el polvo precursor de alfa alúmina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) utilizado en este trabajo.

7.5.2 Difracción de rayos X (XRD)

El polvo precursor fue caracterizado mediante difracción de rayos X (XRD). La caracterización se realizó utilizando un difractómetro INEL Equinox 2000 con un voltaje de 30 kV, una fuente de radiación de cobalto ($\lambda=1.789010 \text{ \AA}$) y un detector curvo. La difracción de rayos X permitió identificar las fases cristalina del polvo precursor en el rango de 2θ .

7.5.3 Reflectancia relativa difusa (ρ_d)

La reflectancia relativa difusa (ρ_d) fue medida en los sustratos y polvos precursores mediante espectroscopia UV-VIS (Ocean Optics USB3000) acoplada a una sonda de fibra óptica con geometría de 45°/0°. El sistema fue calibrado con un patrón blanco de referencia (WS-1, Ocean

MATERIALES Y MÉTODOS

Optics) cuya reflectancia se consideró como 100 %. Las mediciones se realizaron en el rango de 400–800 nm, promediando cinco lecturas por muestra para mejorar la reproducibilidad.

Las muestras en polvo se colocaron en cápsulas de cuarzo, mientras que los sustratos fueron medidos directamente. La reflectancia se reportó como porcentaje relativo frente al patrón.

7.5.4 Espesor y rugosidad del recubrimiento

El espesor del recubrimiento cerámico se midió utilizando un micrómetro electrónico IP54 con resolución de 0.001 mm. Las mediciones se realizaron en cinco puntos distintos distribuidos a lo largo del área central del sustrato, evitando los bordes donde pueden producirse acumulaciones. Para cada técnica de aplicación (dip-coating y spray-coating), se evaluaron tres muestras independientes, y los resultados reportados corresponden al promedio de estas mediciones. El instrumento fue verificado antes de cada jornada de medición utilizando una galga patrón, conforme a las especificaciones del fabricante.

La rugosidad superficial (R_a) se determinó con un medidor de rugosidad de contacto Mitutoyo modelo SJ-411, utilizando una punta de diamante con radio de 2 μm . Cada muestra fue medida en cinco trayectorias paralelas de 4 mm de longitud, distribuidas en la zona central del recubrimiento, bajo condiciones ambientales controladas ($T = 23 \pm 2 ^\circ\text{C}$, $HR < 50 \%$). El valor reportado de R_a corresponde al promedio aritmético de las quince mediciones (cinco mediciones por muestra en tres réplicas).

Estos parámetros fueron utilizados para comparar la calidad superficial y la uniformidad del recubrimiento obtenido por ambas técnicas de aplicación, tal como se resume en la Tabla 6.

7.5.5 Dureza del recubrimiento (ASTM D3363)

Se realizó una prueba de dureza en el recubrimiento cerámico. Este procedimiento se basa en el método del lápiz, un enfoque mecánico ampliamente utilizado para medir la resistencia de la superficie. La norma de referencia ASTM D3363 proporciona un método estandarizado para evaluar la dureza superficial utilizando lápices de dureza.

MATERIALES Y MÉTODOS

7.5.6 Adherencia del recubrimiento (ASTM D3359)

La prueba de adherencia se realizó en el recubrimiento cerámico utilizando el método de cinta adhesiva, un enfoque mecánico comúnmente empleado para evaluar la resistencia de la unión entre el recubrimiento y el sustrato de acero. La norma de referencia ASTM D3359 proporciona un procedimiento estandarizado para evaluar la adhesión, comparando los resultados con descripciones e ilustraciones de acuerdo con las pautas de ASTM D3359.

7.5.7 Prueba de corrosión por niebla salina del recubrimiento

También se realizó una prueba de corrosión por niebla salina en una cámara Ascott S120 S, siguiendo la norma ASTM B117 *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog)*. Los parámetros de operación fueron los siguientes: temperatura de la cámara de 36 °C, tasa de atomización de 1-2 ml/h de niebla, concentración de sal al 5 % y pH neutro. Las muestras fueron colocadas en el soporte de la cámara con una inclinación de 45° durante 24 horas en un ambiente altamente corrosivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VIII. RESULTADOS y DISCUSIÓN

En este apartado se describen los resultados obtenidos en las pruebas del recubrimiento cerámico detalladas a continuación.

8.1 Análisis del polvo precursor

Se llevó a cabo un análisis combinado de difracción de rayos X (DRX) y reflectancia difusa en los precursores alúmina, dióxido de titanio y celestita. La Figura 14 representa los resultados obtenidos para la alúmina. En la Figura 14a se muestra el patrón de DRX correspondiente a la fase de corindón ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), sin evidencia de fases secundarias. Los picos de difracción observados son intensos, delgados y bien definidos, lo cual es indicativo de un alto grado de cristalinidad y un tamaño de cristal considerable (Patterson, 1939). Esta característica estructural tiene una implicación directa en la respuesta óptica del material.

La Figura 14b muestra la reflectancia relativa medida para el polvo precursor, con un valor de 93.71 %. Esta alta reflectancia puede asociarse al elevado orden estructural del material y al bajo nivel de defectos, lo cual reduce los mecanismos de absorción interna y dispersión inelástica de la radiación incidente (Uvarov & Popov, 2013). En materiales cerámicos, se ha documentado que un mayor tamaño de cristal favorece la reflectancia óptica debido a una menor densidad de fronteras de grano y defectos estructurales (Darut et al., 2023; Steinborn et al., 2011).

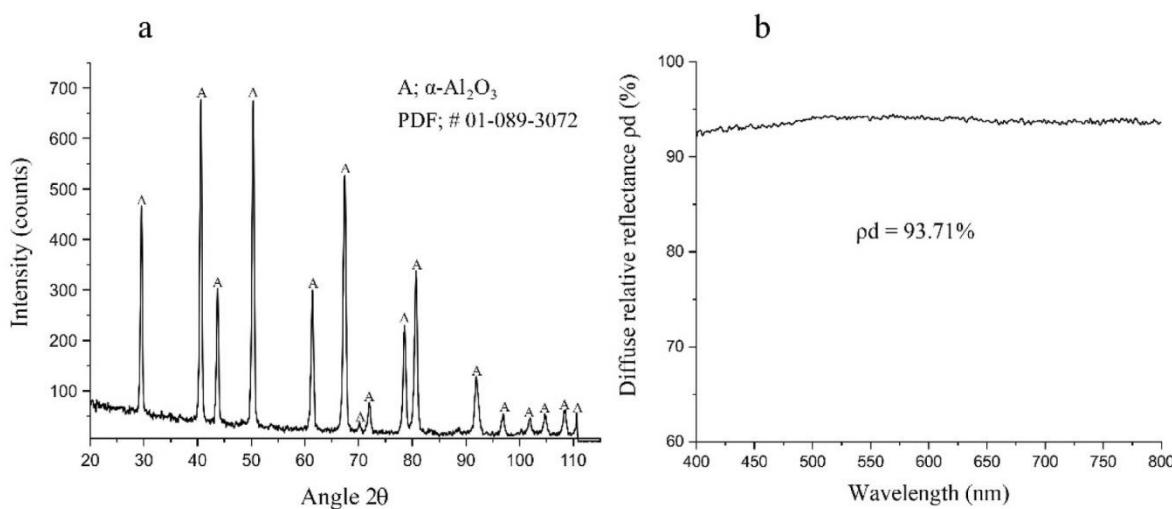


Figura 14. a) Patrón de difracción, b) Gráfico de reflectancia relativa difusa para alúmina.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por tanto, se puede establecer una correlación positiva entre el tamaño de cristal estimado mediante DRX y la reflectancia observada, lo que respalda la idoneidad del α -Al₂O₃ como componente reflectante en recubrimientos solares.

La Figura 15 presenta los resultados correspondientes a la caracterización estructural y óptica de la celestita. En la Figura 15a se muestra el DRX correspondiente a la fase celestita (SrSO₄), sin indicios de fases secundarias. Aunque los picos de difracción están bien definidos, su intensidad y agudeza son moderadas, lo que podría reflejar un tamaño de cristal intermedio y una posible presencia de defectos estructurales.

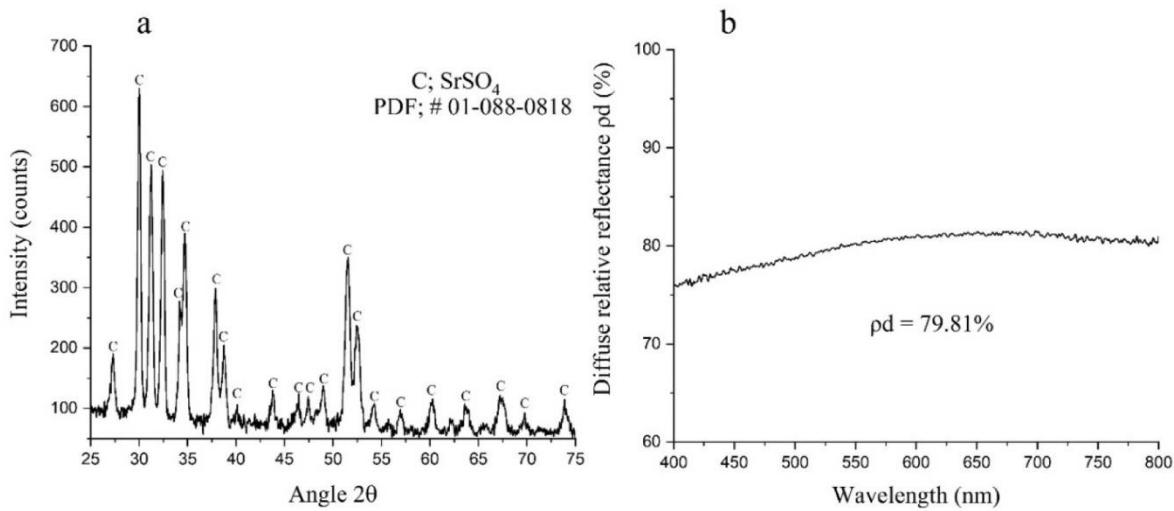


Figura 15. a) Patrón de difracción, b) Gráfico de reflectancia relativa difusa para celestita.

La Figura 15b muestra la reflectancia relativa difusa del polvo precursor de celestita, con un valor del 79.81 %. Este valor es considerablemente menor que el observado para la alúmina, lo que indica una menor eficiencia en la dispersión y reflexión de la radiación incidente. La baja densidad de la celestita y posibles defectos estructurales podrían contribuir a una reflectancia reducida (Girard et al., 2019). Dado que una alta reflectancia es un criterio esencial para el diseño de recubrimientos reflectantes aplicados en sistemas solares, la celestita no es adecuada como polvo precursor para la síntesis de películas delgadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 16 presenta los resultados correspondientes al dióxido de titanio. En la Figura 16a se muestra el patrón de difracción de rayos X, correspondiente a la fase anatasa del TiO₂, sin evidencia de fases cristalinas secundarias. Los picos de difracción son agudos y bien definidos, lo cual es indicativo de un alto grado de cristalinidad y tamaño de cristal significativo. Esta estructura ordenada favorece la interacción coherente con la radiación, como se refleja en la Figura 16b, donde se observa una reflectancia relativa difusa del 98 %, el valor más alto entre los tres materiales analizados.

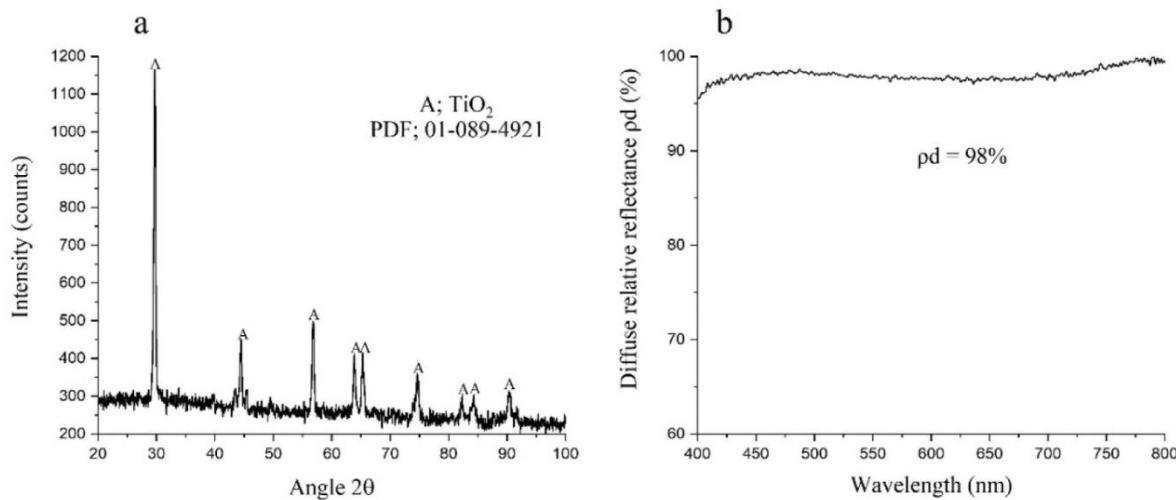


Figura 16. a) Patrón de difracción, b) Gráfico de reflectancia relativa difusa para dióxido de titanio.

El elevado valor de reflectancia posiciona al TiO₂ como un material altamente eficiente para aplicaciones ópticas, tales como pinturas y recubrimientos reflectantes. Sin embargo, su fragilidad mecánica que puede derivar en agrietamiento o desprendimiento en condiciones de esfuerzo y su costo relativamente elevado pueden limitar su aplicabilidad en sistemas que requieren alta resistencia estructural o bajo costo de producción (Ali et al., 2014; Gopalan et al., 2020). Si bien el TiO₂ exhibe la mayor reflectancia entre los materiales evaluados, la alúmina (α -Al₂O₃) representa una alternativa técnicamente más equilibrada. Aunque su reflectancia es 4.29 % menor que la del TiO₂, supera en 13.9 % al valor obtenido para la celestita (SrSO₄) y ofrece ventajas significativas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

en términos de resistencia mecánica, estabilidad térmica y durabilidad. Estas propiedades la convierten en una opción más adecuada para recubrimientos solares que requieren integridad estructural a largo plazo, incluso en condiciones ambientales exigentes.

Con base en los resultados anteriores, se seleccionó el $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ como el polvo precursor más prometedor para la síntesis de recubrimientos, considerando su reflectancia y desempeño estructural. A continuación, se presenta la evaluación de los sustratos sobre los cuales se aplicarán dichos recubrimientos, con énfasis en su reflectancia, espesor y rugosidad superficial como parámetros clave.

8.2 Evaluación de los sustratos

La reflectancia relativa difusa (ρ_d) de los sustratos se midió en dos condiciones: sin tratamiento (S/T) y con tratamiento de limpieza (C/T). Además, se midió el espesor y la rugosidad (Ra) de los sustratos como se muestran en la Tabla 4.

En la Tabla 4 se observa que los valores de ρ_d de los sustratos aumentan con el tratamiento de limpieza. Si bien es cierto que la limpieza de un sustrato puede mejorar la reflectancia relativa difusa del material y que los valores de reflectancia pueden aumentar en promedio después del tratamiento de limpieza, es importante tener en cuenta que el aumento real de los valores de reflectancia puede variar significativamente. Por ejemplo, el acero esmaltado con bajo contenido de carbono SAE 1008 tiene una mayor rugosidad en comparación con los otros sustratos. Su superficie esmaltada es más texturizada, lo que la hace naturalmente muy reflectante, por lo que el efecto del tratamiento de limpieza sobre la reflectancia no es tan notable. Además, los diferentes métodos de limpieza pueden tener diferentes efectos sobre la reflectancia, lo que significa que los resultados pueden variar según el método utilizado y la naturaleza del sustrato; como se puede observar en la Tabla 4, todos los sustratos limpios (C/T) tienen mayor reflectancia que los no limpios (S/T).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4. Valores difusos de sustrato de reflectancia relativa, espesor y rugosidad.

Sustrato	Reflectancia relativa difusa (%) ρ_d		Espesor mm	Rugosidad Ra μm
	S/T	C/T		
Aluminio (Al)	49.04	51.31	0.481	0.219
Cobre (Cu)	54.18	55.2	0.484	0.248
Latón	46.36	48.14	0.482	0.246
Acero inoxidable (T304)	58.37	60.25	0.484	0.245
Acero galvanizado	54.95	56.67	0.483	0.22
Acero bajo en carbo- n con recubri- miento*	74.15	74.34	0.482	0.253

S/T= sin tratamiento de limpieza, C/T=con tratamiento de limpieza.

* recubrimiento de esmalte SAE 1008

Materiales como el latón y el aluminio, aunque también mejoraron su reflectancia tras la limpieza, muestran valores de ρ_d más bajos. Esto puede explicarse tanto por las propiedades intrínsecas del material como por el nivel de oxidación superficial, que es más pronunciado en estos metales y puede no eliminarse completamente con un tratamiento de limpieza básico (Yang et al., 2025).

Respecto a la rugosidad superficial, se observa que el acero esmaltado presenta una rugosidad relativamente alta ($Ra = 0.253 \mu\text{m}$), lo cual contribuye a una dispersión eficiente de la luz incidente, característica deseable para recubrimientos difusores (Zhou et al., 2023) Sin embargo, esta rugosidad no afecta negativamente su reflectancia, gracias a la naturaleza especular del esmalte aplicado.

El tratamiento de limpieza es eficaz para mejorar la reflectancia, su efecto es más pronunciado en sustratos sin acabados reflectantes. Por esta razón, la selección del acero bajo en carbono como sustrato base para la aplicación del recubrimiento cerámico resulta adecuado, ya que combina una alta reflectancia con propiedades mecánicas y térmicas favorables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.3 Resultados de la síntesis y aplicación del recubrimiento

Se emplearon las técnicas de dip-coating e spray-coating para aplicar el recubrimiento cerámico sobre sustratos metálicos. Durante la etapa de aplicación, ambas técnicas fueron evaluadas inicialmente desde un enfoque cualitativo, considerando la homogeneidad superficial del recubrimiento, la facilidad de aplicación y la reproducibilidad operativa, como se muestra en la Tabla 5.

La técnica de dip-coating permitió un control superficial del espesor del recubrimiento, el cual depende directamente de la velocidad de extracción, en concordancia con lo reportado en estudios donde esta técnica se utiliza como aproximación preliminar para observar la formación continua de películas delgadas (Leoni et al., 2022). Si bien esta evaluación no permite una cuantificación precisa, resulta útil para detectar irregularidades superficiales evidentes, acumulaciones de material o interrupciones en la película. Esta técnica generó recubrimientos con acabado uniforme y sin discontinuidades visibles, salvo una ligera acumulación de material en los bordes inferiores, que no comprometió la integridad del recubrimiento.

Tabla 5. Análisis cualitativo de las técnicas de aplicación del recubrimiento.

Criterio	Dip-coating	Spray-coating
Control de espesor superficial	Alta ^a	Media ^b
Uniformidad del recubrimiento	Alta ^a	Moderada ^b
Velocidad de aplicación	Lenta	Rápida
Requiere equipo especializado	Sistema de inmersión	Pistola y compresor
Homogeneidad	Alta	Moderada
Sensibilidad a condiciones ambientales	Baja	Alta
Reproducibilidad	Alta	Media
Equipo de protección personal	Requerido	No requerido

^a= dependiente de la velocidad de extracción, ^b= depende de operador y distancia

Por otro lado, la técnica de spray-coating permitió una aplicación más rápida, aunque mostró mayor sensibilidad a variaciones en la distancia y presión de aplicación. Se observaron microgotas secas y acumulaciones locales, especialmente hacia los extremos del sustrato, producto de

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

desviaciones menores durante el rociado. No obstante, el acabado superficial general fue considerado aceptable.

La evaluación cualitativa durante la aplicación permitió identificar diferencias superficiales en la uniformidad y control del espesor entre ambas técnicas. Posteriormente, el espesor del recubrimiento fue determinado cuantitativamente utilizando un micrómetro electrónico IP54, conforme se describe en el apartado 7.5.4 y se reporta en la Tabla 6. Este enfoque combinado; cualitativo en el proceso de aplicación y cuantitativo en la caracterización, permitió validar la consistencia del procedimiento y comparar de forma integral el desempeño de ambas técnicas.

Ambas técnicas resultaron funcionales para la aplicación del recubrimiento cerámico. No obstante, el acabado superficial más uniforme se obtuvo con la técnica de spray-coating.

8.4 Caracterización del recubrimiento

En la Tabla 6 se presentan los resultados de reflectancia relativa difusa (pd), dureza, adherencia, espesor y rugosidad del recubrimiento cerámico, aplicados mediante dos técnicas diferentes: recubrimiento por inmersión (dip-coating) y por aspersión (spray-coating). Las mediciones se realizaron antes y después de la prueba de corrosión por niebla salina de 24 horas.

Tabla 6. Comparativa de resultados para reflectancia relativa difusa (pd), dureza, adherencia, espesor (d) y rugosidad del recubrimiento cerámico.

Técnica aplicada	% pd (400–800 nm)		Dureza		Adhesión		% Área de adherencia		Espesor (mm)		Rugosidad (μm)
	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	Ra
dip-coating	76.07	74.7	2H	2H	4B	4B	95	95	0.043	0.043	3.22
spray-coating	78.31	77.34	4H	4H	5B	5B	100	100	0.053	0.053	6.44

B= Antes de la corrosión salina.

A= Despues de la corrosión salina (24 h).

Ra= La media aritmética de los valores absolutos de 3 muestras, cada una con 5 mediciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los recubrimientos (dip-coating y spray-coating) se aplicaron con α -Al₂O₃ como polvo precursor y acero esmaltado con bajo contenido de carbono SAE 1008 como sustrato. Las mediciones se tomaron antes y después de la prueba de corrosión por niebla salina de 24 horas. Ambas técnicas muestran valores estables de reflectancia (ρ_d) tras la exposición a la niebla salina, lo que indica una buena resistencia del recubrimiento frente a condiciones corrosivas. Sin embargo, la aspersión presenta valores ligeramente superiores de reflectancia, lo que puede atribuirse a su mayor rugosidad superficial ($R_a = 6.44 \mu\text{m}$ frente a $3.22 \mu\text{m}$). Esta relación es coherente con lo reportado en la literatura, donde superficies más rugosas tienden a incrementar la dispersión de la luz y, por ende, la reflectancia difusa (Kalantari & Molan, 2016). En este caso, la mayor rugosidad generada por la aspersión favorece la eficiencia óptica del recubrimiento.

En cuanto a la dureza, los valores registrados muestran que el recubrimiento por aspersión alcanza un nivel de 4H, superior al de 2H obtenido mediante inmersión. Esta diferencia puede estar relacionada con la densificación localizada generada por la deposición por aspersión, donde el impacto de microgotas atomizadas genera una microestructura más compacta y resistente a rayaduras.

De forma coherente, la aspersión también mostró mejor adherencia (5B frente a 4B en inmersión), con un área de adherencia total del 100 % incluso después de la corrosión. Esta mejor respuesta mecánica podría explicarse por el anclaje mecánico mejorado asociado a una mayor rugosidad superficial, que facilita la interpenetración del recubrimiento con las microasperezas del sustrato. Esto concuerda con lo reportado por Croll, (2020), quien señala que las características del perfil de rugosidad superficial influyen significativamente en la adherencia del recubrimiento, así como en su resistencia frente a mecanismos de delaminación y fluencia inducida por corrosión.

Respecto al espesor, ambos recubrimientos muestran valores constantes antes y después de la corrosión (0.043 mm en inmersión y 0.053 mm en aspersión), lo que indica una buena estabilidad dimensional y resistencia a degradación por humedad o ataque químico superficial. La diferencia de espesor no parece afectar negativamente el desempeño, pero puede influir en la capacidad de protección y reflectancia si se escala a sistemas más exigentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ambas técnicas de aplicación, dip-coating y aspersión, muestran resultados favorables. Sin embargo, la aspersión se destaca porque tiene una superficie más rugosa y reflectancia relativa difusa más alta debido al mayor valor de Ra en comparación con el recubrimiento por inmersión.

Para comprender si estas diferencias en el desempeño óptico y mecánico están relacionadas con la composición estructural del recubrimiento, se realizó un análisis mediante difracción de rayos X (DRX), el cual permitió identificar las fases cristalinas presentes en el material final. Se observaron tres fases principales: SiO_2 , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ y TiO_2 , las cuales están asociadas con la síntesis sol-gel y los componentes empleados durante la formulación del recubrimiento (Figura 17).

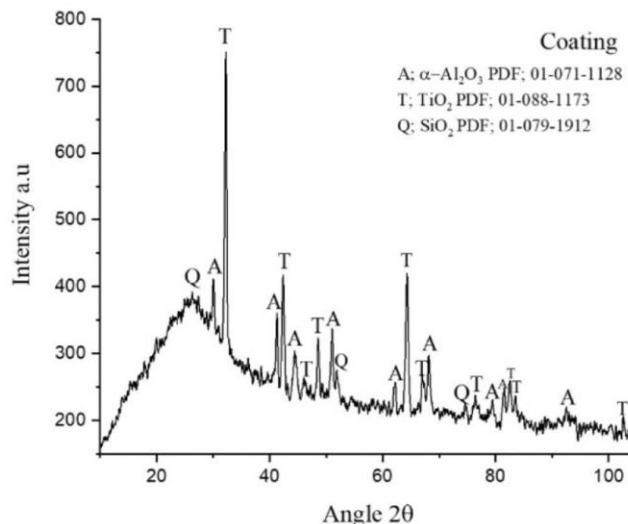


Figura 17. Patrón de difracción de rayos X de las tres fases en el recubrimiento final.

La fase SiO_2 se forma en el método de síntesis sol-gel a través de la hidrólisis controlada y la condensación de precursores de silicio, como (TEOS), $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ se introduce desde el inicio del proceso añadiéndolo como polvo precursor. En cuanto al TiO_2 , su presencia se atribuye a la incorporación de pintura blanca Comex®, agregada durante la preparación de la suspensión. Esta pintura, utilizada como medio dispersante y para mejorar la adherencia al sustrato, contiene dióxido de titanio como pigmento principal. Por ello, la fase TiO_2 fue identificada en los análisis de DRX del recubrimiento final.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 18 muestra el gráfico de reflectancia relativa difusa del recubrimiento antes de la corrosión salina (línea roja A), con un valor de 76,07% % y después de la corrosión salina (línea negra B), con un valor de 74,70%. Estos valores de reflectancia corresponden al recubrimiento aplicado por inmersión antes y después de la prueba de corrosión salina, en el rango de 400 a 800 nm, disminuyendo a 74,70% después de una prueba de corrosión salina.

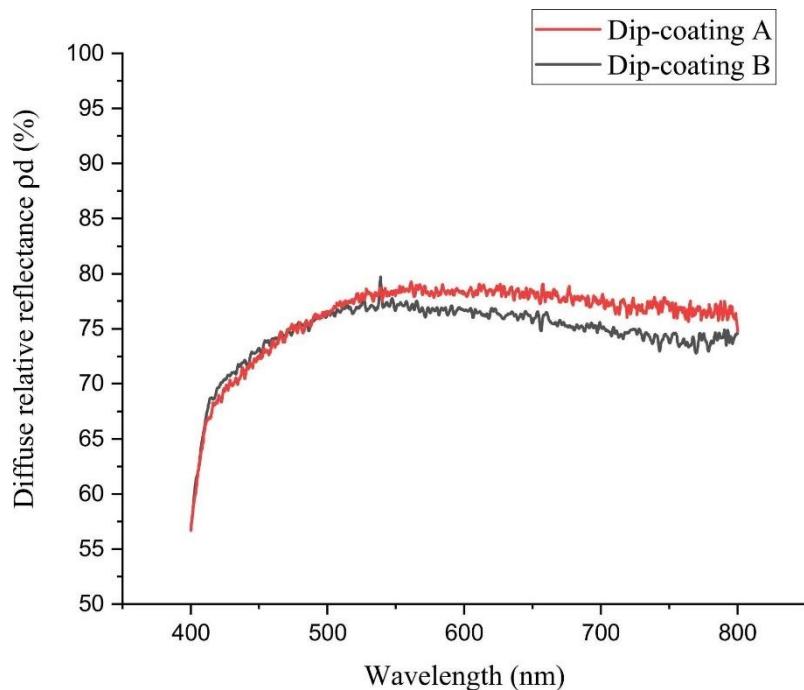


Figura 18. Reflectancia relativa difusa del recubrimiento por inmersión antes de la corrosión salina (A) y después del ensayo de corrosión salina (B).

La Figura 19 muestra el gráfico de la reflectancia relativa difusa del recubrimiento aplicado por aspersión antes y después de la prueba de corrosión salina, mostrando una ligera disminución en la reflectancia. La técnica de recubrimiento por aspersión produjo recubrimientos con una reflectancia ligeramente mejor del 78,31%, que disminuyó al 77,34% después de una prueba de sal en aerosol de 24 horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

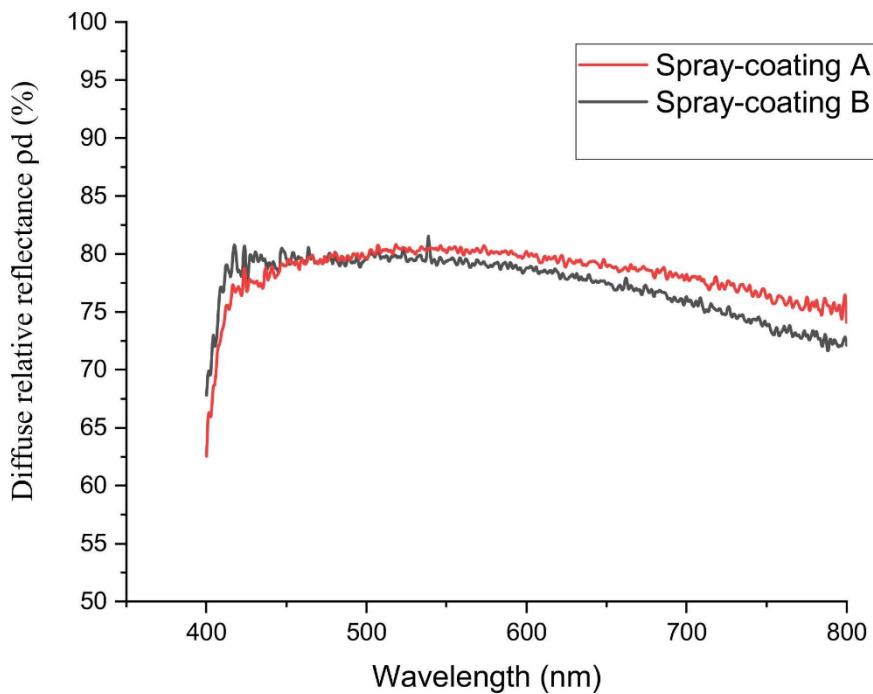


Figura 19. a) reflectancia relativa difusa del recubrimiento por aspersión antes de la corrosión salina y b) después de la prueba de corrosión salina.

Comparando ambos recubrimientos, el recubrimiento por aspersión presenta una reflectancia ligeramente mayor y mejores propiedades mecánicas. Esto se debe a que el control de los parámetros de aspersión permite ajustar las propiedades físicas del recubrimiento, como lo menciona Xie and Wang (2019), lo que resulta en una capa más densa y rugosa. Ambos recubrimientos mostraron una ligera disminución en la reflectancia, lo cual es esperable debido a la posible contaminación superficial o depósitos de sales después de la prueba de niebla salina. Sin embargo, no se observaron signos evidentes de formación de productos de corrosión ni daños estructurales en la superficie, lo que concuerda con lo reportado por Gopal and Sudarshan (2023) quienes estudiaron recubrimientos sol-gel anticorrosivos aplicados en acero que mostraron buena estabilidad y resistencia frente a pruebas de niebla salina, atribuyendo este comportamiento a la formación de capas densas y adherentes que actúan como barrera protectora frente a ambientes corrosivos.

CONCLUSIONES

IX. CONCLUSIONES

El desarrollo de un recubrimiento cerámico-polimérico a base de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, mediante el método sol-gel y su aplicación sobre acero esmaltado SAE 1008 mediante técnicas de dip-coating y spray-coating, permitió cumplir con los objetivos planteados y validar la hipótesis de trabajo. La elección de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ como material base se justificó por sus propiedades mecánicas, térmicas y ópticas, que lo hacen adecuado para aplicaciones exigentes como reflectores difusos en sistemas híbridos solares, además de que el dióxido de titanio presente en la pintura empleada en la formulación también contribuye significativamente a la reflectancia.

Las propiedades del recubrimiento fueron validadas mediante ensayos ópticos, mecánicos y de resistencia química, obteniéndose: reflectancia relativa difusa superior al 90 %, dureza mínima de 4H, adherencia $\geq 80\%$, y una buena respuesta frente a condiciones corrosivas simuladas. Tras 24 horas de exposición a niebla salina, ambos recubrimientos mantuvieron su integridad estructural, sin evidencias visibles de delaminación o degradación. La reflectancia sólo presentó una disminución menor ($\approx 1.5\%$), atribuible a depósitos salinos superficiales, lo cual confirma la estabilidad del sistema en ambientes agresivos.

Ambas técnicas de aplicación resultaron funcionales; sin embargo, el recubrimiento por aspersión mostró un mejor desempeño global, al alcanzar mayor dureza (4H), mejor adherencia (5B), mayor rugosidad superficial (R_a), y una reflectancia relativa difusa ligeramente superior ($\approx +2\%$) en comparación con la inmersión. Estas características favorecen su implementación en condiciones exigentes y su escalabilidad en procesos industriales. Además, el recubrimiento cerámico a base de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ se utilizará como un reflector de refuerzo, dispersando la luz de manera uniforme en múltiples direcciones, lo que resulta beneficioso para la eficiencia energética y la calidad de la iluminación en aplicaciones ópticas y solares.

El análisis estructural por difracción de rayos X permitió identificar tres fases principales en el recubrimiento: SiO_2 , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ y TiO_2 , confirmando una composición mixta con potencial funcional en aplicaciones ópticas. La presencia de TiO_2 se debe a su incorporación desde la pintura blanca utilizada en la formulación, lo que contribuye a mejorar la reflectancia del recubrimiento.

CONCLUSIONES

Finalmente, el acero esmaltado SAE 1008 se consolidó como un sustrato viable y rentable, con una buena compatibilidad con los recubrimientos aplicados, aportando alta reflectancia, estabilidad mecánica y resistencia química.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan el potencial del recubrimiento propuesto como reflector difuso de refuerzo en sistemas solares híbridos, con aplicaciones escalables en el sector energético y de materiales avanzados.

REFERENCIAS

X. REFERENCIAS.

- Adewumi, A., Olu-lawal, K. A., Okoli, C. E., Usman, F. O., & Usiagu, G. S. (2024). Sustainable energy solutions and climate change: A policy review of emerging trends and global responses. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(2), 408-420.
- Aggarwal, S. (2004). Principles of remote sensing. *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*, 23(2), 23-28.
- Agrawal, M., Chhajed, P., & Chowdhury, A. (2022). Performance analysis of photovoltaic module with reflector: Optimizing orientation with different tilt scenarios. *Renewable Energy*, 186, 10-25.
- Akadiri, P. O., Chinyio, E. A., & Olomolaiye, P. O. (2012). Design of a sustainable building: A conceptual framework for implementing sustainability in the building sector. *Buildings*, 2(2), 126-152.
- Al-Homoud, M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and environment*, 40(3), 353-366.
- Al-Shuayfani, S. A., Loucif, A., Gassoumi, M., Shadad, M. N., & Amer, M. S. (2021). Optical characteristics of Cu_{1-x}Fe_xO thin films prepared via electrophoretic deposition technique. *Physica B: Condensed Matter*, 600, 412614. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412614>
- Alami, A. H., Rabaia, M. K. H., Sayed, E. T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., Alasad, S., & Olabi, A.-G. (2022). Management of potential challenges of PV technology proliferation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101942.
- Ali, K., Khan, S. A., & Jafri, M. Z. (2014). Structural and optical properties of ITO/TiO₂ anti-reflective films for solar cell applications. *Nanoscale Res Lett*, 9(1), 175. <https://doi.org/10.1186/1556-276x-9-175>
- Aljibori, H., Alamiery, A., & Kadhum, A. (2023). Advances in corrosion protection coatings: A comprehensive review. *Int J Corros. Scale Inhib*, 12, 1476-1520.
- Álvarez González, H. E. (2015). Efecto de polarización y difracción del haz modulado por PWM en comunicación óptica de espacio abierto.
- Alzahrani, M., Shanks, K., & Mallick, T. K. (2021). Advances and limitations of increasing solar irradiance for concentrating photovoltaics thermal system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110517.
- Baccoli, R., Kumar, A., Frattolillo, A., Mastino, C., Ghiani, E., & Gatto, G. (2021). Enhancing energy production in a PV collector–Reflector system supervised by an optimization model: Experimental analysis and validation. *Energy Conversion and Management*, 229, 113774.

REFERENCIAS

- Baig, H., Heasman, K. C., & Mallick, T. K. (2012). Non-uniform illumination in concentrating solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5890-5909. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.020>
- Bajpai, P., & Dash, V. (2012). Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2926-2939.
- Bejarano, G. (2000). Proyecto de investigación aplicada: recubrimiento duro de las herramientas de producción en serie mediante la Deposición Física de Vapor "PVD". *Informador Técnico*, 61, 15-16.
- Bharti, A., Mishra, A., & Paul, B. (2019). Thermal performance analysis of small-sized solar parabolic trough collector using secondary reflectors. *International Journal of Sustainable Energy*, 38(10), 1002-1022.
- Blair, N., Schiek, A., Burrell, A., Keyser, M., Deadman, A., Ellerington, I., Govaerts, L., Mulder, G., Hendrick, P., & Polfliet, T. (2021). Global overview of energy storage performance test protocols.
- Blatchley III, E. R. (1997). Numerical modelling of UV intensity: application to collimated-beam reactors and continuous-flow systems. *Water Research*, 31(9), 2205-2218.
- Bobzin, K., Brögelmann, T., Kalscheuer, C., & Liang, T. (2019). Post-annealing of (Ti,Al,Si)N coatings deposited by high speed physical vapor deposition (HS-PVD). *Surface and Coatings Technology*, 375, 752-762. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.100>
- Bond, L. J., Doctor, S. R., & Taylor, T. T. (2008). Proactive management of materials degradation-a review of principles and programs.
- Bortz, M., & French, R. (1989). Optical reflectivity measurements using a laser plasma light source. *Applied Physics Letters*, 55(19), 1955-1957.
- Boyer, C., Kieschnick, J., Suárez-Rivera, R., Lewis, R. E., & Waters, G. (2007). Producción de gas desde su origen. *Oilfield Review*, 18, 36-49.
- Brogren, M., Karlsson, B., Roos, A., & Werner, A. (2004). Analysis of the effects of outdoor and accelerated ageing on the optical properties of reflector materials for solar energy applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82(4), 491-515.
- Brostow, W., & Lobland, H. E. H. (2016). *Materials: introduction and applications*. John Wiley & Sons.
- Buendía-Martínez, F., Sutter, F., Wette, J., Valenzuela, L., & Fernández-García, A. (2021). Lifetime prediction model of reflector materials for concentrating solar thermal energies in corrosive environments. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 224, 110996.
- Cardenas, J. (2024). Ley de Snell. Retrieved mayo from <https://leerciencia.net/ley-de-snell-enunciado-formulas-y-ejemplos-resueltos/>

REFERENCIAS

- Carlsson, B., Möller, K., Köhl, M., Heck, M., Brunold, S., Frei, U., Marechal, J.-C., & Jorgensen, G. (2004). The applicability of accelerated life testing for assessment of service life of solar thermal components. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 84(1-4), 255-274.
- Castro, Y., Ferrari, B., Moreno, R., & Durán, A. (2000). Recubrimientos sol-gel obtenidos por deposición electroforética (EPD) sobre metales. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 39(6), 705-710.
- Cervera-Ferri, J. L., & Luz Ureña, M. (2017). Indicadores de producción verde: una guía para avanzar hacia el desarrollo sostenible.
- Cheela, V. S., John, M., Biswas, W., & Sarker, P. (2021). Combating urban heat island effect—A review of reflective pavements and tree shading strategies. *Buildings*, 11(3), 93.
- Chel, A., & Kaushik, G. (2018). Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria engineering journal*, 57(2), 655-669.
- Cheng, H., Wang, F., Ou, J., Li, W., & Xue, R. (2021). Solar reflective coatings with luminescence and self-cleaning function. *Surfaces and Interfaces*, 26, 101325.
- Choudhary, P., & Srivastava, R. K. (2019). Sustainability perspectives-a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 227, 589-612.
- Chow, T. T. (2018). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Renewable Energy*, Vol4_88-Vol84_119.
- Chow, T. T., Tiwari, G., & Menezo, C. (2012). Hybrid solar: a review on photovoltaic and thermal power integration. *International Journal of Photoenergy*, 2012.
- Comyn, J. (2021). *Adhesion science*. Royal Society of Chemistry.
- Crawford, R. H., Bartak, E. L., Stephan, A., & Jensen, C. A. (2016). Evaluating the life cycle energy benefits of energy efficiency regulations for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 435-451.
- Creighton, J., & Ho, P. (2001). Introduction to chemical vapor deposition (CVD). *Chemical vapor deposition*, 2, 1-22.
- Cristino, T., Neto, A. F., Wurtz, F., & Delinchant, B. (2021). Barriers to the adoption of energy-efficient technologies in the building sector: A survey of Brazil. *Energy and Buildings*, 252, 111452.
- Croll, S. G. (2020). Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review. *Progress in Organic Coatings*, 148, 105847. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105847>

REFERENCIAS

- Cuce, E., Harjunowibowo, D., & Cuce, P. M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 34-59.
- Curtis, T. L., Buchanan, H., Smith, L., & Heath, G. (2021). *A circular economy for solar photovoltaic system materials: drivers, barriers, enablers, and US policy considerations*.
- Dada, M., & Popoola, P. (2023). Recent advances in solar photovoltaic materials and systems for energy storage applications: a review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 12(1), 1-15.
- Dalapati, G. K., Ghosh, S., Sherin, T., Ramasubramanian, B., Samanta, A., Rathour, A., Wong, T. K. S., Chakraborty, S., Ramakrishna, S., & Kumar, A. (2023). Maximizing solar energy production in ASEAN region: opportunity and challenges. *Results in Engineering*, 101525.
- Dalapati, G. K., Kushwaha, A. K., Sharma, M., Suresh, V., Shannigrahi, S., Zhuk, S., & Masudy-Panah, S. (2018). Transparent heat regulating (THR) materials and coatings for energy saving window applications: Impact of materials design, micro-structural, and interface quality on the THR performance. *Progress in Materials Science*, 95, 42-131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.007>
- Danielson, S. J. (1996). 22 - THIN-FILM IMMUNOASSAYS. In E. P. Diamandis & T. K. Christopoulos (Eds.), *Immunoassay* (pp. 505-535). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012214730-2/50023-6>
- Darband, G. B., Aliofkhazraei, M., Khorsand, S., Sokhanvar, S., & Kaboli, A. (2020). Science and engineering of superhydrophobic surfaces: review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 1763-1802.
- Darut, G., Verdy, C., Pommies, M., Regnault, C., Lafargue-Tallet, T., Taillandier, M., & Peiffer, R. (2023). Development of Thermal Spray Alumina Coating for High Diffuse Reflectivity Application in Lambertian Screen. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(8), 2778-2801. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01660-9>
- Desideri, U., Proietti, S., Sdringola, P., Taticchi, P., Carbone, P., & Tonelli, F. (2010). Integrated approach to a multifunctional complex: Sustainable design, building solutions and certifications. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 21(5), 659-679.
- Dharshing, S. (2017). Household dynamics of technology adoption: A spatial econometric analysis of residential solar photovoltaic (PV) systems in Germany. *Energy research & social science*, 23, 113-124.
- Diddams, S., & Diels, J.-C. (1996). Dispersion measurements with white-light interferometry. *JOSA B*, 13(6), 1120-1129.

REFERENCIAS

- DOF. (2015). *Ley de Transición Energética*. Estados Unidos Mexicanos Diario Oficial de la Federación Retrieved from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5463923
- Du, H., Li, N., Brown, M. A., Peng, Y., & Shuai, Y. (2014). A bibliographic analysis of recent solar energy literatures: The expansion and evolution of a research field. *Renewable Energy*, 66, 696-706.
- Elizondo, A., Smith, I. D., & Ibarrarán, M. E. (2023). *Mapping renewable energy policy development at the state level in Mexico*. Norwegian Institute of International Affairs (NUPI).
- Etsion , I. (2005). State of the Art in Laser Surface Texturing. *Journal of Tribology*, 127(1), 248-253. <https://doi.org/10.1115/1.1828070>
- Fahrenbruch, A., & Bube, R. (2012). *Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion*. Elsevier.
- Farhat, O., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., Taher, R., & Castelain, C. (2022). A short recent review on hybrid energy systems: Critical analysis and recommendations. *Energy Reports*, 8, 792-802.
- Ferrer, G., Solé, A., Barreneche, C., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2015). Review on the methodology used in thermal stability characterization of phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 665-685.
- French, R., Rodríguez-Parada, J., Yang, M., Derryberry, R., & Pfeiffenberger, N. (2011). Optical properties of polymeric materials for concentrator photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(8), 2077-2086.
- García-Segura, A., Fernández-García, A., Ariza, M., Sutter, F., & Valenzuela, L. (2016). Durability studies of solar reflectors: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 453-467.
- García-Segura, A., Sutter, F., Martínez-Arcos, L., Reche-Navarro, T., Wiesinger, F., Wette, J., Buendía-Martínez, F., & Fernández-García, A. (2021). Degradation types of reflector materials used in concentrating solar thermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110879.
- Geels, F. W., Schwanen, T., Sorrell, S., Jenkins, K., & Sovacool, B. K. (2018). Reducing energy demand through low carbon innovation: A sociotechnical transitions perspective and thirteen research debates. *Energy research & social science*, 40, 23-35.
- Gharat, P. V., Bhalekar, S. S., Dalvi, V. H., Panse, S. V., Deshmukh, S. P., & Joshi, J. B. (2021). Chronological development of innovations in reflector systems of parabolic trough solar collector (PTC)-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111002.

REFERENCIAS

- Giljum, S., Burger, E., Hinterberger, F., Lutter, S., & Bruckner, M. (2011). A comprehensive set of resource use indicators from the micro to the macro level. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 300-308.
- Girard, A., Stekiel, M., Spahr, D., Morgenroth, W., Wehinger, B., Milman, V., Tra, N.-T., Mirone, A., Minelli, A., Paolasini, L., Bosak, A., & Winkler, B. (2019). Structural, elastic and vibrational properties of celestite, SrSO₄, from synchrotron x-ray diffraction, thermal diffuse scattering and Raman scattering. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 31(5), 055703. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aaf0ef>
- Gopal, L., & Sudarshan, T. (2023). Sol-gel coatings for corrosion protection. *Surface Engineering*, 39, 1-4. <https://doi.org/10.1080/02670844.2023.2195774>
- Gopalan, A. I., Lee, J. C., Saianand, G., Lee, K. P., Chun, W. Y., Hou, Y. L., Kannan, V., Park, S. S., & Kim, W. J. (2020). Cost-Effective Production of TiO₂ with 90-Fold Enhanced Photocatalytic Activity Via Facile Sequential Calcination and Ball Milling Post-Treatment Strategy. *Materials (Basel)*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/ma13225072>
- Granqvist, C. G. (2003). Solar energy materials. *Advanced Materials*, 15(21), 1789-1803.
- Granqvist, C. G., & Niklasson, G. A. (2018). Solar energy materials for thermal applications: A primer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180, 213-226. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.02.004>
- Green, M. A., & Bremner, S. P. (2017). Energy conversion approaches and materials for high-efficiency photovoltaics. *Nature materials*, 16(1), 23-34.
- Gurrappa, I., & Binder, L. (2008). Electrodeposition of nanostructured coatings and their characterization—A review. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(4), 043001. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/4/043001>
- Gutfleisch, O., Willard, M. A., Brück, E., Chen, C. H., Sankar, S., & Liu, J. P. (2011). Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials*, 23(7), 821-842.
- Hapke, B. (1981). Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4), 3039-3054.
- Hazelton, J., Bruce, A., & MacGill, I. (2014). A review of the potential benefits and risks of photovoltaic hybrid mini-grid systems. *Renewable Energy*, 67, 222-229.
- Heavens, O. (1960). Optical properties of thin films. *Reports on Progress in Physics*, 23(1), 1.
- Hottel, H. C., & Woertz, B. B. (1942). The performance of flat-plate solar-heat collectors. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 64(2), 91-103.
- Hussain, A., Arif, S. M., & Aslam, M. (2017). Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 12-28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033>

REFERENCIAS

- Inkson, B. J. (2016). 2 - Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In G. Hübschen, I. Altpeter, R. Tschuncky, & H.-G. Herrmann (Eds.), *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* (pp. 17-43). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X>
- Jacobs, M., De Vos, Y., & Middelkoop, V. (2021). Thickness controlled SiO₂/TiO₂ sol-gel coating by spraying. *Open Ceramics*, 6, 100121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100121>
- Jamali, H. (2019). Investigation and review of mirrors reflectance in parabolic trough solar collectors (PTSCs). *Energy Reports*, 5, 145-158.
- Jamil, S., Floyd, H. L., & Pace, D. A. (1997). Effective implementation of electrical safety regulations and standards. Record of Conference Papers. IEEE Industry Applications Society 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference,
- Jebali, S., Vayer, M., Belal, K., Mahut, F., & Sinturel, C. (2024). Dip-coating deposition of nanocomposite thin films based on water-soluble polymer and silica nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 680, 132688. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132688>
- Kalantari, E., & Molan, Y. E. (2016). Analytical BRDF model for rough surfaces. *Optik*, 127(3), 1049-1055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.10.170>
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in energy and combustion science*, 30(3), 231-295.
- Kang, G., Yoo, J., Ahn, J., & Kim, K. (2015). Transparent dielectric nanostructures for efficient light management in optoelectronic applications. *Nano Today*, 10(1), 22-47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.01.008>
- Kettle, J., Aghaei, M., Ahmad, S., Fairbrother, A., Irvine, S., Jacobsson, J. J., Kazim, S., Kazukauskas, V., Lamb, D., & Lobato, K. (2022). Review of technology specific degradation in crystalline silicon, cadmium telluride, copper indium gallium selenide, dye sensitised, organic and perovskite solar cells in photovoltaic modules: Understanding how reliability improvements in mature technologies can enhance emerging technologies. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 30(12), 1365-1392.
- Khan, F. A., Pal, N., & Saeed, S. H. (2021). Stand-alone hybrid system of solar photovoltaics/wind energy resources: an eco-friendly sustainable approach. In *Renewable Energy Systems* (pp. 687-705). Elsevier.
- Khan, J., & Arsalan, M. H. (2016). Solar power technologies for sustainable electricity generation–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 414-425.
- Khan, M. I., Asfand, F., & Al-Ghamdi, S. G. (2023). Progress in research and technological advancements of commercial concentrated solar thermal power plants. *Solar energy*, 249, 183-226.

REFERENCIAS

- Khan, S. A., Khan, S. B., Khan, L. U., Farooq, A., Akhtar, K., & Asiri, A. M. (2018). Fourier transform infrared spectroscopy: fundamentals and application in functional groups and nanomaterials characterization. *Handbook of materials characterization*, 317-344.
- Kim, J., Rabelo, M., Padi, S. P., Yousuf, H., Cho, E.-C., & Yi, J. (2021). A review of the degradation of photovoltaic modules for life expectancy. *Energies*, 14(14), 4278.
- Kim, M. S., Lee, J. H., & Kwak, M. K. (2020). Review: Surface Texturing Methods for Solar Cell Efficiency Enhancement. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21(7), 1389-1398. <https://doi.org/10.1007/s12541-020-00337-5>
- Kohsaka, R., & Kohyama, S. (2023). Contested renewable energy sites due to landscape and socio-ecological barriers: Comparison of wind and solar power installation cases in Japan. *Energy & Environment*, 34(7), 2619-2641.
- Kortüm, G. (2012). *Reflectance spectroscopy: principles, methods, applications*. Springer Science & Business Media.
- Kumaragurubaran, B., & Anandhi, S. (2014). Reduction of reflection losses in solar cell using anti reflective coating. 2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC),
- Launey, M. E., & Ritchie, R. O. (2009). On the fracture toughness of advanced materials. *Advanced Materials*, 21(20), 2103-2110.
- Lecca Díaz, G. K., & Prado Canahuire, L. A. (2019). Propuesta de criterios de sostenibilidad para edificios multifamiliares a nivel de certificación EDGE y sus beneficios en su vida útil (obra, operación y mantenimiento) frente a una edificación tradicional. Caso: edificio en el distrito de Santa Anita-Lima.
- Leng, Y. (2013). *Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods*. John Wiley & Sons.
- Leoni, G., S de Freitas, D., Gomes, J., & Brasil, S. (2022). Evaluation of Structure, Heterogeneities, Thickness and Corrosion Protection of Electrodeposited Sol-Gel Superhydrophobic Coatings. *Materials Research*, 25. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2021-0460>
- Levenda, A. M., Behrsin, I., & Disano, F. (2021). Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies. *Energy research & social science*, 71, 101837.
- Li, Z., & Wu, Z.-G. (2016). Development of medium-temperature composite phase change material with high thermal stability and conductivity. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 155, 341-347.
- Lindberg, J. D. (1987). Absolute diffuse reflectance from relative reflectance measurements. *Applied optics*, 26(14), 2900-2905. <https://doi.org/10.1364/AO.26.002900>

REFERENCIAS

- Liu, B., Wang, C., Bazri, S., Badruddin, I. A., Orooji, Y., Saeidi, S., Wongwises, S., & Mahian, O. (2021). Optical properties and thermal stability evaluation of solar absorbers enhanced by nanostructured selective coating films. *Powder Technology*, 377, 939-957.
- Liu, Y.-J., Lan, P.-H., & Lin, H.-H. (2014). Grid-connected PV inverter test system for solar photovoltaic power system certification. 2014 IEEE PES General Meeting| Conference & Exposition,
- Logothetidis, S. (2011). Nanotechnology: Principles and applications. In *Nanostructured materials and their applications* (pp. 1-22). Springer.
- Mahato, A. C., & Ghoshal, S. K. (2019). Various power transmission strategies in wind turbine: An overview. *International Journal of Dynamics and Control*, 7, 1149-1156.
- Mahesh, A., & Sandhu, K. S. (2015). Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1135-1147.
- Makki, A., Omer, S., & Sabir, H. (2015). Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 658-684.
- Manwell, J. (2004). Hybrid energy systems. *Encyclopedia of energy*, 3(2004), 215-229.
- Marzal Álvaro, I. (2023). Estudio del impacto de la tribología en el ahorro del consumo energético.
- McCarthy, D. E. (1967). Transmittance of Optical Materials from 0.17 μ to 3.0 μ . *Applied optics*, 6(11), 1896-1898.
- Meddeb, H., Götz-Köhler, M., Neugebohrn, N., Banik, U., Osterthun, N., Sergeev, O., Berends, D., Lattyak, C., Gehrke, K., & Vehse, M. (2022). Tunable photovoltaics: adapting solar cell technologies to versatile applications. *Advanced Energy Materials*, 12(28), 2200713.
- Mishra, S. K., Kumar, V., Tiwari, S., Mishra, T., Angula, G., & Adhikari, S. (2016). Development and degradation behavior of protective multilayer coatings for aluminum reflectors for solar thermal applications. *Thin Solid Films*, 619, 202-207.
- Mittal, M., Sardar, S., & Jana, A. (2021). Chapter 7 - Nanofabrication techniques for semiconductor chemical sensors. In C. M. Hussain & S. K. Kailasa (Eds.), *Handbook of Nanomaterials for Sensing Applications* (pp. 119-137). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820783-3.00023-3>
- Mohammad, A., & Mahjabeen, F. (2023). From Silicon to Sunlight: Exploring the Evolution of Solar Cell Materials. *JURIHUM: Jurnal Inovasi dan Humaniora*, 1(2), 316-330.
- Mussard, M. (2017). Solar energy under cold climatic conditions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 733-745.

REFERENCIAS

- Nema, P., Nema, R., & Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2096-2103.
- Nieves, A. A. (2011). *Mantenimiento de instalaciones solares fotovoltaicas*. Editorial Vértice.
- Nostell, P. (2000). *Preparation and optical characterisation of antireflection coatings and reflector materials for solar energy systems* [Acta Universitatis Upsaliensis].
- Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Ismail, M. S., & Moghavvemi, M. (2016). Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 821-835. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.040>
- Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265-2300.
- Oyekale, J., Petrollese, M., Tola, V., & Cau, G. (2020). Impacts of renewable energy resources on effectiveness of grid-integrated systems: Succinct review of current challenges and potential solution strategies. *Energies*, 13(18), 4856.
- Ozorhon, B., Batmaz, A., & Caglayan, S. (2018). Generating a framework to facilitate decision making in renewable energy investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 217-226.
- Pandey, A. K., Kumar, R., & Samykano, M. (2022). Solar energy: direct and indirect methods to harvest usable energy. In *Dye-Sensitized Solar Cells* (pp. 1-24). Elsevier.
- Parida, B., Iniyan, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625-1636.
- Patterson, A. L. (1939). The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination. *Physical Review*, 56(10), 978-982. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978>
- Paul, J., Kadirkama, K., Samykano, M., Pandey, A., & Tyagi, V. (2022). A comprehensive review on thermophysical properties and solar thermal applications of organic nano composite phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 45, 103415.
- Pavlina, E., & Van Tyne, C. (2008). Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels. *Journal of materials engineering and performance*, 17, 888-893.
- Pelaez-Martinez, O. (2017). ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LAS COBERTURAS VEGETALES DE LOS ECOSISTEMAS DE PÁRAMOS Y HUMEDALES A PARTIR DE LOS SENsoRES AEROTRANSPORTADOS ULTRACAM D, DJI PHANTON 3 PRO Y MAPIR NIR. CASOS DE ESTUDIO HUMEDAL "EL OCHO", VILLAMARÍA -CALDAS. AUTOR: OMAR ENRIQUE PELÁEZ MARTÍNEZ UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN

REFERENCIAS

- Peng, J., Lu, L., & Yang, H. (2013). Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 255-274.
- Pérez, S. C. (2013). *Porous one dimensional photonic crystals for enhanced photovoltaic performance of dye solar cells* Universidad de Sevilla].
- Petrović, M., Chellappan, V., & Ramakrishna, S. (2015). Perovskites: Solar cells & engineering applications – materials and device developments. *Solar energy*, 122, 678-699. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.09.041>
- Picollo, M., Aceto, M., & Vitorino, T. (2018). UV-Vis spectroscopy. *Physical sciences reviews*, 4(4), 20180008.
- Prävālie, R., Patriche, C., & Bandoc, G. (2019). Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach. *Journal of Cleaner Production*, 209, 692-721.
- Prime, R. B., Bair, H. E., Vyazovkin, S., Gallagher, P. K., & Riga, A. (2009). Thermogravimetric analysis (TGA). *Thermal analysis of polymers: Fundamentals and applications*, 241-317.
- Py, X., Azoumah, Y., & Olives, R. (2013). Concentrated solar power: Current technologies, major innovative issues and applicability to West African countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 306-315.
- Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaïd, K., Chae, K.-J., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of The Total Environment*, 754, 141989.
- Raut, H. K., Ganesh, V. A., Nair, A. S., & Ramakrishna, S. (2011). Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review. *Energy & Environmental Science*, 4(10), 3779-3804.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar energy*, 85(8), 1580-1608.
- Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow III, W. R., Zhou, N., Elliott, N., Dell, R., Heeren, N., & Huckestein, B. (2020). Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, 266, 114848.
- Rogers, D. S., Duraiappah, A. K., Antons, D. C., Munoz, P., Bai, X., Fragkias, M., & Gutscher, H. (2012). A vision for human well-being: transition to social sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(1), 61-73.
- Rönnelid, M., Karlsson, B., Krohn, P., & Wennerberg, J. (2000). Booster reflectors for PV modules in Sweden. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 8(3), 279-291.

REFERENCIAS

- Rowan, B. C., Wilson, L. R., & Richards, B. S. (2008). Advanced material concepts for luminescent solar concentrators. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 14(5), 1312-1322.
- Rowell, J. M. (1986). Photonic Materials. *Scientific American*, 255(4), 146-157. <http://www.jstor.org/stable/24976065>
- Rus, T., Lingvay, I., Caramitu, A. R., BORS, A. M., & Vaireanu, D. I. (2017). Comparative studies on the UV radiations resistance of some painting materials. *Mat. Plast*, 54(4), 720-725.
- Saber, H. H., Hajiah, A. E., Alshehri, S. A., & Hussain, H. J. (2021). Investigating the effect of dust accumulation on the solar reflectivity of coating materials for cool roof applications. *Energies*, 14(2), 445.
- Sachs, J. D., Schmidt-Traub, G., Mazzucato, M., Messner, D., Nakicenovic, N., & Rockström, J. (2019). Six transformations to achieve the sustainable development goals. *Nature sustainability*, 2(9), 805-814.
- Salas, L. A. P. (2015). Correlación de propiedades macroscópicas de la reflectancia difusa para resinas heterogéneas (TiO₂) con sus propiedades ópticas. <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/418/1/16272.pdf>
- Samykano, M. (2023). Hybrid photovoltaic thermal systems: Present and future feasibilities for industrial and building applications. *Buildings*, 13(8), 1950.
- Sandoval-Ruiz, C. (2018). Arquitectura Reconfigurable y Redes Inteligentes aplicadas al Diseño Sostenible en Smart City. *Revista Electrónica Científica Perspectiva*, 7(12), 1-19.
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar energy*, 85(12), 3085-3102.
- Sarkın, A. S., Ekren, N., & Sağlam, Ş. (2020). A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. *Solar energy*, 199, 63-73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.084>
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 698-733. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>
- Schuster, C. S., Crupi, I., Halme, J., Koç, M., Mendes, M. J., Peters, I. M., & Yerci, S. (2022). Empowering Photovoltaics with Smart Light Management Technologies. In M. Lackner, B. Sajjadi, & W.-Y. Chen (Eds.), *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation* (pp. 1165-1248). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72579-2_112
- Schweitzer, P. A. (2021). *Corrosion Resistance Tables: Part A*. CRC Press.

REFERENCIAS

- SEMARNAT. (2020). *PROGRAMA SECTORIAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES 2020-2024*. SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Retrieved Enero from <https://www.gob.mx/sener/documentos/instrumentosinternacionales>
- Seraphin, B. O. (1979). Spectrally selective surfaces and their impact on photothermal solar energy conversion. In B. O. Seraphin (Ed.), *Solar Energy Conversion: Solid-State Physics Aspects* (pp. 5-55). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-09224-2_2
- Serrano, E., Rus, G., & Garcia-Martinez, J. (2009). Nanotechnology for sustainable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2373-2384.
- Sharma, V., & Chandel, S. (2013). Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 753-767.
- Shih, K. (2013). *X-ray diffraction: Structure, principles and applications*. Nova Science Publishers, Inc.
- Simon, S. P., Kumar, K. A., Sundareswaran, K., Nayak, P. S. R., & Padhy, N. P. (2020). Impact and economic assessment on solar PV mirroring system—A feasibility report. *Energy Conversion and Management*, 203, 112222.
- Singh, S. (2002). Refractive index measurement and its applications. *Physica Scripta*, 65(2), 167.
- Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2023). Smart materials for biomimetic building envelopes: current trends and potential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113847.
- Steinborn, G., Tzschichholz, G., Günster, J., Keller, M. H., & Manara, J. (2011). Porous TiO₂-Y₂O₃ Ceramics with Specific Infrared-Optical Properties. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 2, 183-190. <https://doi.org/10.4416/JCST2011-00011>
- Stephens, R. B., & Cody, G. D. (1977). Optical reflectance and transmission of a textured surface. *Thin Solid Films*, 45(1), 19-29. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090\(77\)90197-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090(77)90197-3)
- Sun, H., Awan, R. U., Nawaz, M. A., Mohsin, M., Rasheed, A. K., & Iqbal, N. (2021). Assessing the socio-economic viability of solar commercialization and electrification in south Asian countries. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 9875-9897.
- Sweeney, M. N. (2002). Advanced manufacturing technologies for light-weight post-polished snap-together reflective optical system designs. Optomechanical Design and Engineering 2002,
- Tabor, D. (2000). *The hardness of metals*. Oxford university press.

REFERENCIAS

- Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F., & Alkasrawi, M. (2021). Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of The Total Environment*, 759, 143528.
- Tawfick, S., De Volder, M., Copic, D., Park, S. J., Oliver, C. R., Polsen, E. S., Roberts, M. J., & Hart, A. J. (2012). Engineering of micro-and nanostructured surfaces with anisotropic geometries and properties. *Advanced Materials*, 24(13), 1628-1674.
- Temiz, M., & Dincer, I. (2021). Enhancement of solar energy use by an integrated system for five useful outputs: System assessment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100952.
- Tilley, R. J. (2020). *Colour and the optical properties of materials*. John Wiley & Sons.
- Timilsina, G. R., Kurdgelashvili, L., & Narbel, P. A. (2012). Solar energy: Markets, economics and policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 449-465.
- Tong, C., & Tong, C. (2019). Materials-Based Solutions to Solar Energy System. *Introduction to Materials for Advanced Energy Systems*, 231-319.
- Tong, S. W., Goh, W. P., Huang, X., & Jiang, C. (2021). A review of transparent-reflective switchable glass technologies for building facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111615.
- Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar energy*, 81(9), 1117-1131.
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy policy*, 33(3), 289-296.
- Tyagi, V., Kaushik, S., & Tyagi, S. (2012). Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1383-1398.
- Uemoto, K. L., Sato, N. M. N., & John, V. M. (2010). Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy and Buildings*, 42(1), 17-22.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.026>
- Ushasree, P., & Bora, B. (2019). Silicon solar cells. In *Solar Energy Capture Materials* (pp. 1-55). The Royal Society of Chemistry.
- Uvarov, V., & Popov, I. (2013). Metrological characterization of X-ray diffraction methods at different acquisition geometries for determination of crystallite size in nano-scale materials. *Materials Characterization*, 85, 111-123.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.09.002>
- van Ginneken, B., Stavridi, M., & Koenderink, J. J. (1998). Diffuse and specular reflectance from rough surfaces. *Applied optics*, 37(1), 130-139.

REFERENCIAS

- Vargas, W. E. (2011). Difusión y absorción de luz en materiales no homogéneos: Modelo de Kubelka-Munk. *Light scattering and absorption by non homogeneous materials: The KM model*, 44, 163-183.
- Veloso, R. C., Souza, A., Maia, J., Ramos, N. M. M., & Ventura, J. (2021). Nanomaterials with high solar reflectance as an emerging path towards energy-efficient envelope systems: a review. *Journal of Materials Science*, 56(36), 19791-19839. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06560-3>
- Villanueva Fernández, G. (2010). *Estudio de viabilidad de un sistema de generación de energía eléctrica basado en energías renovables para países en vías de desarrollo*
- Vishnoi, M., Kumar, P., & Murtaza, Q. (2021). Surface texturing techniques to enhance tribological performance: A review. *Surfaces and Interfaces*, 27, 101463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101463>
- Wang, W., & Qi, L. (2019). Light management with patterned micro-and nanostructure arrays for photocatalysis, photovoltaics, and optoelectronic and optical devices. *Advanced Functional Materials*, 29(25), 1807275.
- Whitesides, G. M., Kriebel, J. K., & Mayers, B. T. (2005). Self-assembly and nanostructured materials. *Nanoscale Assembly: Chemical Techniques*, 217-239.
- Wijewardane, S., & Goswami, D. (2012). A review on surface control of thermal radiation by paints and coatings for new energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 1863-1873.
- Wolf, E. (2007). *Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light*. Cambridge university press.
- Xie, W., Liu, X., He, R., Li, Y., Gao, X., Li, X., Peng, Z., Feng, S., Feng, X., & Yang, S. (2020). Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 32, 101837.
- Xie, X., & Wang, Y. (2019). Research on Distribution Properties of Coating Film Thickness from Air Spraying Gun-Based on Numerical Simulation. *Coatings*, 9(11), 721. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/11/721>
- Yang, D., & Yin, H. (2011). Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(2), 662-670. <https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2112363>
- Yang, Y., Yue, X., Dai, H., & Zhang, Y. (2022). Measurement of refractive index spectrum of optical material by phase detection with optical coherence tomography. *Optics and Lasers in Engineering*, 150, 106857. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106857>
- Yang, Z., Zhang, S., Li, Y., Xu, Q., Wang, L., & Gong, L. (2025). Study on the BRDF for the Surfaces of Typical Metal Materials. *Coatings*, 15(3), 344.

REFERENCIAS

- Yao, L., & He, J. (2014). Recent progress in antireflection and self-cleaning technology—From surface engineering to functional surfaces. *Progress in Materials Science*, 61, 94-143.
- Yashim, M. M., Sainorudin, M. H., Mohammad, M., Fudholi, A., Asim, N., Razali, H., & Sopian, K. (2021). Recent advances on lightweight aerogel as a porous receiver layer for solar thermal technology application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 228, 111131.
- Yu, R., Lin, Q., Leung, S.-F., & Fan, Z. (2012). Nanomaterials and nanostructures for efficient light absorption and photovoltaics. *Nano energy*, 1(1), 57-72.
- Zarmai, M., Ekere, N. N., Oduoza, C., & Amalu, E. H. (2016). Optimization of thermo-mechanical reliability of solder joints in crystalline silicon solar cell assembly. *Microelectronics Reliability*, 59, 117-125.
- Zhang, L., Shi, X.-L., Yang, Y.-L., & Chen, Z.-G. (2021). Flexible thermoelectric materials and devices: From materials to applications. *Materials Today*, 46, 62-108.
- Zhou, H., Xu, J., Liu, X., Zhang, H., Wang, D., Chen, Z., Zhang, D., & Fan, T. (2018). Bio-inspired photonic materials: Prototypes and structural effect designs for applications in solar energy manipulation. *Advanced Functional Materials*, 28(24), 1705309.
- Zhou, L., Liu, S., & Zhong, T. (2023). A comprehensive review of optical diffusers: progress and prospects [10.1039/D2NR04579F]. *Nanoscale*, 15(4), 1484-1492. <https://doi.org/10.1039/D2NR04579F>
- Ziaeemehr, B., Jandaghian, Z., Ge, H., Lacasse, M., & Moore, T. (2023). Increasing solar reflectivity of building envelope materials to mitigate urban heat islands: State-of-the-art review. *Buildings*, 13(11), 2868.

XI. ANEXOS

Producto científico publicado

Ortega-Gonzalez, M. A., Urbiola, E. A. C., García, F. L., Ramírez, M. V., Hernández, D. F., Reyes, G. U., & Terven, J. (2024). Innovations in solar energy: Synthesis and evaluation of diffuse booster reflector ceramic coating for enhancing thermal and photovoltaic systems performance. *Energy Reports*, 12, 2224-2231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.08.022>

Energy Reports 12 (2024) 2224–2231

Contents lists available at ScienceDirect

Energy Reports

journal homepage: www.elsevier.com/locate/egyr

ELSEVIER

Research Paper

Innovations in solar energy: Synthesis and evaluation of diffuse booster reflector ceramic coating for enhancing thermal and photovoltaic systems performance

Miguel Angel Ortega Gonzalez ^a, Edgar Arturo Chávez Urbiola ^{b,*¹}, Felipe Legorreta García ^{a,*²}, Marissa Vargas Ramírez ^a, Demetrio Fuentes Hernández ^a, Gustavo Urbano Reyes ^a, Juan Terven ^b

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de México, Carrretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo 42184, Mexico
^b Instituto Politécnico Nacional (IPN) Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA-Qro), Cerro Blanco No. 143, Colinas del Cimatario, Querétaro, Querétaro 76090, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords: Ceramic coating, Reinforcing reflector, Diffuse reflectance, Sol-gel method, Photovoltaic-thermal systems (PVT), Alpha alumina

ABSTRACTS

Our research focused on developing a ceramic coating to optimize the performance of thermal solar systems (T), photovoltaic systems (PV), and their combined photovoltaic-thermal systems (PVT). After assessing various metals, we selected enameled low-carbon steel SAE 1008 as the best-suited substrate. Potential precursor powders, namely celestite, titanium dioxide, and alpha alumina, emerged as the top choice due to their impressive attributes. The ceramic coating was synthesized using the sol-gel process and applied through spraying and dip-coating. Coating characterization was carried out using UV-VIS, X-ray diffraction, and mechanical property assessments. Initial substrate cleaning significantly increased diffuse relative reflectance. Alpha alumina exhibited a reflectance of 93.71 %, titanium dioxide 98 %, and celestite 79.81 %. Dip-coating showed a reflectance of 76.07 % in the 400–800 nm range, decreasing to 74.70 % after the 24-h salt corrosion test. This method resulted in a coating with a 2H hardness rating, 48 adhesion, 95 % coverage, a thickness of 0.043 mm, and surface roughness metrics of 3.22 μm (Ra). In contrast, the spraying technique yielded coatings with a slightly better reflectance of 78.31 %, which diminished to 77.34 % after a 24-hour spray salt test. These coatings displayed a 4H hardness, 5B adhesion, full 100 % adhesion coverage, a thickness of 0.053 mm, and a roughness of 6.44 μm (Ra). Conclusively, our data suggests that the tailored ceramic coatings, especially the sprayable variant, have a significant potential for large-scale applications, thereby playing a pivotal role in amplifying solar system performance.

1. Introduction

The increasing demand for fossil resources has led modern society to seek the exploitation of renewable energies (Bridge and Wyeth, 2020). Employing sunlight and concentrating it on electricity generation, heating, and water purification, among others, is a way to provide safe and sustainable energy to humanity (Hillman, 2010). This energy is relatively inexhaustible, with the sun being its primary source, and it can be used in both non-concentrating and concentrating solar systems

(Hudson, 2014). Non-concentrating solar systems, like flat-plate collectors and photovoltaic panels, are crucial for residential and commercial applications due to their simplicity and lower costs. Concentrating solar systems use mirrors or lenses to focus sunlight, significantly increasing energy intensity. These systems are essential for large-scale power generation and industrial applications, such as parabolic troughs, power towers, and parabolic dishes, which achieve higher temperatures and efficiencies. They are suitable for utility-scale solar power plants, providing a more efficient way to generate electricity and thermal

* Corresponding authors.

E-mail addresses: echavez@ipn.mx (E.A.C. Urbiola), profe_974@uneh.edu.mx (F.L. García).

¹ 0000-0002-1938-8610.

² 0000-0001-6968-199X.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.08.022](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.08.022)

Received 26 April 2024; Received in revised form 2 August 2024; Accepted 10 August 2024

Available online 20 August 2024

2352-4847/© 2024 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ANEXOS

Producción científica en eventos académicos

Ortega-González, M. A. (2022). Síntesis y evaluación de materiales para su aplicación como reflectores difusos de refuerzo en sistemas híbridos solares. Ponencia en el XV Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 20 de julio de 2022.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales
Department of Materials and Earth Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., 20 de julio de 2022

Asunto: Carta de aceptación.

Estimado Autor de correspondencia
Ortega-González, Miguel Angel
or415427@uaeh.edu.mx
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Por medio de la presente y a nombre de el Comité Organizador del XV Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, tenemos el agrado de informarle que su resumen Titulado **Síntesis y Evaluación de Materiales para su Aplicación como Reflectores Difusos de Refuerzo en Sistemas Híbridos Solares**, presentado por:

Ortega-González, Miguel Angel¹, Chávez-Urbiola, Edgar Arturo², Legorreta-García Felipe¹

Ha sido **ACEPTADO** para su **Presentación de Cartel** en el marco de éste evento académico, a celebrarse de manera virtual en la UAEH del 28 al 30 de Septiembre del presente año.

El trabajo está registrado dentro del tópico **Caracterización de materiales** con la clave **C02**.

Le recordamos que la fecha límite para enviar su trabajo en extenso será el día 6 de agosto del presente año. Además le solicitamos que en su momento verifique de los comentarios de la revisión, si es que lo tuvieren, para garantizar el cumplimiento con el formato y calidad técnica de las memorias. Para ver la plantilla de extenso ingrese a la página <https://www.uaeh.edu.mx/xv-encuentro-investigacion-aactym/index.html> en la pestaña de formato de resumen y extenso.

Sin otro particular, agradecemos su participación y los esperamos virtualmente, despidiéndonos y enviando un cordial saludo.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

Comité Organizador
XV Encuentro de Investigación del AACTyM

ANEXOS

Ortega-González, M. A. (2023). Explorando el universo de la ciencia y tecnología. "Escuela Primaria Melchor Ocampo", Tepeapulco, Hidalgo. Organizado por la Secretaría de Educación Pública del Estado de Hidalgo, Subsecretaría de Educación Básica, Dirección General de Educación Básica, el 02 de junio de 2023



A QUIEN CORRESPONDA:

LA ESCUELA PRIMARIA "MELCHOR OCAMPO" – C.C.T. 13DPR2825P, ZONA ESCOLAR 060, SECTOR EDUCATIVO 029, UBICADA EN TEPEAPULCO, HGO., OTORGA LA SIGUIENTE

CONSTANCIA
A:
ESCUELA PRIMARIA
MTRO. MIGUEL ÁNGEL ORTEGA GONZÁLEZ
MELCHOR OCAMPO
POR HABER IMPARTIDO EN ESTA INSTITUCIÓN EDUCATIVA LA PLÁTICA TITULADA:
TEPEAPULCO, HGO.
"EXPLORANDO EL UNIVERSO DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA"



ANEXOS

Ortega-Gonzalez, M. A., (2024). Círculos de Ciencia. "Escuela Secundaria General Cultura y Patria". Organizado por la Escuela Superior de Apán y Subsecretaría de Educación Básica, Dirección General de Educación Básica el 22 de mayo de 2024.

